

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LOS LAHARES SECUNDARIOS EN EL FLANCO ORIENTAL DEL VOLCÁN COTOPAXI

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA
OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

POVEA CAÑAR MARÍA JOSÉ

maria_povea@hotmail.com

DIRECTOR: DR. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA

dandrade@igepn.edu.ec

Quito, abril 2020

DECLARACIÓN

Yo, María José Povea Cañar, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; 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.

MARÍA JOSÉ POVEA CAÑAR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por María José Povea Cañar, bajo mi supervisión.

Dr. Santiago Daniel Andrade Varela

DIRECTOR

DEDICATORIA

A mi Virgencita Dolorosa, a mis padres y hermanos.

"Se trata de morir más veces de las que te has sentido vivo".

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios y a mi Virgencita Dolorosa por llenarme de salud y valentía durante este proceso, por fortalecer mi fe a cada paso y poner en mi camino a personas que llenan mi vida y corazón.

A mis padres Renato y Rocío, por su apoyo, sacrificio, trabajo y amor incondicional. Sus valores, sabiduría y cariño me llevaron a ser la mujer que soy hoy y por eso estoy eternamente agradecida. Los amo mucho.

A mis hermanos Karen, Renato y Amelia por su confianza en mi, por su paciencia en días difíciles, por las risas y buenos momentos que se guardan en el corazón. Me inspiran a ser siempre mejor, los amo mucho.

A mis abuelitos Jorge y Carmen, por llenarme de amor, ser mi aliento y enseñarme el valor de una familia y que cualquier cosa hecha de corazón siempre es mejor. A mis abuelitos Timoleón y Enmita, por ser mis angelitos y cuidarme desde el cielo. Los amo mucho.

A mi tía Gabby, por estar dispuesta siempre a escuchar y darme sus consejos llenos de amor. Admiro profundamente la mujer que eres. Por mis moritas Paula y Mathy, están siempre en mi corazón.

A mi director de tesis, Dr. Daniel Andrade, un agradecimiento especial por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por su confianza, su guía siempre dispuesta y paciencia constante. Por siempre haberme brindado su mejor sonrisa, consejos y experiencias en tantas salidas a campo. Siempre, gracias!

A Emi, Sebas, Toño, Pancho y Marco, por ser un apoyo en la obtención de datos para este proyecto de investigación, siempre con la mejor disposición.

Al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional por brindarme todas las facilidades durante el desarrollo de mi proyecto de investigación.

A mis profesores de carrera, que supieron inculcarme además de conocimientos, la pasión por esta profesión. En especial por ellos que van más allá de lo académico y me brindaron consejos para la vida.

A mi mejor amigo Juan, por ser mi apoyo incondicional y parte de mi crecimiento personal a lo largo de estos años, por sacarme una sonrisa cuando más lo he necesitado. Gracias por tu paciencia, cuidados y cariño. Mi amor, abrazos y cuidados están contigo siempre, te quiero mucho.

A Isaac, por ser la fuerza que muchas veces me ha faltado. Por entenderme, acompañarme y estar siempre dispuesto a escuchar brindándome su mejor ánimo. Te quiero muchísimo, para siempre.

A Elías por su cariño y apoyo incondicional en el momento más oportuno, por querer siempre lo mejor para mi y simplemente por dejarme ser parte de su vida. Todos los geniales momentos de la universidad fueron mejores a tu lado. Te adoro!

A Francisco, por sus palabras de aliento, su confianza y por todo su cariño. Por enseñarme lo importante que es contar con una linda amistad.

A mis gordos, Hugo y David, por quererme y cuidarme siempre. En los momentos duros y divertidos han sido la mejor compañía. Los adoro.

A Nico, por tu amistad, por ser una fortaleza constante y por tu cariño a lo largo de tantos años de amistad; y a Ale y Stalin; ustedes tres fueron mi mayor razón de alegrías y risas durante la carrera, gracias por todas sus locuras, horas de estudio, lamentos conjuntos y conversaciones que solo ustedes entienden. Los quiero mucho.

A mis amigos electrónicos, mi otra familia, Sebas (Diuks), Ángel, Juanpa, Wirri, por todo su cariño desde siempre, por las locuras, risas y llantos. En especial a mi Margarita, por tantas experiencias fuera de serie a tu lado. Te quiero mucho.

A mis amigos de carrera por los años compartidos, la ayuda dispuesta y su cariño.

A Nezza y Danny, por sus ocurrencias desde el colegio, risas y palabras de apoyo constante. Los quiero mucho.

A todas las personas que de alguna manera han contribuido a lo largo de mi vida universitaria con mi crecimiento profesional y personal.

A mis perritos Bruno y Buba, por su amor sincero y leal.

A la Escuela Politécnica Nacional, que me permitió cumplir mi sueño, gracias.

María (Josa)

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE ANEXOS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	VIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICATIVOS	5
1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	5
1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	6
1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	7
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	7
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.4 ALCANCE	8
CAPÍTULO 2: CONTEXTO TEÓRICO.....	9
2.1 MARCO GEODINÁMICO	9
2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	10
2.3 LAHARES	13
2.3.1 CLASIFICACIÓN POR SU ORIGEN.....	14
2.3.2 CLASIFICACIÓN POR LA COMPOSICIÓN	16
2.4 ABANICOS ALUVIALES	21
2.5 FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA GPR.....	23
2.5.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.5.2 PRINCIPIO OPERATIVO.....	25
2.5.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES.....	28
2.6 FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES	29
2.6.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	29
2.6.2 VENTAJAS	30

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	32
3.1 GRANULOMETRÍA.....	32
3.1.1 GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO MANUAL.....	32
3.1.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS ESTADÍSTICOS GRÁFICOS.....	37
3.1.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES.....	38
3.2 RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR).....	43
3.2.1 MANEJO DEL EQUIPO GPR.....	44
3.2.2 PLANIFICACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GPR.....	46
3.3 CARTOGRAFÍA.....	55
3.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	55
3.3.2 OBTENCIÓN DE ORTOFOTOGRAFÍAS MEDIANTE.....	57
3.3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	60
3.3.4 PROCEDIMIENTO PARA LA CARTOGRAFÍA.....	63
3.4 PRECIPITACIÓN.....	68
3.4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	68
3.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS.....	70
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	72
4.1 GRANULOMETRÍA.....	72
4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAHARES SECUNDARIOS.....	72
4.1.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES.....	75
4.2 RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR).....	79
4.3 MAPA DE PUNTOS DE ESPESOR.....	83
4.4 CARTOGRAFÍA.....	89
4.5 PRECIPITACIÓN.....	95
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.....	100
5.1 DISCUSIÓN.....	100
5.1.1 COMPORTAMIENTO DE LOS DRENAJES A LARGO PLAZO.....	100
5.1.2 COMPORTAMIENTO DE LOS DRENAJES A CORTO PLAZO.....	100
5.1.3 POSIBLE INFLUENCIA DEL GLACIAR EN LA GENERACIÓN.....	102
5.2 CONCLUSIONES.....	105
5.3 RECOMENDACIONES.....	105
REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS.....	107
ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. 1 Zona de estudio a detalle	2
Fig. 1. 2 Método propuesto para la diferenciación de flujos	3
Fig. 2. 1 Configuración tectónica del área de estudio.....	10
Fig. 2. 2 Esquema de la formación de un lahar primario.....	14
Fig. 2. 3 Esquema de la formación de un lahar secundario	15
Fig. 2. 4 Lahar secundario, Quebrada Agualongo.....	15
Fig. 2. 5 (A) Flujo de escombros (debris flow) pobre en arcilla en el Mount Adams, EE. UU. Editado de (Vallance e Iverson, 2015).	18
Fig. 2. 6 Hidrogramas esquemáticos.....	19
Fig. 2. 7 Esquema de un lahar en transición aguas abajo.....	20
Fig. 2. 8 Mapa de ubicación de Mt. Ruapehu.....	22
Fig. 2. 10 El GPR utiliza ondas de radio para sondear el subsuelo de materiales dieléctricos con pérdida	24
Fig. 2. 11 Ejemplo de una sección transversal GPR obtenida con un sistema de 50 MHz atravesado en dos túneles de carretera.....	25
Fig. 2. 12 Equipo GPR en la Quebrada Pucarumi. En ella se pueden observar las partes del equipo como: mochila, las antenas, la pantalla y el equipo de control que se encuentra dentro de la maleta.	26
Fig. 2. 13 Ejemplo de adquisición de imágenes..	30
Fig. 3. 1 Toma de muestra de lahar secundario en Q. Jatabamba.....	32
Fig. 3. 2 Pasos para realizar el tamizaje manual en seco	34
Fig. 3. 3 Software SFT, ingreso de porcentajes en peso en el sistema e histograma correspondiente.....	36
Fig. 3. 4 Software SFT, tabla de resultados estadísticos para graficar en base a fórmulas según los autores Inman y Folk and Ward.	36
Fig. 3. 5 Hoja de trabajo de Excel en base a parámetros.....	38
Fig. 3. 6 Procedimiento para llevar a cabo el conteo de componentes de las muestras de lahares secundarios.....	40
Fig. 3. 7 Material vesiculado.....	41
Fig. 3. 8 Material no vesiculado.....	41
Fig. 3. 9 Cristales en mayor contenido	42
Fig. 3. 10 Materia orgánica.....	42
Fig. 3. 11 Ingreso de datos para análisis en Excel con gráficas.....	43
Fig. 3. 12 Equipo completo del Georadar de suelo.	44
Fig. 3. 13 Equipo GPR	44
Fig. 3. 14 Equipo GPR, toma de datos en la Q. Pucarumi.	46
Fig. 3. 15 Filtros aplicados a los radargramas.....	47
Fig. 3. 16 Tratamiento de los radargramas a través de filtros.	48
Fig. 3. 17 Mapa de ubicación de los perfilajes en la Q. Pucarumi.....	49
Fig. 3. 18 Mapa de ubicación de los perfilajes en la Q. Jatabamba.	50
Fig. 3. 19 Interpretación del radargrama J6	51

Fig. 3. 20 Mapa de puntos de espesores cada 2,5 m en cada perfil, Q. Jatabamba.....	53
Fig. 3. 21 Mapa de puntos de espesor cada 2,5 m y límite de puntos en la frontera con un valor de espesor 0, Q. Jatabamba.	53
Fig. 3. 22 Caja de herramientas ArcToolBox en el software ArcMap, para escoger el método Kriging.....	54
Fig. 3. 23 Ejemplo de un modelamiento tipo Kriging en la Q. Jatabamba.	55
Fig. 3. 24 Mapa de ubicación de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi en el flanco oriental del volcán Cotopaxi.....	56
Fig. 3. 25 Toma de datos de coordenadas geográficas mediante una antena de alta precisión. A. Quebrada Jatabamba. B. Quebrada Pucarumi.	58
Fig. 3. 26 Unidad aérea no tripulada (drone) modelo eBee Classic.	59
Fig. 3. 27 Cámara tipo sensefly S.O.D.A.....	59
Fig. 3. 28 Cámara tipo Canon S110 NIR.....	60
Fig. 3. 29 Pantalla de configuraciones del software eMotion3 en la Q. Jatabamba.....	61
Fig. 3. 30 Pantalla de configuraciones del software eMotion3 en la Q. Pucarumi.	61
Fig. 3. 31 Procedimiento para conformar una ortofotografía: nube densa de puntos, además se observa las fotografías tomadas en la Q. Jatabamba.	63
Fig. 3. 32 Procedimiento para conformar una ortofotografía: nube densa de puntos, además se observa las fotografías tomadas en la Q. Pucarumi.....	63
Fig. 3. 33 Georeferenciación. Asignación y distribución de todos los puntos de referencia en la Q. Jatabamba (A) y en la Q. Pucarumi (B).	64
Fig. 3. 34 Evidencia de cómo la vegetación ayuda a la cartografía.....	65
Fig. 3. 35 Evidencia de cómo la vegetación ayuda a la cartografía.....	65
Fig. 3. 36 Evidencia de cómo la coloración ayuda a la cartografía.....	66
Fig. 3. 37 Evidencia de cómo los lineamientos ayudan a.....	66
Fig. 3. 38 Pasos para la cartografía en ArcMap 10.4.1.	67
Fig. 3. 39 Mapa de ubicación de la estación M5076 del FONAG en relación a las zonas de estudio.....	69
Fig. 3. 40 A.1 Ingresar a la página web oficial del FONAG	69
Fig. 3. 41 Tabla de datos a llenarse para la adquisición de datos pluviométricos y mapa de ubicación de la estación M5076.	70
Fig. 3. 42 Tratamiento de datos de pluviometría y correlación con el área de lahares secundarios.	71
Fig. 4. 1 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo para las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.....	72
Fig. 4. 2 Histogramas de distribución para la Q. Jatabamba (A-C) y la Q. Pucarumi (D-F). %W= porcentaje en peso. Phi= escala del tamaño de grano.	73
Fig. 4. 3 Método de clasificación de flujos de lahares secundarios propuesto por Pierson and Scott (1999) para la Q. Jatabamba y Pucarumi.	75
Fig. 4. 4 Resultados de análisis de componentes representados en gráficas de columnas apiladas.....	78

Fig. 4. 5 Componentes vesiculados del análisis de componentes cuantitativa de la Q. Jatabamba, muestra JATA_MUESTREO_01, fracción -1 ϕ . Sub-categorías por colores blanco (crema), rojo y negro.	78
Fig. 4. 6 Sub-categorías por colores en el análisis de componentes de las fracciones de 1 ϕ y -1 ϕ para los componentes vesiculados y no vesiculados.	79
Fig. 4. 7 Mapa de perfilajes con GPR en campo con los radargramas más representativos de toda la Quebrada Jatabamba.	81
Fig. 4. 8 Mapa de perfilajes con GPR en campo con los radargramas más representativos de toda la Quebrada Pucarumi.	82
Fig. 4. 9 Se observa la distribución espacial de los valores de espesor y su límite en parte de la Quebrada Jatabamba.	83
Fig. 4. 10 Se observa la distribución espacial de los valores de espesor y su límite en parte de la Quebrada Pucarumi.	84
Fig. 4. 11 Ajuste de semivariogramas para las quebradas Jatabamba y Pucarumi.	85
Fig. 4. 12 Modelos de interpolación tipo kriging en base al espesor de los depósitos de lahares secundarios de la Q. Jatabamba.	86
Fig. 4. 13 Modelos de interpolación tipo kriging en base al espesor de los depósitos de lahares secundarios de la Q. Pucarumi.	87
Fig. 4. 14 Diagramas de dispersión de espesor en el eje Y diferenciando perfiles transversales y longitudinales. A. Q. Jatabamba. B. Q. Pucarumi.	88
Fig. 4. 15 Línea de tiempo.	91
Fig. 4. 16 Cartografía de lahares secundarios acumulada en el tiempo – Q. Jatabamba.	93
Fig. 4. 17 Cartografía de lahares secundarios acumulada en el tiempo – Q. Pucarumi.	94
Fig. 4. 18 Precipitación acumulada diaria en mm de la estación hidrológica M5076 del FONAG - Q. Jatabamba.	96
Fig. 4. 19 Precipitación acumulada diaria en mm de la estación hidrológica M5076 del FONAG - Q. Pucarumi.	97
Fig. 4. 20 Área del lahar cartografiado vs cantidad de precipitación acumulada – Q. Jatabamba.	98
Fig. 4. 21 Área del lahar cartografiado vs cantidad de precipitación acumulada – Q. Pucarumi.	98
Fig. 4. 22 Área de los lahares cartografiados en la Q. Jatabamba vs área de los lahares cartografiados en la Q. Pucarumi en la misma fecha.	99
Fig. 5. 1 Perfiles topográficos y pendientes de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.	102
Fig. 5. 2 Lenguas de glaciar. A. Proximidad de las quebradas y las lenguas de glaciar que tienen influencia. B. Mayor detalle.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Características de los tipos de lahares de acuerdo a su composición. Editado de (Smith, 1986).....	18
Tabla 2. 2 La permitividad relativa típica, la conductividad eléctrica, la velocidad y la atenuación observada en materiales geológicos comunes.....	27
Tabla 2. 3 Antenas sin blindaje y áreas de uso adecuadas	28
Tabla 3. 1 Diámetro de aberturas de los tamices utilizados en mm y Phi.	33
Tabla 3. 2 Tabla de datos de la muestra JATA_MUESTREO_01 para obtener los porcentajes en peso correspondiente a cada Phi (números en negrita).	35
Tabla 3. 3 Categorías y descripción para la clasificación en el análisis de componentes.....	38
Tabla 3. 4 Porcentajes de acuerdo a las categorías de clasificación para el análisis de componente para la Q. Jatabamba.	42
Tabla 3. 5 Parámetros utilizados en el GPR.....	45
Tabla 3. 6 Datos generales de la unidad aérea no tripulada (drone).....	58
Tabla 4. 1 Parámetros estadísticos gráficos de (Folk, 1980) en las quebradas Jatabamba y Pucarumi.....	74
Tabla 4. 2 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Jatabamba para la fracción de 1ϕ	76
Tabla 4. 3 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Pucarumi para la fracción de 1ϕ	76
Tabla 4. 4 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Jatabamba para la fracción de -1ϕ	76
Tabla 4. 5 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Pucarumi para la fracción de -1ϕ	77
Tabla 4. 6 Tabla de fechas en las que fueron obtenidas las fotografías en campo y la cámara utilizada.....	90
Tabla 4. 7 Tabla resumen de los lahares cartografiados en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.....	92
Tabla 4. 8 Tabla de áreas de los lahares secundarios cartografiados en la Q. Jatabamba (izquierda) y Pucarumi (derecha).....	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I Tablas de datos de las muestras de la Q. Jatabamba, resultados de la granulometría de los depósitos de lahares secundarios.	112
Anexo II Tablas de datos de las muestras de la Q. Pucarumi, resultados de la granulometría de los depósitos de lahares secundarios.	114
Anexo III Radargramas obtenidos con el equipo GPR interpretados, Quebrada Jatabamba.....	116
Anexo IV Radargramas obtenidos con el equipo GPR interpretados, Quebrada Pucarumi.	122
Anexo V Tabla de coordenadas y espesores en los perfiles de la Q. Jatabamba.	127
Anexo VI Tabla de coordenadas y espesores en los perfiles de la Q. Pucarumi.	135
Anexo VII Tabla de áreas de los lahares cartografiados en la misma fecha para gráfica de dispersión.	149
Anexo VIII Cartografía de lahares secundarios mediante ortofotografías tomadas con drone para las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.....	150

RESUMEN

El volcán Cotopaxi se caracteriza por la presencia de un glaciar de 0,7 km³ que cubre el edificio desde su cumbre hasta un nivel de ~4900 m. Desde la última gran erupción explosiva del Cotopaxi en 1877, abanicos aluviales se han formado alrededor del volcán a causa de la erosión y la depositación producida por lahares secundarios. Las quebradas Pucarumi y Jatabamba son dos drenajes adyacentes en el flanco NE del Cotopaxi, que muestran zonas de origen muy cercanas y evidentes abanicos aluviales posteriores a 1877, y fueron el tema del presente estudio.

El desarrollo a largo plazo de los abanicos aluviales se evaluó midiendo sus espesores totales con inspecciones GPR realizadas en segmentos de los drenajes donde se observan los depósitos de 1877 directamente subyacentes a los depósitos aluviales recientes y evaluando su granulometría para clasificar a los depósitos y determinar sus componentes principales. El desarrollo a corto plazo de los abanicos aluviales se observó con el mapeo con una resolución en cm de los depósitos recientes a través de estudios periódicos llevados a cabo con drone entre mayo de 2018 y julio de 2019, y al comparar los depósitos mapeados con los registros locales de lluvia del FONAG.

Las inspecciones GPR y la granulometría sugieren que ambos drenajes se han desarrollado de manera similar durante los últimos 143 años, tomando como referencia que se depositaron a partir de 1877; sus depósitos se clasificaron como flujos hiperconcentrados que poseen espesores máximos que oscilan entre 6,5 y 8 m, implicando tasas promedio de depositación a largo plazo de 4 – 5 cm/año. Sin embargo, el mapeo de drones muestra un comportamiento actual muy contrastante entre ambos drenajes. Primero, el drenaje de Jatabamba es mucho más activo que Pucarumi, con grandes depósitos mapeados durante todo el año. En segundo lugar, no existe una relación clara entre la precipitación registrada y el tamaño del lahar, ni siquiera la ocurrencia. La única diferencia actualmente observada en la zona fuente es la presencia de una lengua de glaciar en la zona fuente del drenaje de Jatabamba. Esto sugiere que las interacciones lluvia-glaciar son procesos significativos en el comportamiento erosivo del volcán Cotopaxi.

ABSTRACT

Cotopaxi volcano is characterized by the presence of a 0.7 km³ glacier that covers the edifice from its summit down to the ~4900 m level. Since the last big explosive eruption of Cotopaxi in 1877, alluvium fans have formed all around the volcano by the erosion and deposition produced by secondary lahars. The quebradas Pucarumi and Jatabamba are two adjacent drainages in the NE flank of Cotopaxi, displaying very close source zones and clear post-1877 alluvium fans, and were the subject of the present study.

The long-term development of the fans was assessed by measuring their total thicknesses with GPR surveys performed in segments of the drainages where the 1877 deposits are observed directly underlying the recent alluvium deposits and evaluating its granulometry to classify the deposits and determine their main components. The short-term development of the fans was observed with cm-resolution mapping of recent deposits through periodic drone surveys carried out between May 2018 and July 2019, and by comparing the mapped deposits with local rainfall records of the FONAG.

GPR surveys and granulometry suggest that both drainages have developed similarly during the last 143 years, taking as reference that they were deposited from 1877; their deposits were classified as hyperconcentrated flows that have maximum thicknesses ranging between 6,5 to 8 m, and implying average long-term deposition rates of 4 – 5 cm/year. However, drone mapping shows a very contrasting current behavior between both drainages. First, Jatabamba drainage is much more active than Pucarumi, with big deposits mapped through the whole observed year. Second, there is no clear relationship between recorded rainfall and lahar size nor even occurrence. The only difference currently observed in the source zone is the presence of a glacier tongue in the Jatabamba drainage source zone. This suggests that rain-glacier interactions are significant processes in the erosional behavior of Cotopaxi volcano.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Aunque el estudio de los volcanes cada vez sea más avanzado, todos sus peligros asociados siguen siendo causa de pérdida de vidas humanas y daños de las propiedades públicas y privadas (p.e. erupción del volcán de Fuego, Guatemala, en Junio 2018). El Ecuador, por su ubicación en un margen de convergencia (zona de subducción), se encuentra en una zona de actividad volcánica.

El volcán Cotopaxi es un volcán potencialmente activo que se encuentra a 60 km al sureste de la ciudad de Quito, en la Cordillera Real del Ecuador. Es uno de los principales estratovolcanes de la fila volcánica oriental de Ecuador, sus flancos superiores revestidos de glaciares tienen pendientes que promedian 25 - 30°, mientras que sus flancos inferiores están incisos por cañones de decenas de metros de profundidad (Mothes et al., 1998). El Cotopaxi es reconocido a nivel mundial por su majestuoso glaciar y por sus erupciones explosivas históricas, al menos 13 significativas desde 1534, basadas en la tefroestratigrafía y relatos históricos y que corresponden a cinco ciclos: 1532–1534, 1742–1744, 1766–1768, 1853–1854 y 1877–1880 (Hall y Mothes, 2007; Pistolesi et al., 2011) .

Estas erupciones han desencadenado grandes daños a causa de lahares, de gran y pequeña escala, en especial a las poblaciones más cercanas a sus drenajes mayores, que son: hacia el norte, el río Pita, que fluye a través de los valles de Los Chillos y Tumbaco, al oeste - suroeste el río Cutuchi que fluye a través de Latacunga y al este el sistema del río Tambo-Tamboacu, que forma parte del Río Napo y fluye a través de las tierras bajas amazónicas (Mothes et al., 2004) (Fig. 1. 1B).

Sin embargo, durante los períodos de reposo, el Cotopaxi se encuentra sujeto a procesos geológicos superficiales, específicamente a la erosión, que puede ser originada por el viento, los glaciares y la lluvia. En especial, es conocido que la lluvia es un agente muy común de erosión en los volcanes, dando lugar a la ocurrencia de lahares secundarios (Jones, 2016; Capra et al., 2010; Barclay et al., 2007; Rodolfo y Arguden, 1991; Umbal y Rodolfo, 1996). De hecho, se define como lahares secundarios a los flujos aluviales formados en volcanes, cuya fuente de agua no se encuentre directamente relacionada a la ocurrencia de un proceso eruptivo (Jones, 2016).

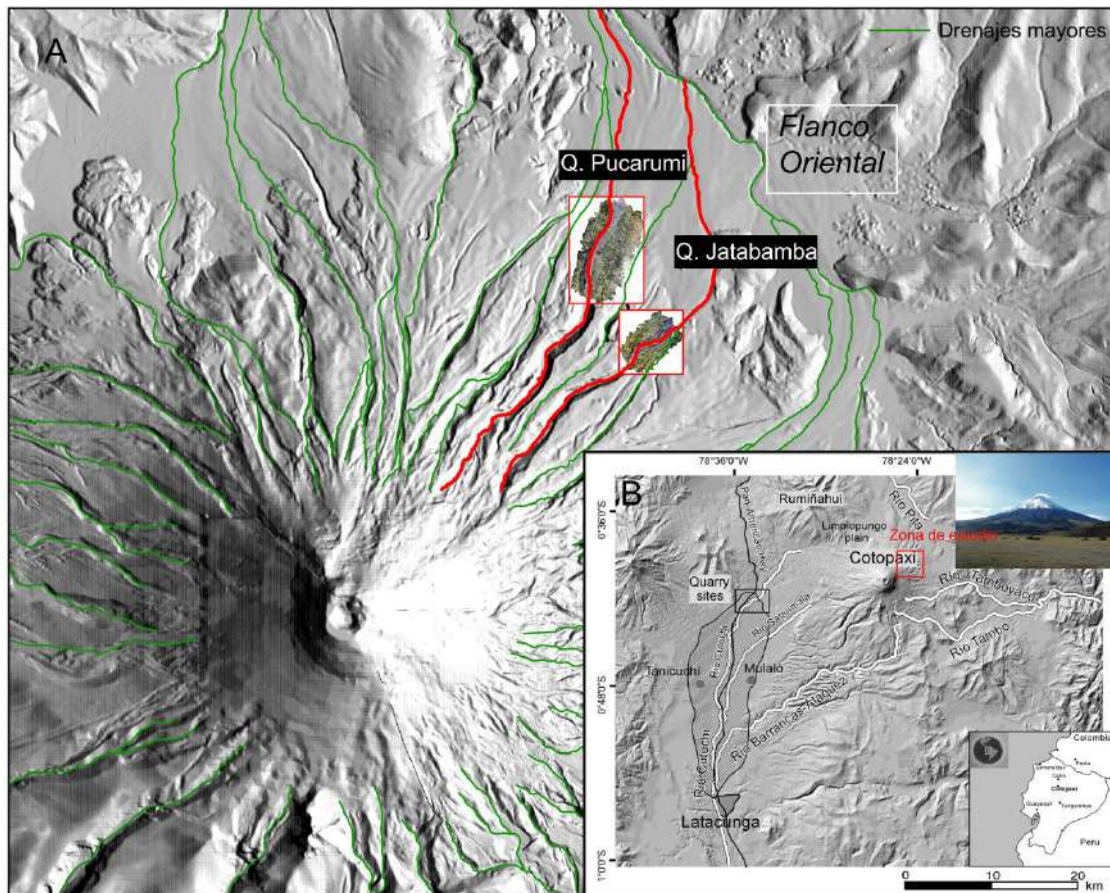


Fig. 1. 1 Zona de estudio a detalle. A. Quebradas Jatabamba y Pucarumi, en el flanco oriental del volcán Cotopaxi y B. Ubicación a menor escala y drenajes mayores del volcán, modificado de (Pistolesi et al., 2014).

Los lahares secundarios pueden clasificarse de acuerdo a las características de su flujo en tres categorías reológicas principales (Fig. 1. 2): flujos de escombros (debris flows), cuando los flujos tienen más de 60% vol. de materiales sólidos (sedimentos); flujos hiperconcentrados (hyperconcentrated streamflows), cuando tienen entre el 20 – 60% vol. de sedimentos o flujos de agua (water flows), aquellos con <20% vol. de sedimentos (Jones, 2016). Los depósitos de cada tipo de flujo tienen características específicas. Los depósitos de flujos de escombros son predominantemente matriz soportados, masivos y muy mal sorteados, además se comportan como una sola fase lodos plásticos (Cronin, 1997). Por otro lado, Pierson y Costa en 1987 definieron el flujo hiperconcentrado como una "mezcla fluida de agua y sedimento que posee una resistencia medible pero que todavía parece fluir como un líquido" (Vallance e Iverson, 2015), cuyos depósitos son clasto soportados, que pueden ser masivos, pero que generalmente poseen una débil estratificación. Adicionalmente, existen diferencias granulométricas entre cada tipo de depósito. Los depósitos de lahares secundarios del presente estudio serán observados, muestreados en campo y clasificados entre estos

tres tipos de flujos mediante un estudio granulométrico.

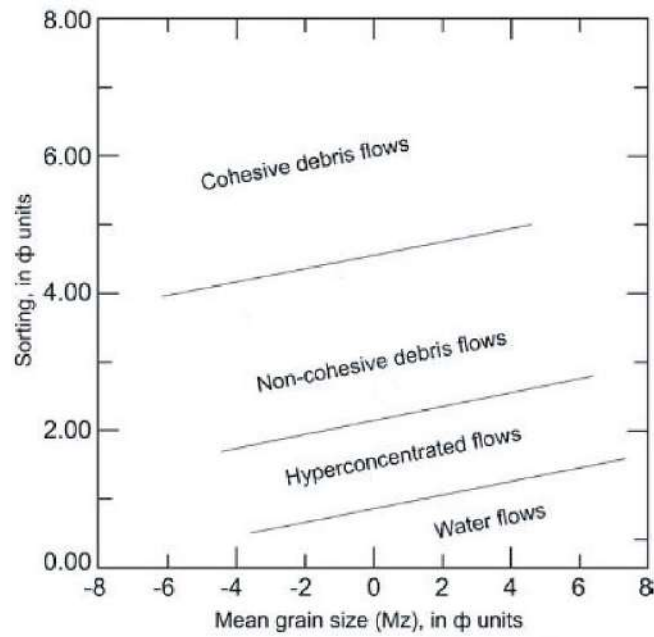


Fig. 1. 2 Método propuesto para la diferenciación de flujos por Pierson y Scott (1999). Tomado de (Murcia et al., 2008)

Los lahares son particularmente peligrosos porque pueden afectar las áreas proximales y distales del volcán (Aguilera et al., 2004). Su habilidad para afectar a zonas muy lejanas al punto de origen del lahar es la mayor preocupación actualmente, en especial hablando de experiencias pasadas donde, los lahares generados acabaron con los valles poblados circundantes en numerosas ocasiones.

En la actualidad, a los pies del Cotopaxi se puede constatar la formación de una serie de abanicos aluviales depositados posteriormente a la última gran erupción de 1877, los mismos son muy visibles en los flancos norte y oriente (Fig. 1. 3A). Estos abanicos son el resultado de los procesos erosivos que actúan sobre el volcán (Fig. 1. 3B). La realización del estudio pretende generar un conocimiento aplicable a la situación que ocurre en todas las quebradas ubicadas en el flanco oriental del volcán Cotopaxi.

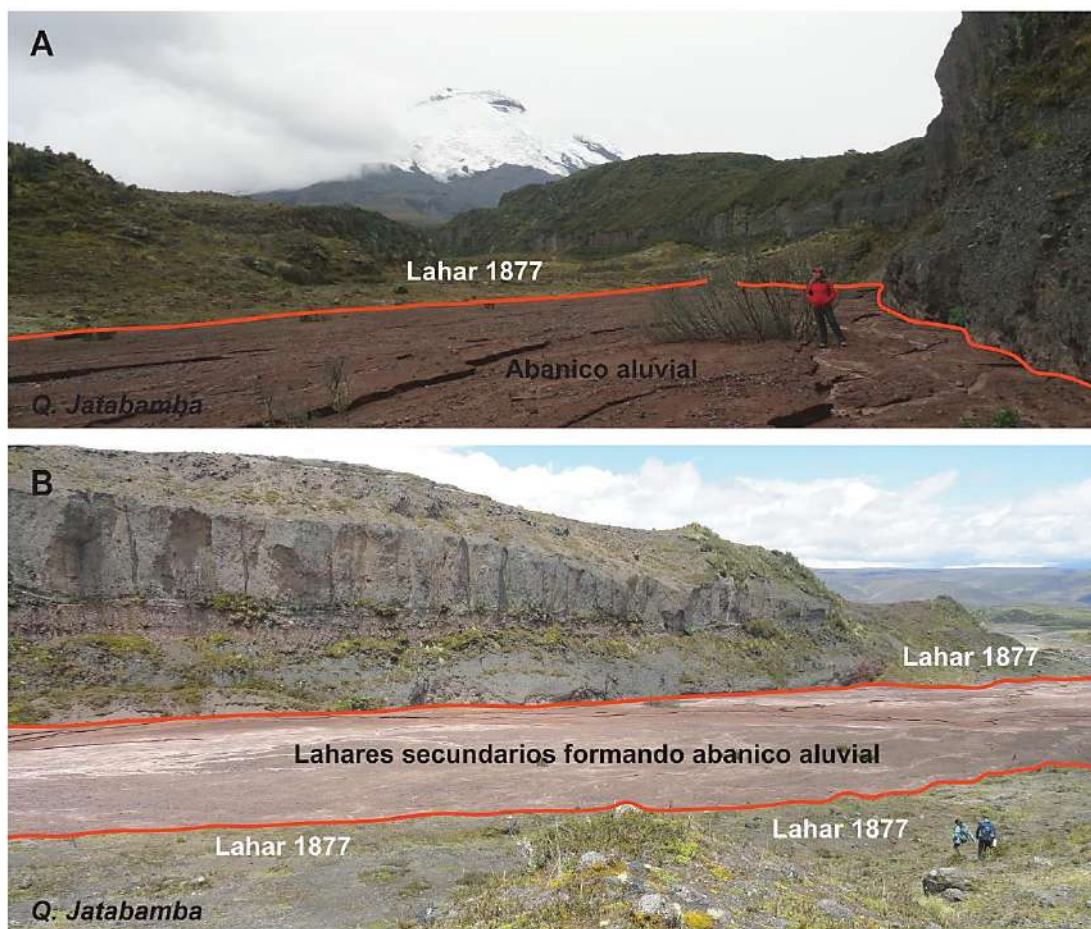


Fig. 1. 3 Evidencia de la formación de abanicos aluviales en una quebrada en el flanco oriental del volcán Cotopaxi. A. La acumulación de sucesivos lahares secundarios va constituyendo un abanico aluvial en la Q. Jatabamba. B. Los lahares secundarios pueden ser delimitados, son claramente visibles.

Para ello dos quebradas han sido seleccionadas bajo los siguientes criterios: 1) observaciones previas realizadas en campo de lahares secundarios ocurriendo recurrentemente en la actualidad, 2) por su cercanía geográfica entre ellas y, 3) la accesibilidad para realizar los estudios correspondientes. Las quebradas seleccionadas son: Jatabamba y Pucarumi, ubicadas en el flanco oriental del Cotopaxi (Fig. 1. 1A). En ellas se realizará un estudio geológico detallado de los lahares secundarios que ocurren actualmente y que permitirá entender las condiciones de formación de los abanicos aluviales encontrados en el flanco oriental del volcán Cotopaxi. Este estudio incluirá un estudio de campo, el muestreo de los depósitos de lahares secundarios, junto con una cartografía periódica y análisis de sus depósitos a través de ortofotografías tomadas con dron, que mediante una correlación de datos pluviométricos y radargramas obtenidos con el instrumento GPR (Radar de Penetración de Suelo), nos permitirán comprender sus mecanismos de formación.

1.2 JUSTIFICATIVOS

1.2.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Los estudios geológicos implican la cartografía y la caracterización de facies de las formaciones rocosas estudiadas. Por su lado, la caracterización de facies implica la descripción y/o cuantificación de parámetros geométricos, litológicos, estructurales y cronológicos de las formaciones estudiadas. Los parámetros de facies a describirse o medirse pueden ser muy variados, incluyendo petrografía, granulometría, medidas de espesor, edad, etc. Mediante las informaciones obtenidas de estos estudios se pueden hacer interpretaciones detalladas sobre el origen y las condiciones de depositación, acumulación y sedimentación de las formaciones estudiadas.

La cartografía geológica implica la obtención de mapas que muestren la distribución espacial de los depósitos que se desea estudiar. Para el presente estudio se realizará cartografía a una escala 1: 2 000 para la quebrada Jatabamba y 1: 1 500 para la quebrada Pucarumi.

El conocimiento geológico detallado permitirá definir posibles factores que afectan la ocurrencia de estos lahares y así mejorar la evaluación del peligro volcánico asociado a lahares secundarios en el volcán Cotopaxi.

Hoy en día, los lahares se definen como una mezcla saturada de detritos volcánicos y agua, con una concentración de sedimentos respectivamente alta (>60%) a baja (20–60%) (Ettinger et al., 2014), incluyendo todas transiciones reológicas posibles entre debris flows y flujos hiperconcentrados. En general los lahares contribuyen a la evolución en las tierras bajas en un volcán, su influencia es grande y estudios en planicies volcánicas alrededor de los volcanes, que podrían interpretarse como llanuras de inundación y, en ciertos casos, como abanicos aluviales, tanto en la antigüedad como en la modernidad, han revelado complejas características litológicas y estratigrafía de los depósitos.

Los abanicos aluviales son complejos y sensibles componentes del paisaje que responden a una variedad de factores, entre ellos, tectónica, clima, terremotos, fuego, y la magnitud y frecuencia de los procesos formativos (Procter et al., 2010). Estudios recientes sobre los depósitos volcánicos asociados a los estratovolcanes muestran que la respuesta sedimentaria inmediata a las erupciones volcánicas es una agradación dentro de los sistemas de transporte que llevan los sedimentos lejos del volcán.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La cartografía geológica de lahares secundarios actuales se realizará utilizando como dato principal las ortofotografías, con una resolución de 10 cm, tomadas por una nave aérea no tripulada (drone). Para ello se tomaron fotografías periódicamente en donde se podrá observar a detalle cómo los nuevos depósitos de lahares secundarios están dispuestos en los drenajes y comparar lo que ha cambiado con ortofotografías anteriores. El gran detalle de las ortofotografías permite identificar elementos como la vegetación, pequeños clastos, el cambio de tonalidades del depósito en la ortofotografías o la presencia de grietas nuevas, con los cuales se puede cartografiar el paso de un nuevo lahar secundario. Estas ortofotografías serán recolectadas en campo, en las quebradas Jatabamba y Pucarumi, con un intervalo de tres semanas, aproximadamente, entre una y otra ortofotografía, a lo largo de un año: desde mayo de 2018 hasta julio de 2019. Con estos datos se espera determinar el tamaño de los lahares ocurridos así como la relación que poseen estos depósitos con la ocurrencia de lluvias en la zona o también, la posible intervención del deshielo del glaciar.

Además se recolectarán 3 muestras de depósitos de lahares secundarios en cada una de las quebradas Jatabamba y Pucarumi. Con las muestras de los depósitos se realizará una caracterización granulométrica, que junto con la información obtenida en campo y la ayuda del software SFT, que proporciona resultados en base a los pesos obtenidos en los diferentes tamices, permitirá clasificar y definir el tipo de flujo de lahares secundarios al que corresponde, ya sea un flujo de escombros o un flujo hiperconcentrado.

Se contará además con datos de pluviometría de la zona de estudio, los mismos que serán correlacionados con la cartografía geológica de los depósitos de lahares secundarios. La idea es verificar si existe una relación entre la ocurrencia de lluvias y la ocurrencia de un lahar secundario que se visualice en una ortofotografía, así como conocer si el deshielo del glaciar puede contribuir también a su formación.

Finalmente se utilizará el GPR, técnica geofísica de baja profundidad, que se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de corta duración hacia el interior del terreno, donde las ondas son parcialmente reflejadas al encontrar una diferencia de material o una discontinuidad en el subsuelo. El objetivo final es obtener radargramas, que son imágenes de subsuelo, similares a las de sísmica de reflexión, donde se pueda determinar el espesor total aproximado de los depósitos de lahares secundarios acumulados a lo largo del tiempo.

1.2.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El enfoque clásico de la evaluación del peligro por lahares consiste en la identificación del origen, el tamaño y la recurrencia temporal de los fenómenos, a partir de datos históricos y estratigráficos. La gran mayoría de estudios de peligro realizados en el Cotopaxi se han referido a lahares primarios (Aguilera et al., 2004; Mothes et al., 2004; Mothes et al., 2016) . El presente estudio del origen de los depósitos de lahares secundarios, en las quebradas Jatabamba y Pucarumi, en el volcán Cotopaxi, representará entonces el primer paso para una futura evaluación de su peligro potencial.

Además, el conocimiento de los procesos de construcción de abanicos, las unidades sedimentarias y la arquitectura interna de los abanicos generados por lahares es aún limitado, aunque estas áreas son frecuentemente pobladas y muy vulnerables durante las erupciones que generan lahares debido a su ubicación en la boca de los drenajes propensos a ser impactados por lahares. Esto puede deberse al hecho de que (i) las exposiciones sedimentarias son raras en ambientes de llanuras de inundación donde la incisión del canal es menos importante y la exposición se limita a los sedimentos depositados más recientemente; o (ii) los procedimientos de muestreo son difíciles debido a la induración avanzada de los depósitos de lahar o su grano grueso y mal sorteo (Ettinger et al., 2014).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento de los lahares secundarios en el flanco oriental del volcán Cotopaxi mediante la caracterización de sus depósitos, su origen y cartografía geológica, en las quebradas Jatabamba y Pucarumi.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener mapas de los depósitos de lahares secundarios mediante ortofotografías de las quebradas Jatabamba y Pucarumi, realizadas periódicamente con un dron a lo largo del tiempo. Los mapas se presentarán uno por uno para evidenciar cada uno de los lahares.
- Determinar las características granulométricas de los depósitos de lahares secundarios en las quebradas de Jatabamba y Pucarumi, en el flanco oriental del volcán Cotopaxi.

- Correlacionar los depósitos de lahares secundarios observados con datos pluviométricos proporcionados por el FONAG, a partir de mayo de 2018 hasta julio de 2019.
- Estimar el espesor total acumulado localmente por los depósitos de lahares secundarios, tanto en la quebrada Jatabamba como Pucarumi, mediante la técnica geofísica de GPR.

1.4 ALCANCE

Este estudio se realiza en base al análisis de los depósitos de lahares secundarios, observados en un período desde mayo de 2018 hasta julio de 2019, en las quebradas Jatabamba y Pucarumi, en el flanco oriental del Cotopaxi. Las ortofotografías tomadas con drone cuentan con una resolución de 10 cm para lograr un alto detalle en la cartografía a una escala 1: 2.000 para la Quebrada Jatabamba y 1: 1.500 para la Quebrada Pucarumi. El análisis granulométrico a través de un tamizaje en seco se realiza en un escala de tamaño de grano entre entre -5ϕ y 5ϕ . Los datos pluviométricos considerados se obtienen de la página oficial del FONAG y son utilizados con una frecuencia diaria durante todo el intervalo de tiempo de la toma de fotografías. Finalmente los datos obtenidos mediante el GPR son obtenidos de perfilajes planificados a lo largo de cada quebrada y posteriormente procesados para ser analizados.

CAPÍTULO 2: CONTEXTO TEÓRICO

2.1 MARCO GEODINÁMICO

El Ecuador forma parte de un margen convergente, donde la placa Nazca subduce hacia el este rápidamente la placa Sudamericana, con una velocidad de (~ 60 – 70 mm yr⁻¹) (Nocquet et al., 2014). La placa Nazca junto con la Cordillera de Carnegie, que es una larga cadena montañosa que representa el rastro que va dejando el hotspot de Galápagos, subducen en el norte de Ecuador (de 1 ° N a 2 ° S), provocando que el bloque Nor - Andino sea una región de intensa deformación a nivel de la corteza. Las tensiones tectónicas resultantes de esta colisión han producido conjuntos conjugados bien desarrollados de sistemas de fallas con tendencias NW y NE, hacia el Caribe y a lo largo de un sistema de fallas principales denominado Megafalla Dolores Guayaquil (Fig. 2. 1).

Es esta subducción la que hace posible la existencia de un volcanismo en el Ecuador. El Ecuador continental se divide en tres provincias: la Costa, el Oriente y la Sierra. Los Andes ecuatorianos representan un segmento de 650 km de largo y 150 km de ancho de la gran Cordillera Andina (Hall et al., 2008), que en el norte de Ecuador consta de dos cadenas de montañas paralelas, la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental o Real. Estas cordilleras se encuentran separadas por la depresión estructural conocida como el Valle Interandino, de 20-30 km de ancho y 300 km de largo. En los Andes centrales y hacia el sur el Valle Interandino desaparece, al sur de la latitud 2 ° 30 ' S (Hall et al., 2008), formando una única cordillera ancha sin un valle central dominante.

2.2 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTOPAXI

El volcán Cotopaxi (Lat. 0 ° 38'S; Long. 78 ° 26'W) está ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes ecuatorianos, 60 km al sur de Quito y 35 km al noreste de Latacunga, capital de la provincia de Cotopaxi. Este volcán activo de 5.897 m de altura destaca por su relieve (2.000-3.000 m), forma cónica, tamaño masivo (22 km de diámetro) y sus flancos escarpados cubiertos de glaciares. (Hall y Mothes, 2007).

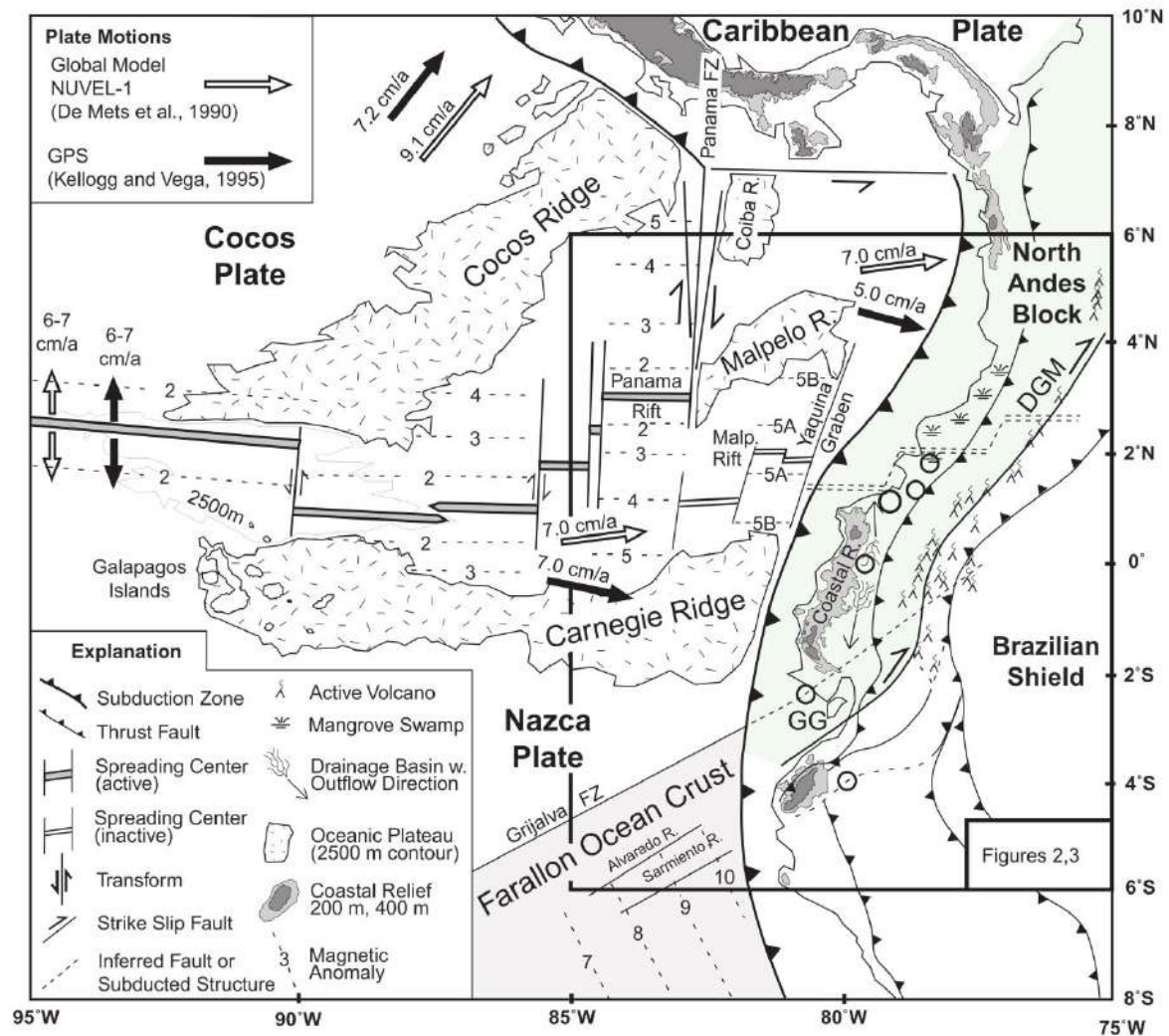


Fig. 2. 1 Configuración tectónica del área de estudio mostrando las fallas mayores, el movimiento relativo de placas con datos de GPS, modelo cinemático, anomalías magnéticas y volcanes activos. GG = Golfo de Guayaquil; DGM= Megafalla Dolores-Guayaquil. Tomado de (Gutscher et al., 1999).

Durante muchos años el volcán Cotopaxi fue considerado como un volcán andesítico, pero un volcanismo riolítico ha tenido un importante rol en su historia desde hace 560 ka y nuevamente durante el Holoceno, donde, la erupción secuencial de los magmas riolíticos (70–75% SiO₂) y andesíticos (56–62% SiO) del mismo ventos volcánico en períodos de tiempo cortos y sin mezcla significativa es característica de su comportamiento (Hall y Mothes, 2007).

Se lo considera uno de los volcanes más activos del Ecuador. Desde 1532 ha experimentado al menos 13 erupciones significantes, correspondientes a cinco ciclos: 1532 – 1534, 1742 –1744, 1766 –1768, 1853 –1854, and 1877– 1880. Todas ellas erupciones de carácter andesítico, que produjeron fenómenos volcánicos asociados como: flujos piroclásticos, flujos de lodo y escombros, caídas de ceniza, escoria y pómez y flujos de lava.

Según Hall y Mothes (2007), el desarrollo estructural y geológico del Cotopaxi puede resumirse de la siguiente forma:

Cotopaxi I

➤ Fase riolítica del Cotopaxi I

La serie riolítica Barrancas es el resultado de una prolongada actividad explosiva y efusiva con una afinidad riolítica del volcán, que ocurrió hace aproximadamente 420 – 560 ka. La parte más gruesa de esta serie se encuentran expuesta a lo largo de los flancos S y SO, observándose mejor a lo largo del valle Barrancas – Cimarrones. Está compuesta por flujos de ceniza riolítica, caídas de tefra, flujos de bloques de un espesor > a 150 m. En este tiempo el volcán estaba conformado por un grupo de domos de lava riolítica alineados sobre una fractura arqueada de ~ 8 km de largo (Hall y Mothes, 2007) interpretada como un antiguo borde de caldera que rodea los lados S y SO del actual edificio Cotopaxi.

➤ Fase andesítica del Cotopaxi I

El período posterior a la serie de Barrancas es un episodio erosivo de un espesor aproximado de 300 a 400 m de espesor. Las manifestaciones volcánicas ocasionales dieron como resultado capas intercaladas de ceniza, lavas de afinidad andesítica y brechas por colapso, además el paquete detrítico formó un amplio abanico deposicional centrado en el lado SO del actual cono volcánico.

El paquete detrítico contiene estratos masivos, pobremente estratificados que incluye bloques dentro de una matriz arenosa, muchos de ellos correspondientes a andesitas grises del cerro Morurcu. Al encontrarse intercalados en el paquete detrítico, se vincula la actividad de Morurcu con este período de erosión del Cotopaxi. Su edad se encuentra estratigráficamente definida entre la serie riolítica Barrancas (420–560 ka) y el flujo de cenizas de Chalupas (211 ka) (Hall y Mothes, 2007).

Unidades Cangahua y Chalupas

Posterior al período erosivo, los Andes ecuatorianos del norte fueron sometidos a la depositación de cangahua. La formación Cangahua está formada por una toba volcánica endurecida de grano fino, color café claro a habano, compuesta principalmente de ceniza volcánica retrabajada y loess glacial, con un espesor de 25 a 30 m (Hall y Mothes, 2007). En este período no fueron encontrados productos eruptivos del volcán Cotopaxi, lo que indica un cese de su actividad. La edad de esta formación en la parte superior puede ser de unos 20 ka, mientras que su base es más antigua que el flujo de Chalupas (211 ka), pero más joven que la serie de Barrancas.

El volcán Chalupas entró en actividad, interrumpiendo la depositación de la formación Cangahua y dando como resultado: la constitución de la Unidad Ignimbrita de Chalupas, que es un enorme depósito de decenas de metros de espesor de color gris claro hasta casi blanco y que contiene abundante ceniza y pómez fibrosa de color blanco o grisáceo y la formación de una caldera. El depósito es rastreable de norte y a sur a lo largo del Valle Interandino por decenas de kilómetros, su edad ha sido estimada en. 40 Ar / 39 Ar de 211 ± 14 ka (Hall y Mothes, 2007).

Cotopaxi II-A

Después de la depositación de las unidades Cangahua y Chalupas ocurrieron erupciones mayormente de origen riolítico, abarcando 8, 700 años de actividad eruptiva periódica, empezando débilmente hace aproximadamente 13,200 años AP y disminuyendo alrededor de 4,500 años AP. Durante esta época de actividad se registraron cinco episodios de erupción riolítica que involucraron caídas plinianas de distribución regional, numerosos flujos de cenizas y oleadas que viajaron > 40 km desde el cráter, flujos de colpaso de domo y flujos de escombros ricos en cenizas. La actividad riolítica fue seguida por un magmatismo andesítico generalizado, de menor tamaño las cuáles contribuyeron a la formación del edificio del Cotopaxi II-A (M. Hall y Mothes, 2007).

La última erupción riolítica, ocurrida hace 4,500 años AP desestabilizó el edificio volcánico provocando el colapso de su flanco NE, y como consecuencia se formó una gran avalancha de escombros de $2,1 \text{ km}^3$, la cual fue seguida de grandes flujos piroclásticos. La combinación de estos eventos junto con la mezcla con agua, producto de la fusión de un bloque de hielo, produjo un lahar de tamaño colosal, conocido como “Lahar del Valle de los Chillós”. Es considerado el lahar más grande que se haya formado en toda la historia del Cotopaxi, con un volumen aproximado de $3,8 \text{ km}^3$ (Mothes, Hall y Janda, 1998).

Cotopaxi II-B

La actividad del volcán Cotopaxi no ha cesado desde hace 4,500 años, ha experimentado erupciones volcánicas continuas y todas de carácter andesítico; con una sola excepción de una erupción de carácter riolítico hace 2, 100 años AP. A lo largo de este período de erupciones andesíticas se han producido al menos 18 ciclos eruptivos, lo que equivale a al menos 32 erupciones de tamaño moderado (VEI = 3) (Hall y Mothes, 2007). Cada ciclo caracterizado por un patrón de fenómenos eruptivos muy similares, casi todos acompañados por flujos piroclásticos, flujos de escombros, coladas de lava y caídas de tefra.

Período Histórico

Las culturas pre-hipánicas debieron ser testigos de varias erupciones del Cotopaxi, pero al no contar con registros escritos se han ido perdiendo con el tiempo. A partir de 1532, con la llegada de los españoles, se empieza a registrar los relatos de la historia de las erupciones del volcán Cotopaxi. Así, se sabe que durante los últimos 500 años el Cotopaxi ha tenido ciclos eruptivos con un promedio de una vez por siglo, los mismos que ocurrieron en: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855 y 1877-1880 (Andrade et al., 2005).

El siglo XX no fue testigo de ninguna erupción importante de este volcán, se han cumplido 143 años desde la última gran erupción, ocurrida el 26 de junio de 1877, donde se produjeron varios flujos piroclásticos que junto con el derretimiento del glaciar, desencadenó en la ocurrencia de lahares. El fenómeno ocasionó pérdidas de vidas humanas y materiales, según lo describió Luis Sodiro (1877).

2.3 LAHARES

Un lahar es una mezcla masiva, saturada en agua de rocas, arena, piedra pómez y agua, originado en un volcán, que fluye a grandes velocidades por acción de la gravedad. El tipo de material movilizado por estos flujos es muy variable pudiendo ser desde arcilla o arena hasta bloques de varios metros de diámetro (Vallance e Iverson, 2015) Una vez que han sido formados los lahares viajan a lo largo de los drenajes; que dependiendo del tiempo, la distancia que recorra y las interacciones tanto líquidas como sólidas, su comportamiento y volumen varía, provocando mayores o menores daños.

La génesis de un lahar requiere:

- Una fuente de agua adecuada.
- Abundantes escombros no consolidados, que típicamente incluyen flujos piroclásticos y depósitos de caída, depósitos glaciales, coluviales y suelo.
- Pendientes pronunciadas (comúnmente $> 25^\circ$).
- Un mecanismo desencadenante (Vallance e Iverson, 2015).

Las fuentes de agua necesarias para formar un lahar pueden ocurrir por cuatro medios principales: (1) avalanchas de roca caliente, flujos piroclásticos y oleadas que se mezclan y funden el hielo glaciar y la nieve rápidamente; (2) la ruptura de un lago

ubicado en el cráter; (3) erupciones subglaciales que forman lagos subglaciales; y (4) lluvias intensas, generalmente posteriores a los depósitos de una erupción.

La naturaleza de la fuente de agua influye en el volumen, la velocidad de descarga y las características de flujo del lahar.

2.3.1 CLASIFICACIÓN POR SU ORIGEN

Tomando en cuenta su origen, los lahares se dividen en dos tipos:

Lahares primarios: También llamados syn-eruptivos, ocurren durante una erupción volcánica (Fig. 2. 2). Este tipo de lahares son más destructivos y de mayor dimensión. Se forman por ejemplo cuando flujos piroclásticos, desbordados desde el cráter, provocan la fusión violenta de la nieve y el hielo en grandes sectores del casquete glaciar del volcán (Vallance e Iverson, 2015) Su alta velocidad y densidad les permite arrastrar objetos de un tamaño y peso significativos, como árboles, vehículos, etc. Un ejemplo de ello es la erupción en el Cotopaxi del 26 de junio de 1877, cuando los flujos piroclásticos derramados desde el cráter dieron lugar a la formación de enormes lahares (Fig. 2. 2).

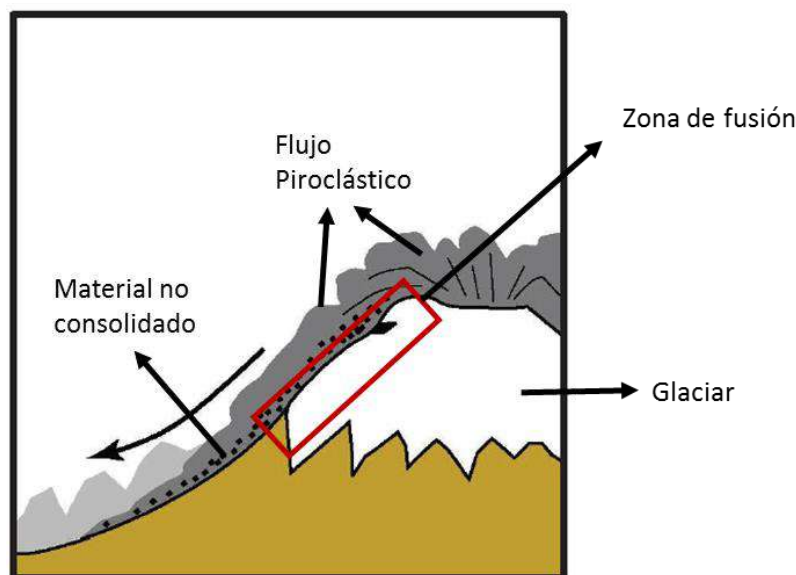


Fig. 2. 2 Esquema de la formación de un lahar primario durante una erupción lo suficientemente fuerte para producir fusión de la capa glaciar. Tomado de (Saltos, 2017).

Lahares secundarios: Son post-eruptivos o no relacionados con una erupción volcánica, su principal detonante son las lluvias intensas (Fig. 2. 3). Son de menor magnitud, con un alcance más limitado tanto lateral como longitudinalmente, pero son

mucho más comunes que los primarios. Se forman cuando las cenizas y piroclastos depositados por la erupción son removilizados por fuerte lluvias ocurridas en el volcán (Andrade et al., 2005).

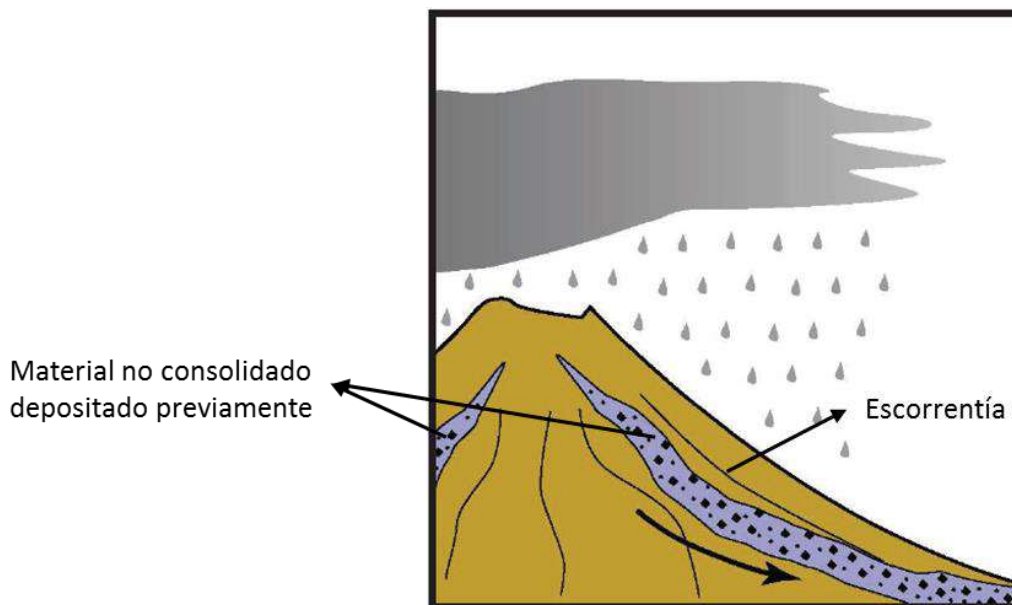


Fig. 2. 3 Esquema de la formación de un lahar secundario durante un período de lluvias intensas, cuando estas removilizan el material piroclástico suelto depositado previamente. Tomado de (Saltos, 2017).

Un ejemplo de ello es el lahar secundario ocurrido el 4 de abril de 2019 en la Quebrada Agualongo en el volcán Cotopaxi, causado por una fuerte precipitación. Por la gran dimensión del lahar este se desbordó sobre la carretera, obstaculizando la vía del ingreso norte al Parque Nacional Cotopaxi (Fig. 2. 4).



Fig. 2. 4 Lahar secundario, Quebrada Agualongo, acceso vehicular norte al Parque Nacional Cotopaxi. Lahar causado por las intensas lluvias de la época. Fotografía tomada el 4 de abril de 2019.

2.3.2 CLASIFICACIÓN POR LA COMPOSICIÓN

Los lahares se agrupan en dos categorías reológicas principales que son en parte dependientes de su granulometría: flujos de escombros (debris flows) o flujos hiperconcentrados (hyperconcentrated streamflows).

Flujos de escombros (Debris flows): Se los identifica como un flujo de fluido viscoso, ya que generalmente parece fluir como el concreto húmedo y es capaz de mantener la grava en suspensión a bajas velocidades mientras se mantenga estacionaria (Pierson, 2005). Estos flujos tienen un contenido > 60% vol. de sedimentos (Ettinger, 2014). Los depósitos de flujo de escombros son predominantemente matriz soportados, masivos y muy mal sorteados (Smith, 1986). Tienen un límite elástico muy alto y se comportan como una sola fase. (Cronin et al., 1997) (Fig. 2. 5A). Sus características son las siguientes:

- Van de muy mal sorteados a extremadamente mal sorteados (más de 2 unidades de phi).
- Las distribuciones del tamaño de grano son comúnmente bimodales.
- Los depósitos son extremadamente compactos.
- Las partículas encontradas dentro de los flujos de escombros pueden ser monolitológicos, pero con mayor frecuencia son heterolitológicos.
- Las partículas primarias son generalmente subangulares a angulares.
- Los depósitos comúnmente exhiben vesículas en la matriz, que resultan del atrapamiento de burbujas de aire.
- Otros constituyentes comunes incluyen fragmentos de madera, moldes de fragmentos de madera y carbón.
- Los espesores de los depósitos varían desde decenas de centímetros hasta decenas de metros (Vallance e Iverson, 2015).
- La viscosidad del fluido disminuye a medida que incrementa la velocidad. (Jones, 2016)
- La velocidad del fluido alcanza su punto máximo a 15 – 30 km/h (Jones, 2016).

Flujos hiperconcentrados (Hyperconcentrated streamflows): Estos flujos tienen concentraciones de sedimentos < 60% vol. Sin embargo, la variación del tamaño de partícula del sedimento dentro de un flujo influye notablemente en el carácter del flujo, definiendo estos valores como sólo una guía. Pierson y Costa en 1987 definieron el flujo hiperconcentrado como una "mezcla fluída de agua y

sedimento que posee una resistencia medible pero que todavía parece fluir como un líquido" (Vallance e Iverson, 2015) (Fig. 2. 5C). Sus características son las siguientes:

- Los sedimentos son soportados dentro de estos flujos predominantemente por interacciones clasto-clasto, turbulencia y flotabilidad (Cronin et al., 1997).
- Son típicamente más erosivos que los flujos ricos en sedimentos por su turbulencia característica.
- Tienen características intermedias entre el flujo de escombros y los depósitos aluviales. Por lo tanto, tienen coeficientes de sorteo intermedios (unidades phi 1-2) y tamaños de grano.
- Sus depósitos pueden ser masivos aunque comúnmente tienen una estratificación débil definida por capas horizontales delgadas y juegos de capas transversales de ángulo muy bajo compuestos por láminas de grano fino y capas de grano más grueso más espesas.
- A veces se encuentran vesículas, pero menos evidentes que en los depósitos de flujo de escombros.
- Los depósitos son compactos.
- Pueden estar presentes características de deshidratación.
- Los depósitos de flujo hiperconcentrado tienen topes planos y pueden variar en grosor desde unos pocos centímetros hasta varios metros. Los topes del flujo tienen granos grandes dispersos, especialmente piedra pómez si está presente; también tienen comúnmente capas delgadas de arena fina y limo que se forman durante la compactación y la deshidratación (Vallance e Iverson, 2015).

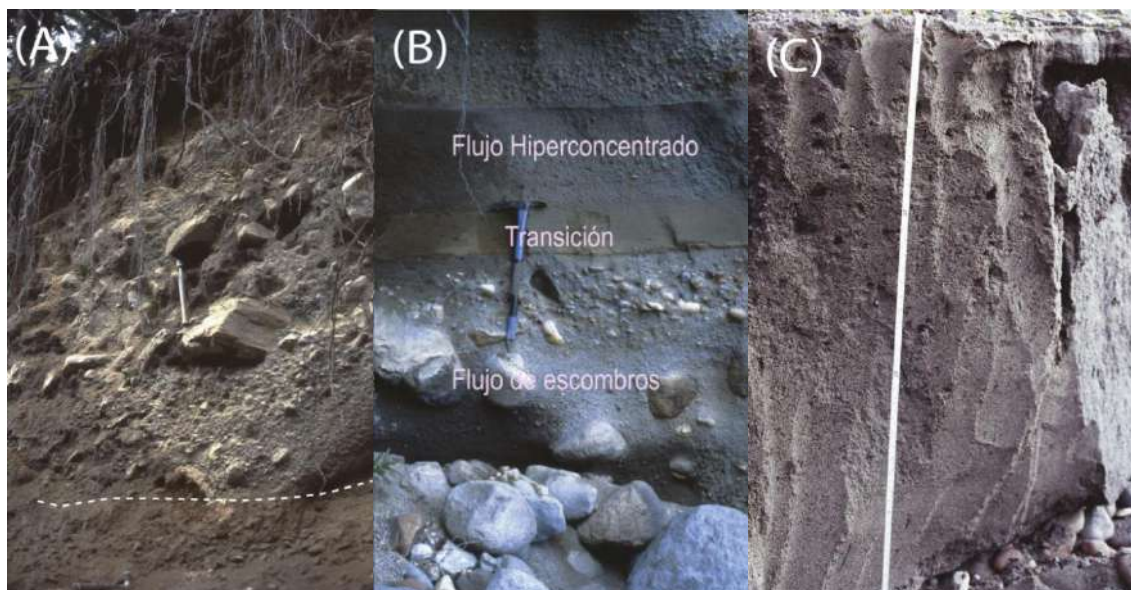


Fig. 2. 5 (A) Flujo de escombros (*debris flow*) pobre en arcilla en el Mount Adams, EE. UU. Inversamente gradado en su base, y sin gradación y masivo en su parte superior (la línea discontinua indica la base del depósito; la pala tiene una longitud de 50 cm). (B) Depósitos transicionales de *debris flow* a flujo hiperconcentrado en Mount Rainier, EE. UU. La unidad basal contiene cobbles y boulders flotantes, y redondeados, probablemente refleja la deposición de un flujo hiperconcentrado en un canal. (C) Depósito de flujo hiperconcentrado inversamente gradado en los dos tercios más bajos del afloramiento y normalmente gradado en el tercio superior, en Mount St Helens en 1982. El depósito comprende limo, arena, y pequeños pebbles con un solo modo de arena gruesa y gránulos. El depósito es de aproximadamente 1 m de espesor. Editado de (Vallance e Iverson, 2015).

La siguiente tabla resume las principales características de cada uno de los depósitos
Tabla 2. 1:

Características del flujo	Debris flow	Flujo hiperconcentrado
1. Tipo de flujo	Laminar en el momento de la deposición, pero puede ser turbulento en pendientes pronunciadas.	En parte turbulento en todo momento; sin embargo, la alta carga de sedimentos humedece los pequeños remolinos.
2. Mecanismo(s) de soporte de sedimentos	Resistencia de la matriz, presión de dispersión de grano, flotabilidad.	Turbulencia, presión de dispersión de grano, flotabilidad.
Características de los depósitos	Debris flow	Flujo hiperconcentrado
1. Modo de depositación	En masa.	Agradación rápida grano por grano de suspensión y tracción.
2. Estratificación	Ninguna dentro de unidades deposicionales.	Ninguna o estratificación horizontal; ninguna estratificación cruzada.
3. Gradación	Ninguna, inversa	Con frecuencia, aunque no siempre, distribución gradada normal.
4. Relación de los clastos	Matriz soportada, raramente clasto soportada.	Clasto soportada con un sorteo pobre, matriz polimodal.
5. Orientación, imbricación	Variable, basada en la ubicación dentro del flujo, paralela al flujo es el más prominente; imbricación menor.	Cobbles (64–256 mm) a boulders (>256 mm), generalmente perpendicular al flujo. Pebbles (4–64 mm) a pequeños cobbles, generalmente paralelo al flujo. Mala imbricación.

Tabla 2. 1 Características de los tipos de lahares de acuerdo a su composición. Editado de (Smith, 1986).

Comportamiento del Flujo:

Las interacciones líquido-sólido de los diversos tipos de lahares son muy variables debido a procesos erosivos y deposicionales que incluyen: bulking (el aumento del volumen de flujo por erosión y arrastre de material), debulking (pérdida de volumen por deposición selectiva), dilución (el aumento del volumen de flujo por interacción con una fuente de agua) (Fig. 2. 6) e infiltración (la pérdida de líquido en sustratos permeables) (Doyle et al., 2011; Fagents y Baloga, 2006).

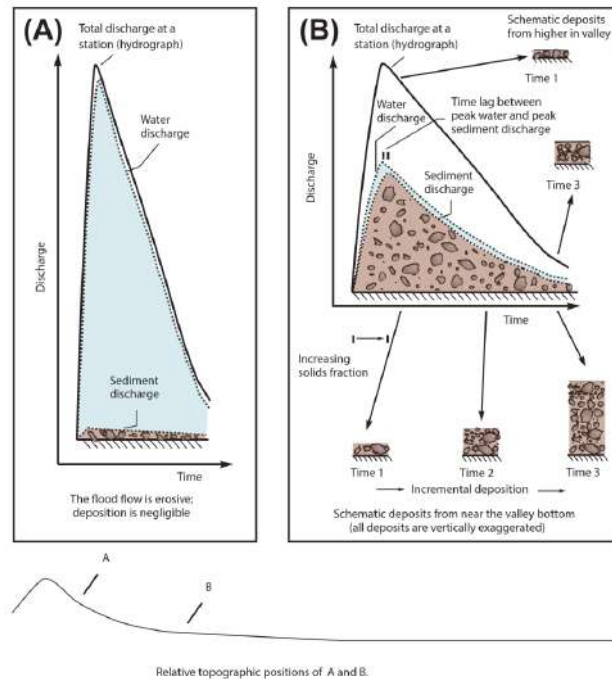


Fig. 2. 6 Hidrogramas esquemáticos que muestran cómo se inician y se comportan los lahares que comienzan como flujos de inundación a medida que se someten a dilución aguas abajo. (A) Flujo de inundación (flood flow); (B) Flujo de escombros (debris flow). Editado de (Vallance e Iverson, 2015)

Las inundaciones de agua se mueven a través del sedimento suelto, incorporando fácilmente escombros y formando rápidamente lahares (Fig. 2. 6A,B). Esta erosión de material con la posterior adición de sedimento es el proceso denominado *bulking*, que es la incorporación de residuos sólidos, provocando un aumento de la masa y la concentración de sedimento del lahar. Este descenso progresivo provoca cambios posteriores en lahares, transforma los flujos de inundación y los flujos hiperconcentrados en flujos de escombros más ricos en sedimentos (Vallance e Iverson, 2015). Si el proceso continúa, las etapas de flujo creciente y decreciente finalmente se convierten en flujos de escombros (Fig. 2. 6B) cuya composición se vuelve más rica en sedimentos exóticos, de tipo aluviales, coluviales y glaciares.

Dentro de un flujo con una concentración de fracción sólida normal, los granos más grandes tienden a acumularse en la capa más baja del flujo en movimiento y los más pequeños progresivamente hacia el tope. Sin embargo, en el caso de este tipo de flujos que tiene una mayor fracción de sólidos, los contactos grano a grano minimizan la acción gravitacional, lo que favorece el levantamiento preferencial de las partículas más grandes, incluso las más densas. Las partículas más grandes pueden ser empujadas progresivamente hacia arriba por las rotaciones de las partículas dentro del flujo y fuerzas que no están en equilibrio. En cambio, las partículas más pequeñas rellenarán los espacios entre las más grandes y no ascenderán (Vallance e Iverson, 2015).

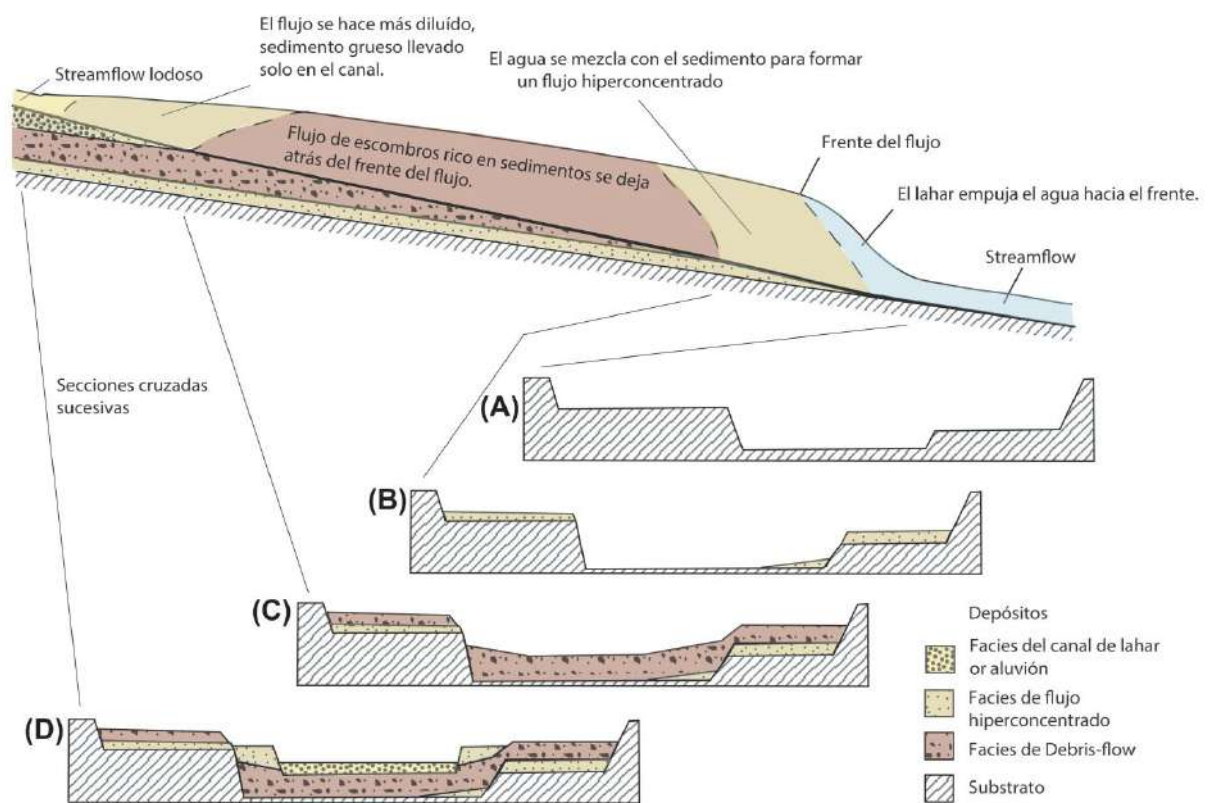


Fig. 2. 7 Esquema de un lahar en transición aguas abajo, de la fase de flujo de escombros a flujo hiperconcentrado y depósitos de facies. Muestra las secuencias esperadas de depósitos hiperconcentrados y de flujos de escombros en sección transversal (A-D). Editado de (Vallance e Iverson, 2015).

A medida que el lahar se mueve aguas abajo cambia su comportamiento (Fig. 2. 7). Las inundaciones ocurridas cerca de un volcán, en las partes proximales, pueden acumular sedimento suficiente como para formar flujos de escombros o flujos hiperconcentrados. Por otro lado en las partes medias a distales el comportamiento es distinto, los lahares empujan el agua por encima de ellos, de modo que los flujos de escombros ricos en sedimentos se retrasen de los flujos hiperconcentrados ricos en

agua, denominados como los más erosivos. Los lahares erosionan e incorporan sedimentos que provienen de residuos secundarios de la base o los márgenes del flujo, especialmente de material de pendientes pronunciadas, escarpes fluviales de terrazas y bancos de arroyos activos (Fig. 2. 7).

Igualmente, puede perder rápidamente su fracción sólida mediante procesos de segregación, dilución o deposición, los cuales descargan o depositan material de manera selectiva (Fagents y Baloga, 2006; Mothes y Vallance, 2015; Vallance e Iverson, 2015).

2.4 ABANICOS ALUVIALES

Los lahares syn y post-eruptivos desempeñan un papel dominante en la evolución de las tierras bajas adyacentes de los volcanes y representan los procesos erosivos que actúan sobre los edificios volcánicos. Además, parecen tener una fuerte influencia en la morfología y la arquitectura sedimentaria de los abanicos aluviales (Graettinger et al., 2010; Pierson et al., 1990; Procter et al., 2010).

Los abanicos aluviales son componentes del paisaje complejos y sensibles que responden a una serie de factores, incluyendo, tectónica, clima, terremotos y la magnitud y frecuencia de los procesos formativos, en particular los flujos de escombros y flujos de inundación (Volker et al., 2007). Por ejemplo el abanico de Whangaehu, ubicado en Nueva Zelanda, en una división de captación (Fig. 2. 8), la topografía en el vértice del abanico determina si los eventos de flujos drenando hacia el flanco este del monte Ruapehu se canalizan hacia el sur, hacia el río Whangaehu, o hacia el norte, hacia la cuenca de Tongariro, con una estrecha división entre los dos. Lahares frecuentes en el río Whangaehu durante los últimos 20,000 años resultan del drenaje directo del Lago Crater (a 2540 m) (Procter et al., 2010) y se han ido acumulando de manera que han conformado un gran abanico aluvial.

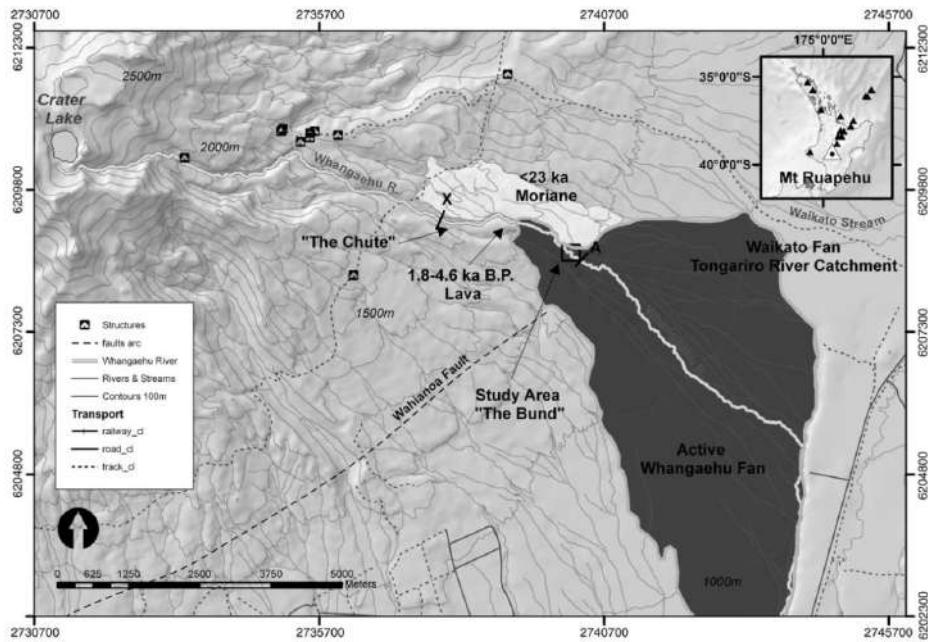


Fig. 2. 8 Mapa de ubicación de Mt. Ruapehu, Isla Norte, Nueva Zelanda. Arriba a la derecha, Volcán Ruapehu. Abajo, el río Whangaehu con el abanico de Whangaehu destacado. El recuadro y la línea A indican el área de estudio a través del canal activo actual del río Whangaehu y la estructura de deshielo de lahar. La línea (X) indica el punto donde los lahares pueden bifurcarse e ingresar al canal normalmente inactivo denominado "The Chute". Tomado de (Procter et al., 2010).

Otro ejemplo son los abanicos aluviales en la cuenca Basin and Range (Valle de la muerte, California – E.E.U.U.) Volker (2007), ampliamente reconocidos como abanicos dominados por flujos de escombros (DF), dominados por lluvias o como una mezcla de flujos de escombros y flujos de corrientes efímeros (abanicos denominados por flujos mixtos (MF), en gran parte por causa de sus características sedimentarias.

✓ **Topografía y sedimentología características en abanicos aluviales dominados por flujos de escombros:**

Como los flujos de escombros normalmente tienen cargas de sedimento más gruesas, dejan topografías como: canales largos y a menudo sinuosos, bordeados por levés prominentes (Fig. 2. 9a). Las distinciones sedimentológicas se basaron en gran medida en la imbricación de partículas y los clastos matriz soportados (Volker et al., 2007).

✓ **Topografía y sedimentología características en abanicos aluviales dominados por lluvias:**

Las superficies de flujo cargadas de sedimentos más húmedos se caracterizan por: bancos de canales rectilíneos, terrazas, interfluvios, islas, que en general, interfluyen

más suaves y planos (probablemente como resultado de procesos secundarios). Las distinciones sedimentológicas muestran una mayor proporción de sedimentos finos hacia arriba y bien ordenados (Volker et al., 2007) (Fig. 2. 9b). Este tipo se parece mucho a los depósitos encontrados en la zona de estudio.

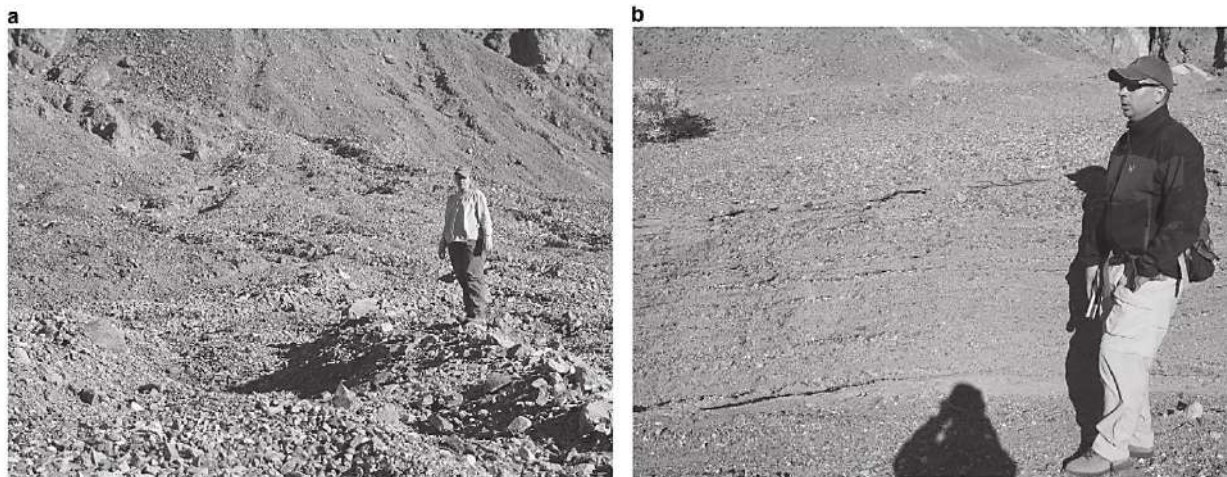


Fig. 2. 9 Vista detallada de algunas de las características de la superficie y las unidades estratigráficas del abanico dominado por flujos de escombros (DF) (a) y dominados por lluvias o conocido como un abanico de flujos mixto (mezcla entre flujos de escombros y flujos de corrientes efímeros (MF) (b). Tomado de (Volker et al., 2007).

2.5 FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA GPR (GROUND PENETRATING RADAR)

2.5.1 INTRODUCCIÓN

El GPR, también conocido como Radar Geológico, Radar de Penetración de Suelo o Georadar, es una técnica geofísica de baja profundidad relativamente joven. Se lo considera un método moderno de propección no invasiva ni destructiva. El radar de penetración de suelo utiliza ondas de radar, (ondas electromagnéticas), para sondear el subsuelo de materiales dieléctricos con pérdida, con el fin de detectar estructuras y cambios en las propiedades de los materiales (Annan, 2005). Sus primeros usos aparecieron en la década de 1960 con el sonido de eco de radio de los glaciares y las capas de hielo (Bailey et al., 1964), seguido de un análisis de permafrost (Annan y Davis, 1976).

Se emplean mediciones de reflexión y tranmisión (Fig. 2. 10) y la mayoría de las aplicaciones hasta la fecha han sido en materiales geológicos naturales. Con el GPR, los campos electromagnéticos se propagan como ondas esencialmente no dispersivas. La señal emitida viaja a través del material, posteriormente es dispersada

y / o reflejada por cambios en la impedancia, dando lugar a eventos que parecen similares a la señal emitida. El reconocimiento de la señal es simple porque la señal de retorno "se parece" a la señal emitida, tanto como en la reflexión sísmica (Annan, 2005).

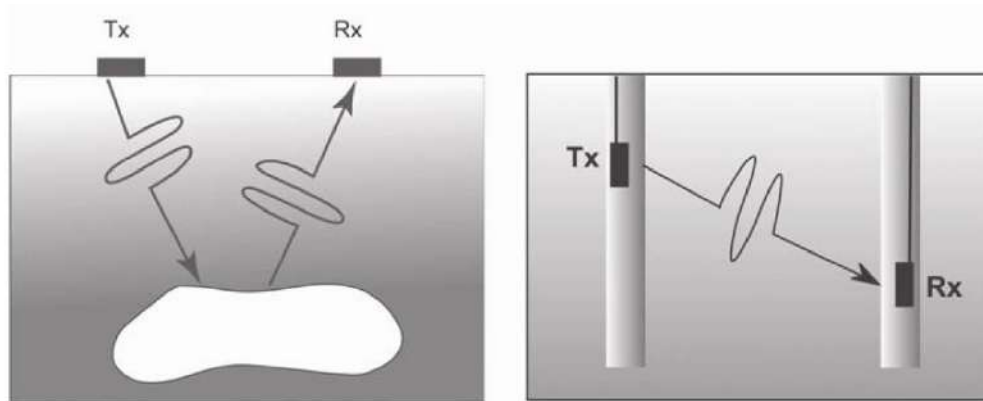


Fig. 2. 10 El GPR utiliza ondas de radio para sondear el subsuelo de materiales dieléctricos con pérdida, existen dos modos de medición: en la primera se detecta energía reflejada o dispersada, en la segunda se observan efectos sobre la energía transmitida a través del material (Annan, 2005).

La prospección del GPR esta basada en la emisión de pulsos electromagnéticos de corta duración (1 – 20 ns), caracterizado por una frecuencia nominal regulable entre 10 MHz y los 2,5 GHz, en función de la antena utilizada (Biskup, 2005). El objetivo final es obtener pseudo imágenes que se aproximan a una sección transversal del subsuelo bajo la línea de desplamiento de las antenas, conocidos como radargramas (Fig. 2. 11).

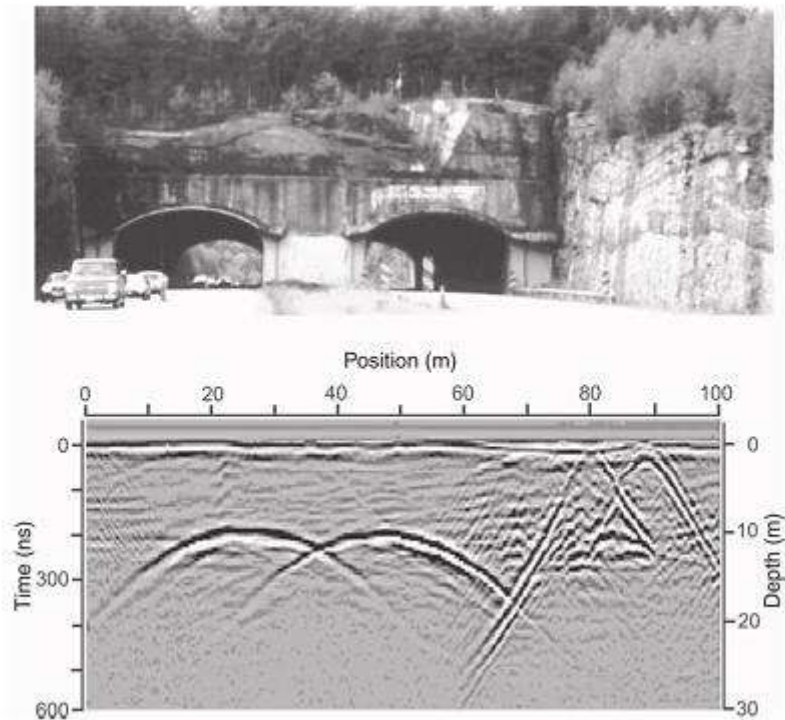


Fig. 2. 11 Ejemplo de una sección transversal GPR obtenida con un sistema de 50 MHz atravesado en dos túneles de carretera (Annan, 2005).

2.5.2 PRINCIPIO OPERATIVO

El radar de penetración en el suelo (GPR) se usa en investigaciones geológicas para definir contactos litológicos, planos de fallas, en estudios de suelos, en glaciología y para estimar la profundidad del agua subterránea (Ortiz et al., 2010) y se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos.

El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos hacia el interior del terreno (Fig. 2. 12). Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie a través de una antena receptora. Al ir desplazando el sistema sobre la superficie del terreno será posible registrar la historia de reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo. De esta forma se obtienen radargramas, similares a los registros de sísmica de reflexión, pero con la diferencia de que, en el caso del radar, la propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación.



Fig. 2. 12 Equipo GPR en la Quebrada Pucarumi. En ella se pueden observar las partes del equipo como: mochila, las antenas, la pantalla y el equipo de control que se encuentra dentro de la maleta.

De esta forma, el eje de abscisas de los radargramas, o registros de geo-radar, representará el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo éste, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta. Para el funcionamiento del GPR, se deben considerar al menos tres parámetros:

Conductividad eléctrica (σ): describe cómo fluyen las cargas libres para formar una corriente cuando hay un campo eléctrico presente.

Permitividad dieléctrica (ϵ): describe cómo se desplazan las cargas restringidas en respuesta a un campo eléctrico.

Permeabilidad magnética (μ): describe cómo los momentos magnéticos moleculares y atómicos intrínsecos responden a un campo magnético.

La comprensión de las respuestas GPR y su relación con las propiedades electromagnéticas es un tema de la comprensión de las propiedades de las mezclas de materiales. La complejidad de este análisis depende no solo del material del que esta compuesto, sino también de aspectos como la densidad del suelo, que determinará el espacio poroso disponible; y el grado de saturación de agua. La Tabla 2. 2 resume la permitividad y la conductividad para algunos materiales comunes

encontrados con GPR (típicamente en el rango de frecuencia de 10 a 1000 MHz) (Annan, 2005).

Material	Permitividad Dieléctrica (ϵ)	Conductividad Eléctrica (σ) (ms/m)	Velocidad (v) (m/ns)	Atenuación(α) (dB/m)
Aire	1	0	0.30	0
Agua destilada	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Agua fresca	80	0.5	0.033	0.1
Agua salada	80	3000	0.01	103
Arena seca	3-5	0.01	0.15	0.01
Arena saturada	20-30	1-10	0.06	0.03-0.3
Caliza	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Lutita	5-15	1-100	0.09	1-100
Limo	5-30	1-100	0.07	1-100
Arcillas	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sal seca	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Hielo	3-4	0.01	0.16	0.01

Tabla 2. 2 La permitividad relativa típica, la conductividad eléctrica, la velocidad y la atenuación observada en materiales geológicos comunes.

La atenuación de la señal, que causa una disminución en la penetración de las ondas electromagnéticas es directamente proporcional a la conductividad del suelo, es decir en suelos arcillosos y saturados con sales y agua que son altamente conductivos habrá una menor penetración de las ondas. Además a mayor constante dieléctrica (mayor contenido de agua), se observa también menor capacidad de propagación de las ondas electromagnéticas. La calidad de datos depende también de las antenas no blindadas (mejor penetración de profundidad) MALÁ GPR que brindan una amplia variedad de frecuencias para diferentes propósitos de investigación. Las antenas y las áreas de uso adecuadas se enumeran a continuación, junto con penetraciones de profundidad aproximadas (Tabla 2. 3) (Geoscience, 2011).

Frecuencia	Áreas de uso adecuadas
25 MHz	Hecho para las profundidades de penetración más profundas posibles. Comúnmente utilizado para estudios geológicos y estratigráficos en terrenos abiertos.
50 MHz	Diseñado para medidas moderadas a profundas. Comúnmente se utiliza en aplicaciones geológicas y geotécnicas, como mapeo superficial de roca madre y de aguas subterráneas.
100 MHz	Una antena de uso general con buena penetración y resolución justa. El rango de aplicación es amplio; se utiliza para ríos, vertederos, mapeo de fondo de lago y detección de tuberías profundas y roca madre.

200 MHz	Dar una profundidad de penetración de rango medio con buena resolución. Su rango de aplicación es amplio. Se utiliza para la detección de utilidad, detección de roca madre y cavidad. La compacidad de la antena facilita las inspecciones en terrenos más vegetados.
----------------	--

Tabla 2. 3 Antenas sin blindaje y áreas de uso adecuadas. (Geoscience, 2011).

2.5.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES

Ventajas:

- El GPR genera una imagen del subsuelo que supera en resolución a cualquier otro método de prospección, permitiendo tanto la identificación de elementos singulares como la caracterización del entorno.
- Es un método no destructivo y no invasivo, por lo que no produce ningún efecto secundario sobre el medio estudiado.
- Los equipos han sido diseñados para ser ligeros y poder ser manejados por 1-2 personas.
- Es una técnica rápida en su ejecución y aplicable en la mayoría de situaciones (p.e. lluvia), destacando en especial su aplicabilidad en entornos urbanos.
- Destaca la posibilidad de interpretación en tiempo real, pues los radargramas se generan a la vez que se adquieren los datos, lo que permite aportar información instantánea sobre el propio terreno. (Biskup, 2005)

Limitaciones:

- El principal condicionante del GPR se refiere a su penetración limitada en el subsuelo. Los equipos han sido diseñados para ser ligeros, lo que implica una reducción del tamaño de las fuentes de alimentación y genera una potencia limitada en cuanto al impulso emitido y, por lo tanto, en su penetración en el medio.
- La naturaleza del suelo juega un factor decisivo, en los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método.
- El método presenta cierta dependencia de las condiciones superficiales, que pueden llegar a provocar interpretaciones erróneas. Esto suele suceder cuando el contacto entre las antenas y el suelo no es el idóneo, o cuando en la

superficie estén presentes elementos metálicos que enmascaran parcialmente las reflexiones del subsuelo (p.e. las armaduras en un forjado de hormigón).

- Otros factores que pueden originar distorsiones y/o interpretaciones erróneas se relacionan con la presencia cercana de fuentes emisoras de campos electromagnéticos intensos (líneas de alta tensión) y el empleo de teléfonos móviles o, especialmente, radiocomunicadores tipo walkietalkie por parte de los operarios.
- Su principal inconveniente es su empleo inadecuado. El uso sin el conocimiento adecuado de sus capacidades impide el aprovechamiento óptimo de sus ventajas y puede llevar a incurrir en errores que perjudican el prestigio de la técnica al presentar resultados no acordes con el alcance real de la técnica. (Biskup, 2005)

2.6 FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES

Términos importantes:

- ✓ **Drone:** es un vehículo aéreo que vuela sin tripulación. Su nombre original en idioma inglés es: UAV “Unmanned Aerial Vehicle” (Vehículo aéreo no tripulado) o UAS “Unmanned Aerial System” (Sistema aéreo no tripulado).
- ✓ **Fotogrametría:** Técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.
- ✓ **Ortofotografía:** un producto cartográfico georreferenciado y corregido de éstas deformaciones, en la que se pasa de la representación en perspectiva cónica del territorio a una perspectiva ortogonal. El objetivo es producir una imagen precisa de la superficie terrestre y ecularizar las distancias representadas en la imagen, es decir se puede medir a escala, tanto distancias como superficies.

2.6.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La tecnología fotogramétrica Structure from Motion (SfM) o Método de estructura desde el movimiento es una técnica que permite la medición de datos topográficos, particularmente aquellas que incluyen el monitoreo de la forma del terreno y la investigación de cambios en la topografía. Es una alternativa que ofrece la posibilidad de una adquisición rápida, automatizada, con una supervisión reducida del usuario y de bajo costo de datos tridimensionales, Micheletti (2015). Structure from Motion debe su existencia a un modelo matemático donde es estudiada la condición de coplanaridad y

de esta manera se establece la relación espacial entre imágenes para la triangulación aérea numérica y el mapeo de la fotografía aérea (Thompson, 1965).

La fotogrametría SfM brinda la capacidad de extraer datos espaciales precisos y de alta resolución empleando imágenes superpuestas adquiridas desde múltiples puntos de vista (Fig. 2. 13), para ello, es fundamental adquirir imágenes de tantas posiciones espaciales diferentes como sea posible. El amplio rango de direcciones de la imagen crea un conjunto de datos con una geometría fuerte, importante para recuperar tanto los modelos internos de la cámara como las coordenadas precisas (Micheletti et al., 2015) y de esta manera, mediante un procesamiento de datos lograr obtener ortofotografías, DEM, etc.

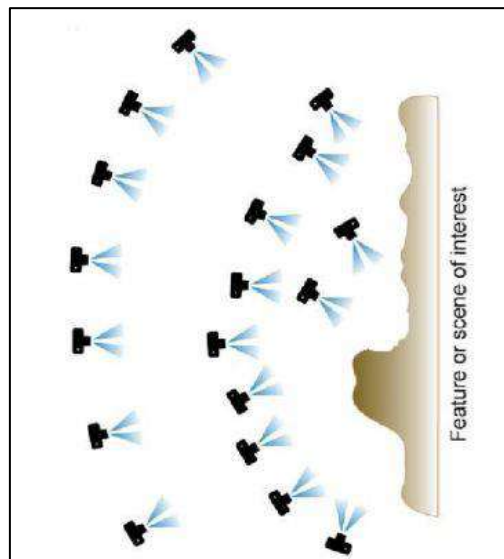


Fig. 2. 13 Ejemplo de adquisición de imágenes. La estructura de la fotogrametría de movimiento requiere múltiples fotografías con una gran superposición recopilada desde diferentes posiciones y direcciones. Tomada de (Micheletti et al., 2015).

2.6.2 VENTAJAS

- La fotografía aérea es una alternativa para medición y procesamiento mucho más económica en tiempo y costo.
- Puede crear modelos digitales de elevación, mosaicos ortorectificados y georreferenciados además de nubes de puntos de alta resolución, modelos en 3D con precisión centimétrica que permiten el cálculo de curvas de nivel, medición de áreas y volúmenes y diversos productos que muestran la apariencia real del terreno.
- La utilización de drones permite además, realizar tareas a baja altura, grabando en tiempo real y facilitando el relevamiento de zonas peligrosas o de

difícil acceso y superar obstáculos diversos, de forma automatizada y sin poner en riesgo la seguridad personal. En la actualidad existen con una gran variedad de formas, tamaños y características en función del uso al que estén destinados (Ferreira & Aira, 2017).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 GRANULOMETRÍA

3.1.1 GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO MANUAL

Para la caracterización granulométrica de los depósitos de lahares secundarios en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi se tomaron 3 muestras de depósitos en cada una de ellas (Fig. 3. 1).



Fig. 3. 1 Toma de muestra de lahar secundario en Q. Jatabamba.

El primer paso es pesar las muestras de campo en una balanza de una precisión de 10^{-2} g y luego colocarlas en un recipiente para ser secadas. El secado de la muestra se realizará mediante un horno aproximadamente durante 2 días a una temperatura de 40°C , hasta que se logre constatar cada cierto tiempo que el peso de la muestra empieza a ser constante en consecuencia de que todo el contenido de agua ya ha sido evaporado. Una vez seca la muestra se procede al tamizaje. El ensayo consiste en hacer pasar la muestra de sedimento de aproximadamente 1 kg de peso, por una columna de tamices ordenados de forma ascendente (hacia el techo la de mayor diámetro y hacia la base la de menor diámetro); estando en el pie de la columna un plato de fondo que recoge todas las partículas de menor tamaño. La medida de la abertura de los espacios en los tamices es la que los diferencia. Esta medida viene dada en una escala en mm o en Phi (φ). Para este estudio la columna consta de tamices entre -5φ a 5φ , como se detalla en la (Tabla 3. 1).

Diámetro (mm)	Phi (ϕ)
31,5	-5
16	-4
8	-3
4	-2
2	-1
1	0
0,5	1
0,25	2
0,125	3
0,063	4
Fondo	5

Tabla 3. 1 Diámetro de aberturas de los tamices utilizados en mm y Phi.

3.1.1.1 PROCEDIMIENTO PARA EL TAMIZADO MANUAL

- A. Previamente al armado del arreglo de los tamices, se debe limpiar cada uno de ellos con alcohol y papel de cocina para evitar la contaminación con estudios anteriores. Posterior a esto, se pesa cada uno de los tamices vacíos porque al pesar el tamiz con el material ya tamizado, se debe conocer el peso real de la muestra restando el peso del tamiz del peso del tamiz más la muestra tamizada (Fig. 3. 2A).
- B. El segundo paso es conformar la columna de tamices en orden ascendente y preparar la superficie para iniciar el tamizado (Fig. 3. 2B).
- C. Se procede a vaciar la muestra seca desde la parte más alta de la columna y mediante movimientos de vibración realizados manualmente se empieza el proceso de tamizado en seco hasta que ninguno de los tamices deje pasar más partículas por sus orificios. Una vez culminado el tamizaje, se pesa el tamiz más la cantidad de muestra tamizada que se quedó en él. Restando el peso del tamiz lleno menos el tamiz vacío, que fue medido inicialmente, se conoce el porcentaje en peso real de material en cada una de las fracciones (Fig. 3. 2C).
- D. Finalmente almacenar el material y etiquetarlo cuidadosamente en distintas fundas de acuerdo al tamaño del tamiz utilizado para emplearlo en la descripción de componentes bajo binocular. (Fig. 3. 2D).

Los resultados son presentados en una gráfica, en el eje de las abcisas se representa el diámetro de las partículas en una escala de phi, y en el eje de las ordenadas se representa el porcentaje en peso.

Los porcentajes en peso obtenidos en cada tamiz se pueden visualizar en el software geológico SFT (Sequential Fragmentation Transport) que proporciona además

parámetros estadísticos gráficos. Estos parámetros son calculados mediante las fórmulas obtenidas del trabajo de Inman (1951) y Folk y Ward (1957). Estos parámetros son: curtosis, asimetría y sorteo (desviación estándar), diámetro medio de la muestra analizada, media, etc; que pueden ser visualizados dando un click en el botón de “Log Normal Statistics” (Fig. 3. 4).



Fig. 3. 2 Pasos para realizar el tamizaje manual en seco. A Limpieza de los tamices. B Establecimiento de la columna de tamices entre -5 y 5 Phi. C Introducción de la muestra de lahar en la columna de tamices y posterior tamizado. D Colocación en fundas y pesaje de cada una.

3.1.1.2 PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE DATOS EN SFT

Se realiza una tabla de datos (Tabla 3. 2) donde se presenta el peso real de cada fracción y así se pueda producir los porcentajes en peso requeridos para ingresar en el software SFT.

JATA_MUESTREO_01					
Peso inicial muestra seca=		1346,76			
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz+muestra (g)	peso muestra (g)	%W
31,5	-5,0	451,24	468,65	17,41	1,331
16	-4,0	447,27	488,78	41,51	3,175
8	-3,0	407,39	450,87	43,48	3,325
4	-2,0	375,77	412,68	36,91	2,823
2	-1,0	344,66	417,88	73,22	5,600
1	0,0	315,39	449,73	134,34	10,274
0,5	1,0	316,84	483,41	166,57	12,739
0,25	2,0	416,26	608,63	192,37	14,712
0,125	3,0	206,45	540,39	333,94	25,538
0,063	4,0	399,33	540,09	140,76	10,765
Fondo	5,0	411,18	538,27	127,09	9,719
				1307,6	100

Tabla 3. 2 Tabla de datos de la muestra JATA_MUESTREO_01 para obtener los porcentajes en peso correspondiente a cada Phi (números en negrita).

Con los datos de porcentaje en peso de la muestra en cada Phi, se procede a realizar los siguientes pasos:

- I. Se ingresa al software SFT, se escoge la opción Full Phi dado que la elección de la escala de Phi para el tamizado fue en números enteros. Se otorga el nombre que se desea para posteriormente identificar los datos de la muestra correspondiente y se ingresa los porcentajes en peso uno por uno en la escala de Phi que concuerda. A medida que se incorpora los datos en el programa, se va dibujando el histograma pertinente (Fig. 3. 3).

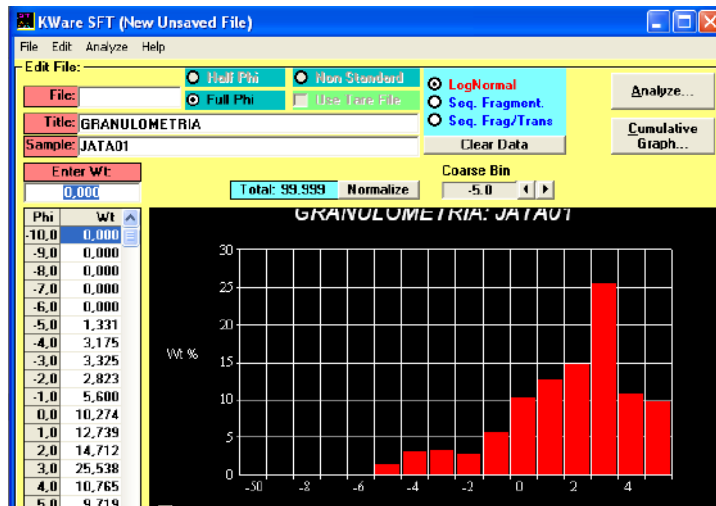


Fig. 3. 3 Software SFT, ingreso de porcentajes en peso en el sistema e histograma correspondiente.

- II. La función “Analyze” del software permite ir a otra ventana, en la cual se observan resultados gráficos y adicionalmente se puede obtener parámetros como: curtosis, asimetría y sorteo (desviación estándar), diámetro medio de la muestra analizada, media, etc; que se visualizan dando un click en el botón de “Log Normal Statistics” (Fig. 3. 4) en base a dos autores Inman y Folk.

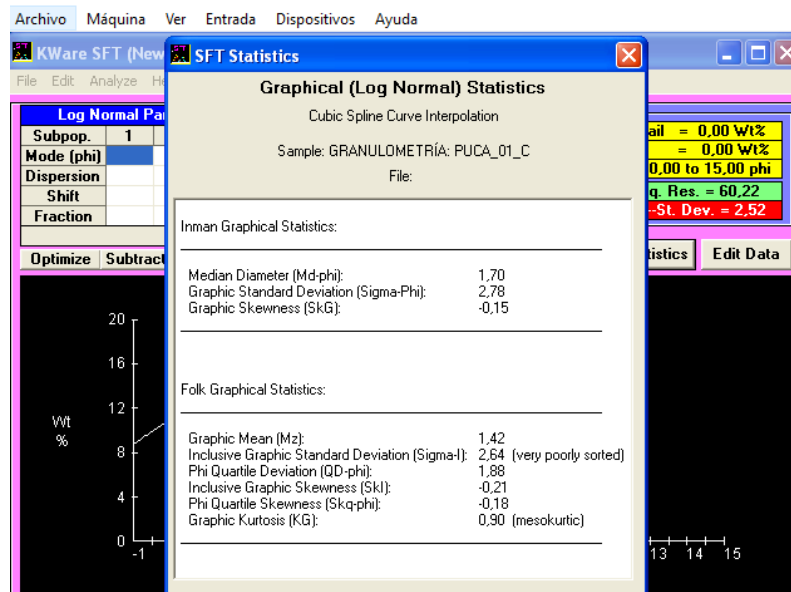


Fig. 3. 4 Software SFT, tabla de resultados estadísticos para gráfica en base a fórmulas según los autores Inman y Folk and Ward.

3.1.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS ESTADÍSTICOS GRÁFICOS

Los valores de granulometría se analizaron en base a fórmulas planteadas por (Inman, 1951) como: mediana (Md-Phi), desviación estándar gráfica (Sigma Phi), asimetría (SkG); y por (Folk & Ward, 1957): media (Mz), desviación estándar gráfica inclusiva (Sigma-l), desviación del cuartil Phi (QD-Phi), asimetría inclusiva gráfica (SkI), asimetría del cuartil Phi (Skq-phi).

El análisis estadístico de los datos en base a Folk & Ward (1957) se basa en una serie de parámetros de tamaño de grano modificados de los de Inman (1952) para proporcionar una cobertura más detallada y así representar las propiedades de las curvas de tamaño no normales (no en forma de campana de Gauss) con precisión.

A través de la relación entre el sorteo (Sigma-l) en unidades Phi (ϕ) y la media del tamaño de grano, también en unidades Phi (ϕ) obtenidas del tratamiento de datos, se puede clasificar a las muestras de sedimento entre (Fig. 1. 2): Flujos de escombros (Debris flows) ya sean cohesivos (ricos en arcilla) o no cohesivos (pobres en arcilla), Flujos hiperconcentrados (Hyperconcentrated flows) o Flujos de agua (Water flows) a través de un método de diferenciación propuesto por Pierson y Scott (1999).

Los datos arrojados por el software SFT, calculados en base a Folk & Ward, se proceden a ingresar en Microsoft Excel, ya que en base a estos datos se determina el tipo de lahar con el método de diferenciación propuesto por Pierson y Scott (1999). Esta hoja de cálculo de Excel es un modelamiento edificado como un análogo de las curvas que dividen los campos entre los tipos de lahares encontradas en Scott & Vallance, (1995). La hoja de excel permite realizar un procesamiento de datos y al mismo tiempo obtener una gráfica que colocará a los lahares dentro de uno de los campos de estos tipos de lahares (Fig. 3. 5).

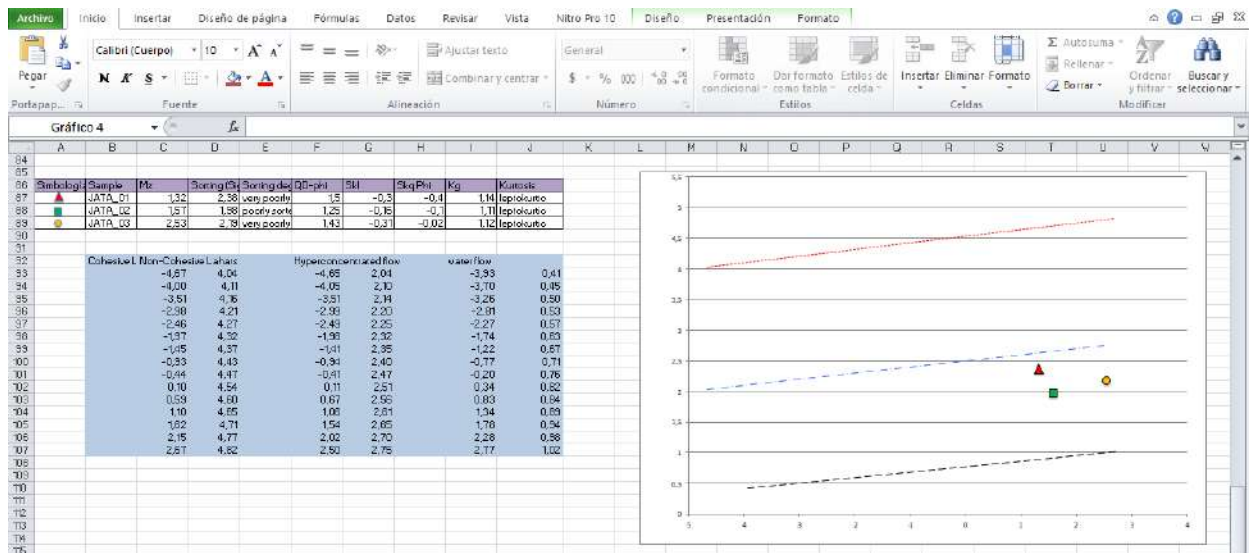


Fig. 3. 5 Hoja de trabajo de Excel en base a parámetros de Folk & Ward para clasificar los lahares secundarios correspondiente a las muestras de la Q. Jatabamba.

3.1.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES

Para caracterizar a los lahares secundarios con mayor detalle se realizó un análisis de los componentes de las muestras de lahares secundarios tomadas de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi. Para realizar el procedimiento el material fue clasificado en cuatro clases principales de componentes con ciertas divisiones adicionales en las dos primeras como se muestra en la Tabla 3. 3:

Clasificación	Descripción	División por color
1. Vesiculadas	Incluye pómez y escorias.	Blancas
		Negras
		Rojas
2. No Vesiculadas	Incluye material denso.	Rojas
		Negras
		Grises
3. Cristales	Principalmente plg, prx, vidrio.	
4. Materia Orgánica	Restos de plantas, madera, etc.	

Tabla 3. 3 Categorías y descripción para la clasificación en el análisis de componentes.

Para llevar a cabo este procedimiento se utiliza las fracciones de la muestra ya tamizada, y se consideró las de tamaño de 0,5 mm (1 Phi) y de 2 mm (-1 Phi). El análisis de componentes para la muestra de tamaño de 1 Phi fue realizado con un binocular Olympus SZ propiedad del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica

Nacional, en cambio las de tamaño -1 Phi fueron realizadas manualmente y sin ayuda de algún instrumento adicional.

El proceso a llevarse para separar y catalogar el material de acuerdo a las categorías planteadas consiste en:

- A. Se trabaja con la muestra de lahar seco ya que las fracciones que van a utilizarse no son de un tamaño tan reducido y pueden diferenciarse sin realizar un lavado previo. Se deberán contar al menos 300 elementos del material para poder realizar una clasificación significativa de la muestra. Se debe preparar los envases de acuerdo a las categorías previamente escogidas y las herramientas para realizar el conteo, incluyendo libreta, lápiz, pinzas, binocular Olympus, etc (Fig. 3. 6A).
- B. Para el caso de la fracción de 1 Phi la separación se ejecutará con ayuda del binocular, mientras que la fracción de -1 Phi será a simple vista. Ambos con ayuda de una pinza (Fig. 3. 6B).
- C. Con criterio y cuidadosamente de la porción aleatoria tomada de la muestra se separará los elementos individuales entre las cuatro categorías planteadas previamente, tomando en cuenta los colores en cada una de ellas en el conteo. Mientras que, simultáneamente se anotará el resultado para llevar la cuenta hasta sumar al menos 300 elementos (Fig. 3. 6C).
- D. Se caracteriza cada una de las categorías en base a aspectos como forma, tamaños de referencia, color, etc. Además se toma fotografías vinculando el binocular con la computadora, a través del programa Infinity Capture para obtener un respaldo del trabajo (Fig. 3. 6D).

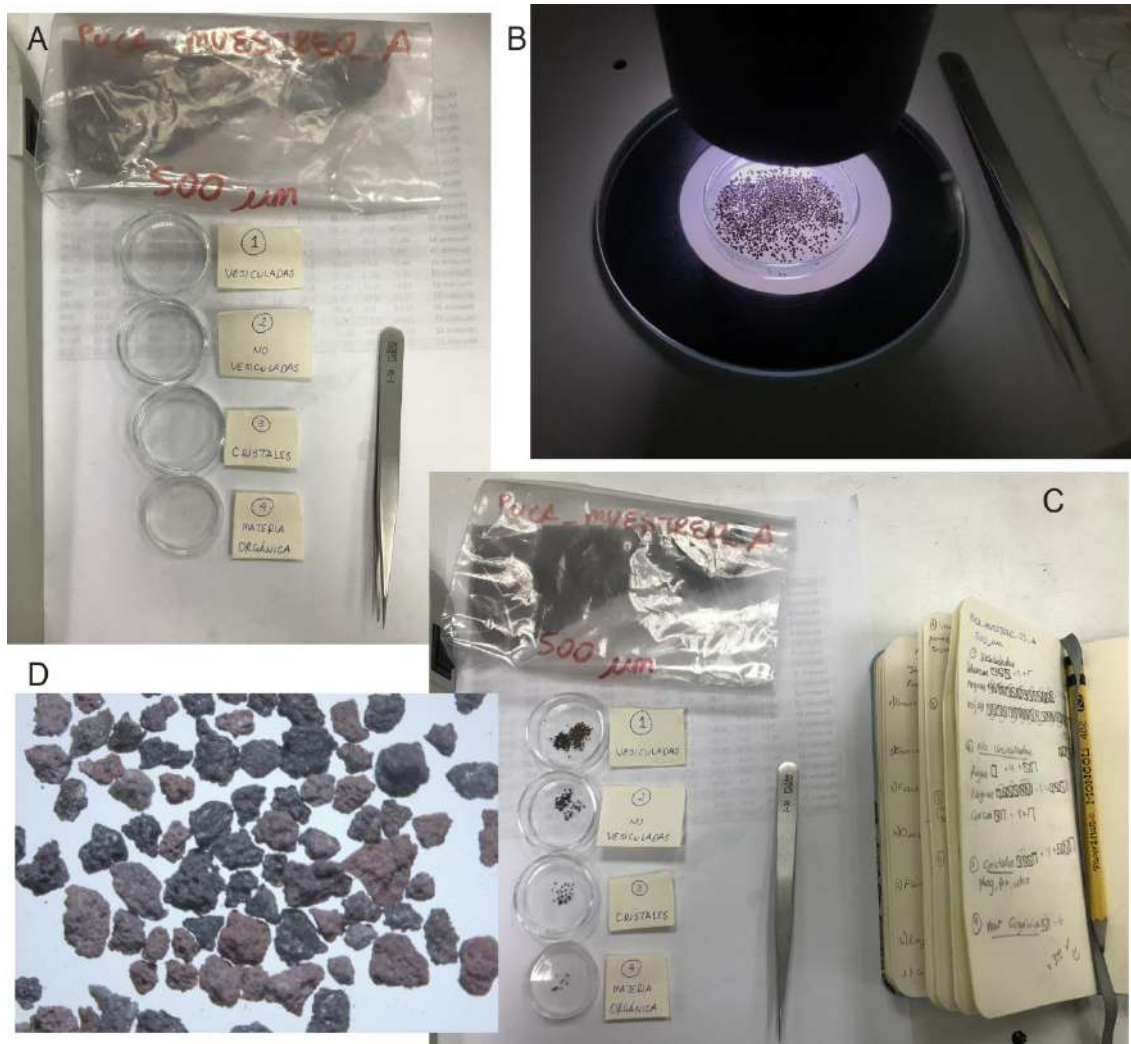


Fig. 3. 6 Procedimiento para llevar a cabo el conteo de componentes de las muestras de lahares secundarios. (A) Preparación de los materiales de trabajo. (B) Mediante la pinza y bajo binocular separamos el material entre las categorías planteadas. (C) Conteo y clasificación. (D) Fotografía de material vesiculado tomada del binocular Olympus a través del programa Infinity capture.

La división general para todas las muestras de lahares secundarios está basada en estas cuatro clases:

Material Vesiculado (Fig. 3. 7): son fragmentos piroclásticos que forman parte del material juvenil, que es aquel formado directamente de la fragmentación de magma emitido en una erupción (Hugo F. Murcia et al., 2011). Se encuentra principalmente escorias, piroclastos con alto porcentaje de vesículas, presencia de vidrio y un alto contenido de Fe y Mg. También pómez, piroclastos igualmente con un alto contenido de vesículas de baja densidad, con presencia de vidrio y de composición ácida entre dacita a riolita. Esta categoría se dividió en material vesiculado de color rojo, blanco y negro



Fig. 3. 7 Material vesiculado de color negro, rojo y blanco en menor cantidad. Muestra JATA_MUESTREO_02 de la Q. Jatabamba.

Material no vesiculado (Fig. 3. 8): corresponde a líticos. Según Cas & Wright, el término "lítico" generalmente describe los componentes densos en un depósito piroclástico (Cas & Wright, 1996). En este estudio, generalmente corresponde a fragmentos no vesiculados de color negro, rojo o gris (en menor cantidad), de aspecto compacto.



Fig. 3. 8 Material no vesiculado de color negro, rojo y gris. Muestra PUCA_MUESTREO_01_B de la Q. Pucarumi.

Cristales (Fig. 3. 9): se forman durante el enfriamiento y ascenso del magma en erupción, abarcando con mayor importancia y en mayor cantidad cristales de piroxenos, abundante plagioclasa, vidrio y en menor contenido anfíboles.



Fig. 3. 9 Cristales en mayor contenido prx, plag y vidrio. Muestra PUCA_MUESTREO_01_C de la Q. Pucarumi.

Materia Orgánica (Fig. 3. 10): es materia elaborada de compuestos orgánicos que provienen de restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus residuos. Se encuentra principalmente pequeñas plantas, cortezas de árbol, tallos y raíces.



Fig. 3. 10 Materia orgánica. Muestra JATA_MUESTREO_03 de la Q. Jatabamba.

Para finalizar el tratamiento de datos de granulometría de las muestras de lahares secundarios se ingresa los porcentajes de elementos que contiene cada una de las categorías en las que se dividió a los lahares anotadas en la libreta a Microsoft Excel. En una hoja de trabajo se organizó la data final dividiendo cada una de las categorías como se muestra en la Tabla 3. 4 y se realizaron gráficas para una mejor visibilidad (Fig. 3. 11).

Muestra	Ves. Rojo	Ves. Negro	Ves. Blanco	No Ves. Rojo	No Ves. Negro	No. Ves. Gris	Cristales	MO	% Ves	%No Ves	% Cristales	%MO	total	% total
JATA_01	87	59	8	74	71	4	56	2	42,659	41,274	15,512	0,55	361,00	100,00
JATA_02	87	96	14	33	42	7	43	0	61,180	25,466	13,354	0,00	322,00	100,00
JATA_03	85	31	38	66	43	6	36	7	49,359	36,859	11,538	2,24	312,00	100,00

Tabla 3. 4 Porcentajes de acuerdo a las categorías de clasificación para el análisis de componente para la Q. Jatabamba.

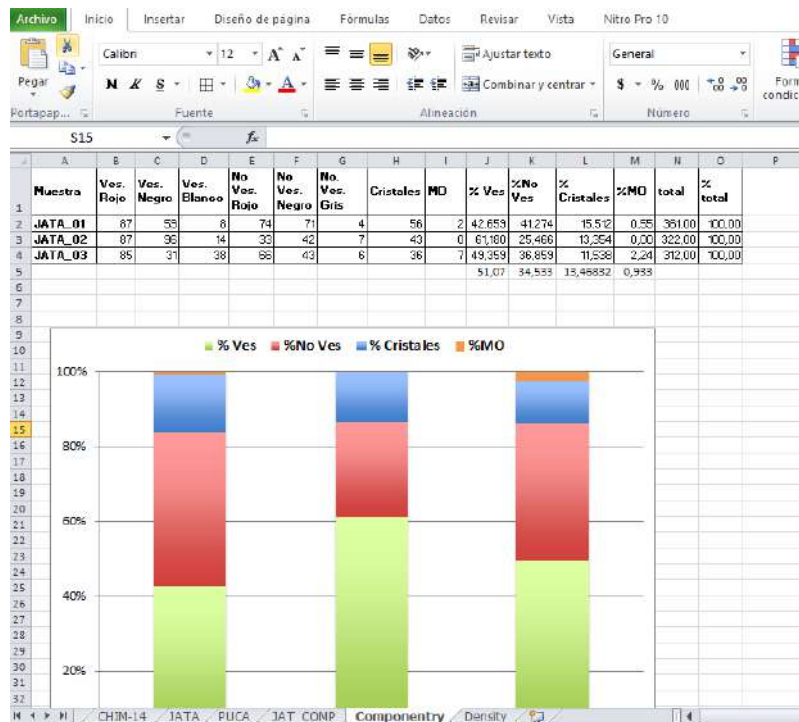


Fig. 3. 11 Ingreso de datos para análisis en Excel con gráficas.

3.2 RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR)

El radar de penetración en el suelo (GPR) que se utilizó fue el GPR ProEx (Professional Explorer) de la marca MALA GeoScience y consta de los siguientes elementos (Fig. 3. 12) y (Fig. 3. 13):

1. Mochila para guardar y transportar la unidad de control
2. Antena no blindada emisora y receptora
3. Pantalla
4. Unidad de control
5. Hilo para registrar la distancia



Fig. 3. 12 Equipo completo del Georadar de suelo. 1. Mochila 2. Antenas 3. Pantalla 4. Unidad de control 5. Hilo para medir distancia. Tomado de (Zapata, 2015).



Fig. 3. 13 Equipo GPR, instalación del equipo y transporte adaptado a una mochila en la Q. Jatabamba.

3.2.1 MANEJO DEL EQUIPO GPR

Para el manejo adecuado del equipo de trabajo y todos sus cuidados se requieren:

- I. Armar el equipo y determinar los parámetros adecuados en la unidad de control como: la antena que se utilizará, el tiempo de ventana de grabación, la velocidad de transmisión de onda, y el intervalo de tiempo entre los pulsos. Para este estudio los parámetros seleccionados fueron los siguientes (Tabla 3. 5):

Parámetro	Valor
Antena	100 MHz
Tiempo de ventana	454,2 ns
Velocidad	110 m/ μ s
Intervalo de tiempo	0,1 s

Tabla 3. 5 Parámetros utilizados en el GPR.

Se utilizó la antena de 100 MHz ya que posee una frecuencia baja, lo que le da una mayor capacidad de penetración, aproximadamente 9 metros, y al mismo tiempo ofrece una resolución media razonable según MALA GeoScience (2012). Además, la velocidad utilizada fue de 110 m/ μ s en base a la Tabla 2. 2 que especifica valores de velocidades de acuerdo al material en donde se propaguen las ondas. Se determinó la conversión de unidades de metro (m)/nanosegundos (ns) a metro (m)/microsegundo (μ s) en función del tipo de material que se pudiera encontrar con mayor probabilidad, en este caso se escogió un valor entre arena seca y arena saturada.

- ii. Para empezar a emplear el GPR en primer lugar se enciende las dos antenas que posee el instrumento, posteriormente la unidad de control y la pantalla. Ahora solo se debe iniciar un nuevo archivo y caminar sobre el trayecto planificado tomando el mando de las antenas en mano, mientras los datos se registran (Fig. 3. 14). Con ayuda de una opción de la computadora se puede colocar marcas digitales en el registro que representan sitios importantes, como por ejemplo algún contacto geológico observado en superficie o algún obstáculo que pueda generar alguna interferencia en la señal registrada. Estas marcas son muy útiles durante la interpretación de los datos. En especial, durante las travesías en muchas ocasiones fue posible observar y marcar en superficie el contacto entre el lahar de 1877 y el relleno de lahares secundarios posteriores.



Fig. 3. 14 Equipo GPR, toma de datos en la Q. Pucarumi.

- III. Los archivos se almacenan en la computadora y a través de una memory flash todos los datos obtenidos pueden ser guardados. También es posible el tratamiento de los radargramas utilizando únicamente la computadora del GPR, pero las opciones que presenta el software MALA Ground Vision 2 son más completas y por eso será utilizado para el tratamiento de los radargramas.

3.2.2 PLANIFICACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS GPR

Para obtener mejores resultados se planificaron los perfiles de manera que abarcaran la mayoría de la zona de estudio (Fig. 3. 17 y 3. 18), ya que posteriormente realizaríamos una interpolación de datos. Se los escogió con los siguientes criterios:

1. Que sean perfiles en su mayoría en línea recta, donde la vegetación no impidiera el paso.
2. Situados en zonas donde se pudiera observar toda clase de contraste para poder comparar y discriminar los resultados obtenidos.

La ubicación final fue elegida en el campo y los datos finales de las coordenadas fueron tomadas a través de un track de puntos con un GPS.

Se llevó a cabo una toma de datos de prueba el 4 de abril de 2019 con el equipo GPR en la Quebrada Pucarumi, para verificar la factibilidad, la accesibilidad y la calidad de los datos obtenidos. Una vez verificado el funcionamiento del equipo se realizaron tomas de datos el día 8 de mayo de 2019 en la Quebrada Jatabamba y el día 9 de mayo de 2019 en la Quebrada Pucarumi.

El tratamiento de datos se realizó con el software Ground Vision 2 (versión libre) que se limitaba por la no disponibilidad para utilizar algunas herramientas, pero que fue suficiente para mostrar los resultados deseados.

Los radargramas obtenidos en el campo son tratados para que posean un mejor contraste y una mejor visualización en el software. Para ello se les aplicó un conjunto de filtros para mejorar la imagen (Fig. 3. 15) y el resultado es bastante visible (Fig. 3. 16).

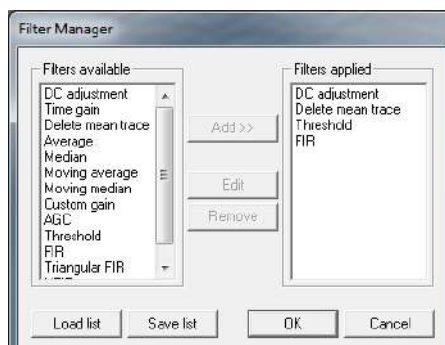


Fig. 3. 15 Filtros aplicados a los radargramas en el software MALA Ground Vision 2.

Para seleccionar los filtros deseados se debe acudir a la pantalla de “Filter Manager”, en ella se podrá observar hacia la parte izquierda todos los filtros disponibles y desplegar a la parte derecha todos los que se desea usar y en el orden seleccionado. Cada vez que se realice este procedimiento se abrirá una nueva ventana para especificar más detalles como los intervalos en los que se desea que se aplique el filtro. El conocimiento y la experiencia del usuario a menudo determinan el tiempo que lleva producir una imagen útil y los filtros que serán requeridos para lograr que sea lo que se busca. Como se observa en la Fig. 3. 15, el orden está predeterminado y fueron seleccionados cuatro filtros principales:

- ❖ **DC Adjustment:** fue utilizado en primer lugar por recomendación del manual de usuario del software. Es una corrección que se hace al desplazamiento en la amplitud de la traza.
- ❖ **Delete mean trace:** se utiliza para eliminar características horizontales encontradas en los radargramas, especialmente al inicio de ellos.
- ❖ **Threshold:** se utiliza para las muestras con un valor por debajo del umbral se establecen en cero. Así el aspecto del radargrama elimina los valores menos representativos.
- ❖ **FIR:** funciona con una combinación de dos filtros de promedio y se ejecuta en dos etapas. Primero, las frecuencias más bajas se atenúan restando el

promedio . Luego, las frecuencias más altas se atenúan reemplazando cada muestra con el promedio calculado.

Además de aplicar filtros, el software nos permite alterar opciones como el contraste de tonos de gris y la elección de las unidades y los ejes que requerimos para los radargramas.

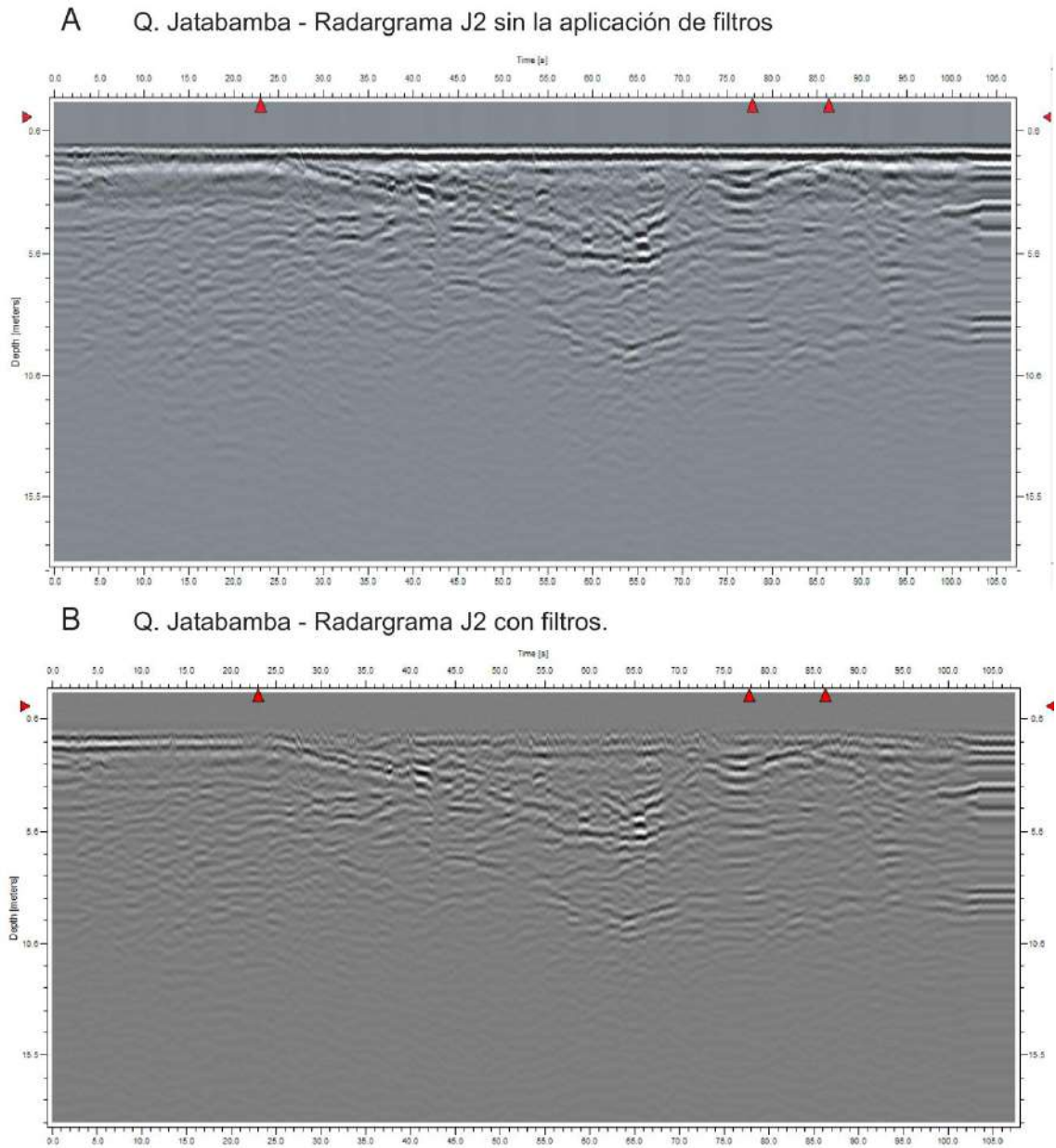


Fig. 3. 16 Tratamiento de los radargramas a través de filtros. A. Antes de la aplicación de filtros. B. Con filtros.

MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PERFILES REALIZADOS CON EL RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR) QUEBRADA PUCARUMI

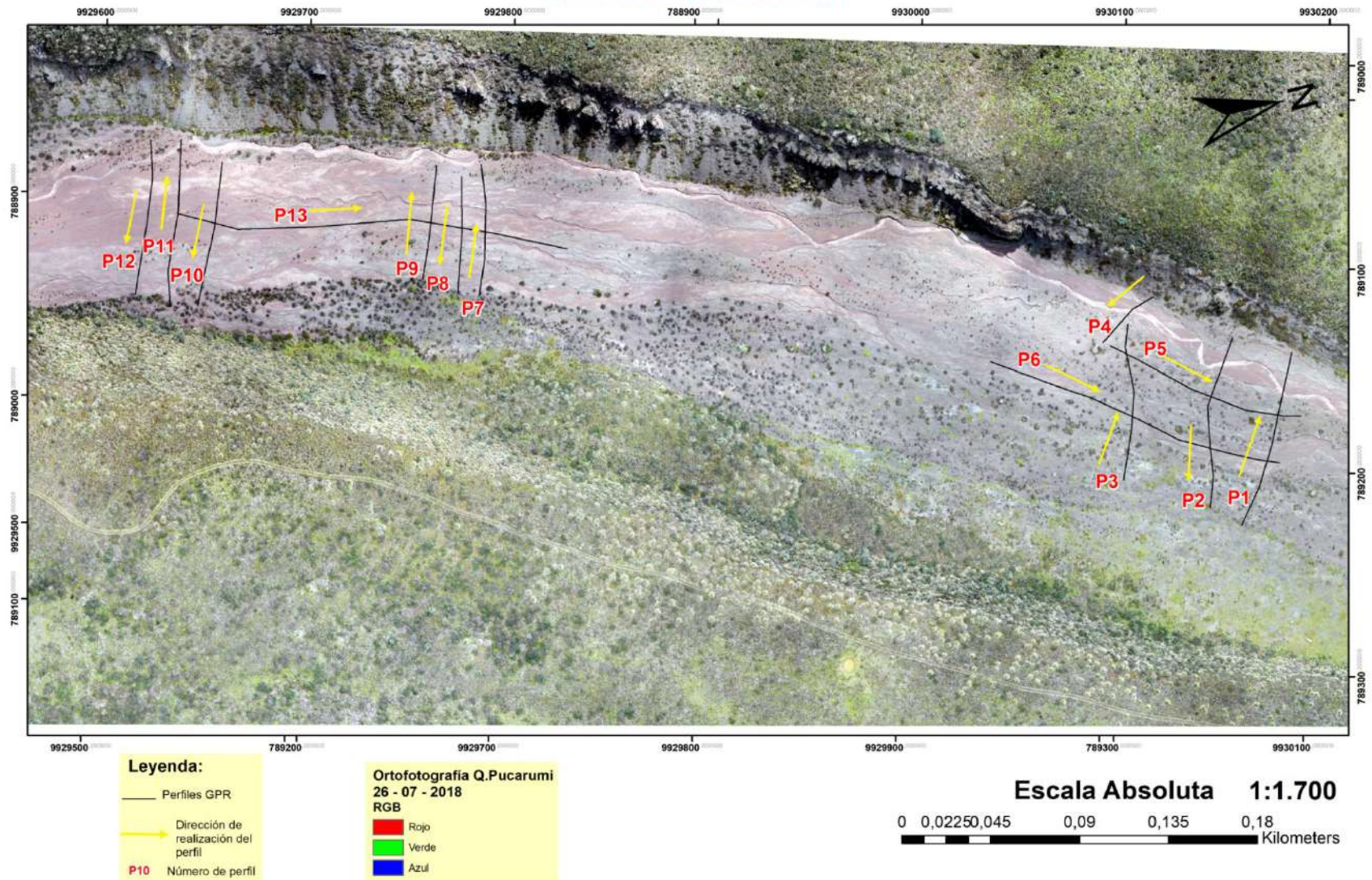


Fig. 3. 17 Mapa de ubicación de los perfilajes realizados con un radar de penetración de suelo (GPR) en la Q. Pucarumi.

MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PERFILES REALIZADOS CON EL RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR) QUEBRADA JATABAMBA

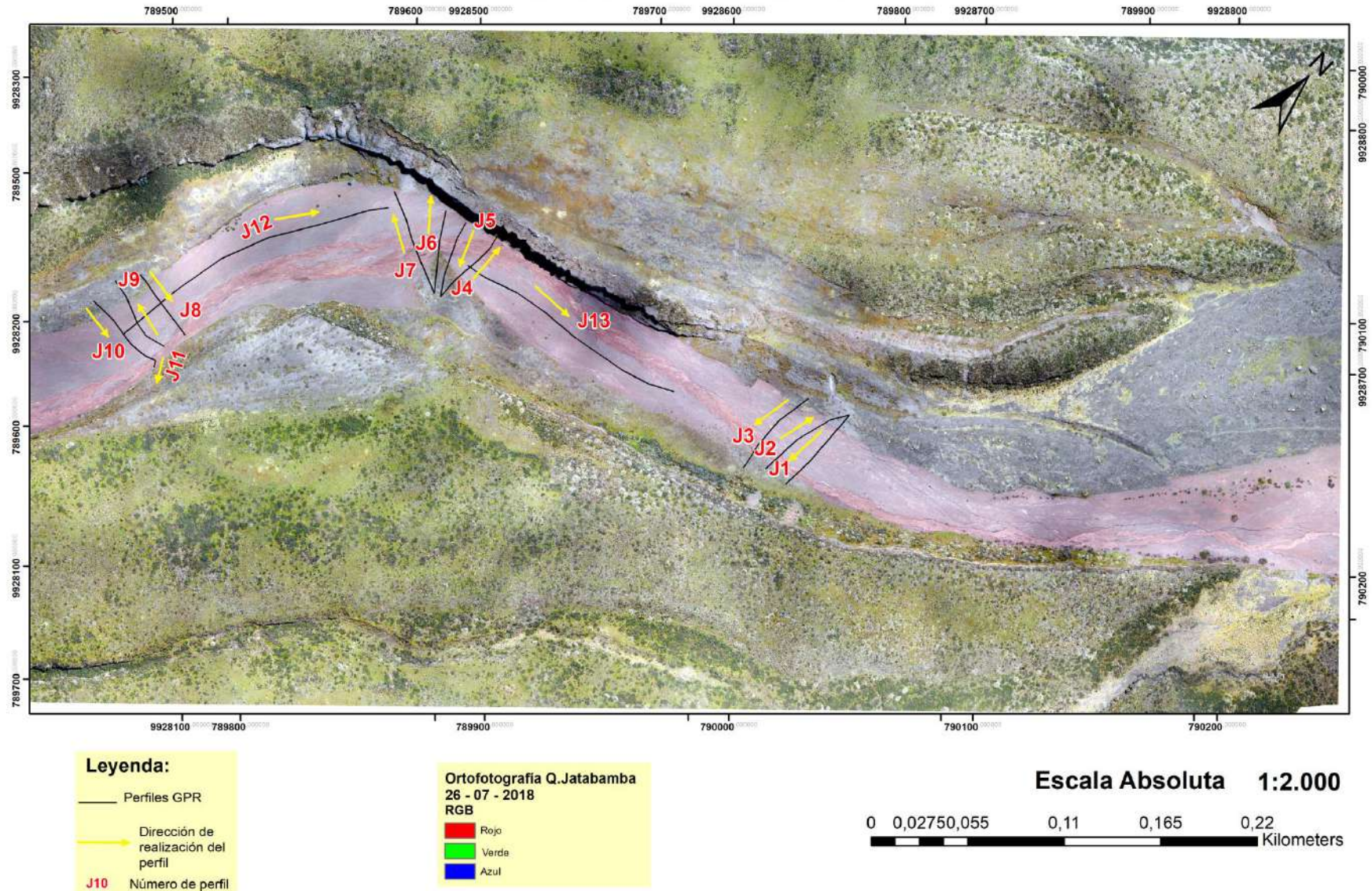


Fig. 3. 18 Mapa de ubicación de los perfilajes realizados con un radar de penetración de suelo (GPR) en la Q. Jatabamba.

3.2.2.1 INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE RADARGRAMAS

El objetivo del filtrado es encontrar reflectores en el substrato que puedan ser interpretados como el contacto estratigráfico generado entre la acumulación de lahares secundarios y el lahar de 1877 por su litología tan distinta. Para ello se debe seguir los siguientes pasos:

- A. El primer paso es identificar los sitios donde se pudo marcar en superficie el contacto entre el depósito de 1877 y el relleno de lahares secundarios recientes, y luego se procede a interpretar el contacto en profundidad en el radargrama (Fig. 3. 19).

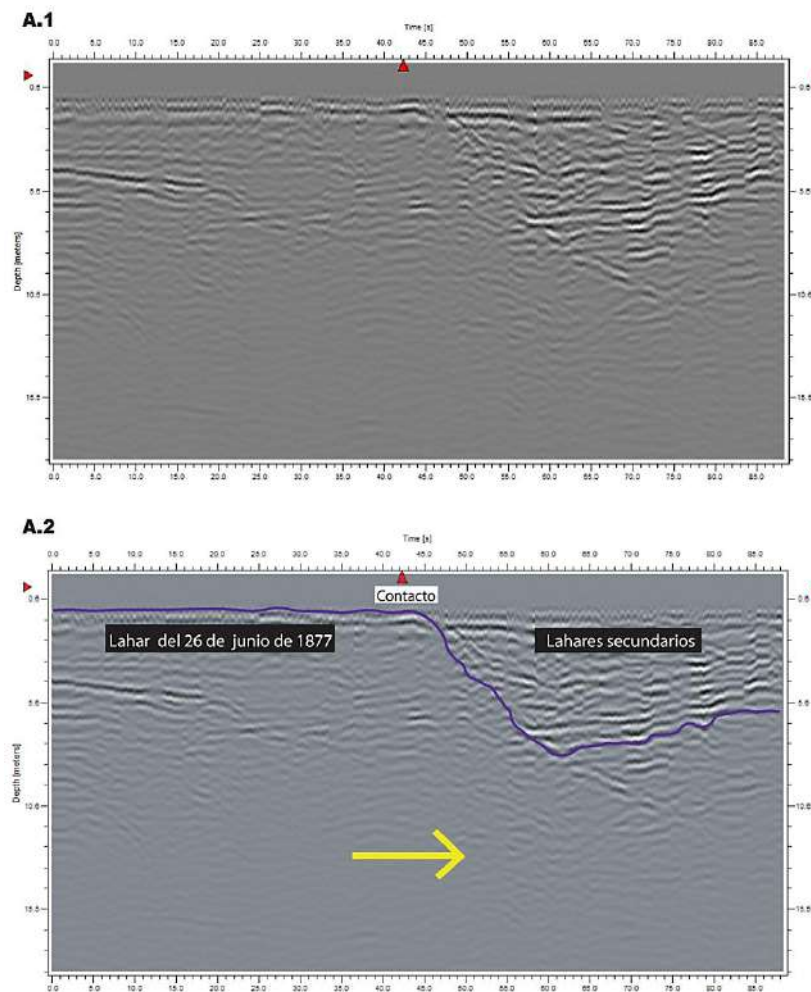
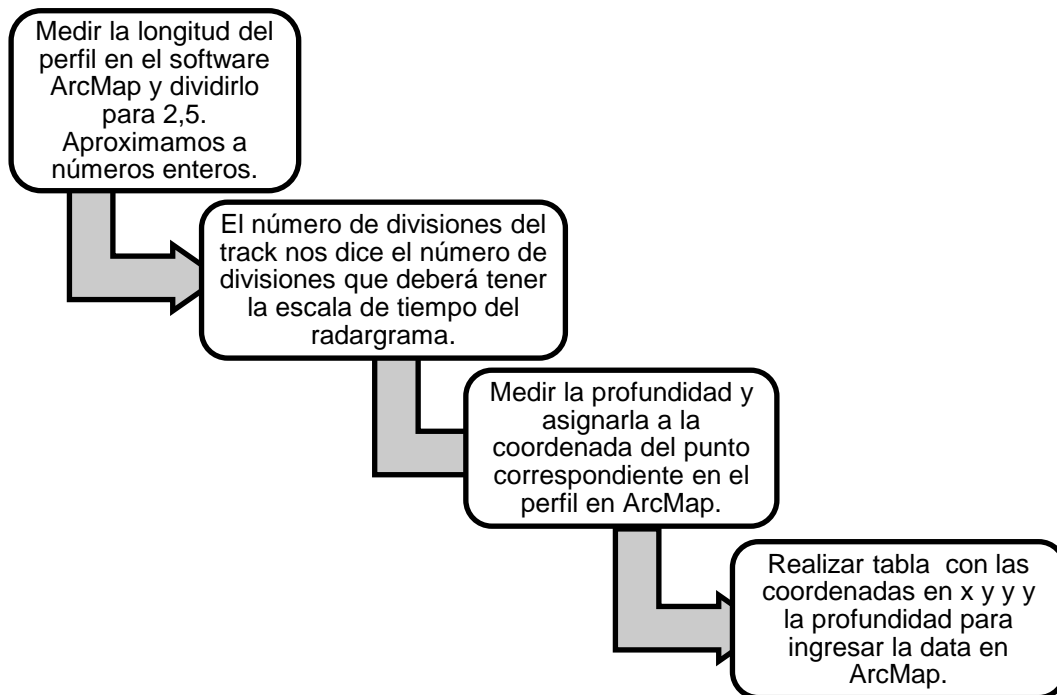


Fig. 3. 19 Interpretación del radargrama J6 de la Q. Jatabamba. A.1 Radargrama sin interpretación. A.2 Radargrama interpretado, la línea morada muestra el mayor contraste que marca una diferencia de materiales, la flecha roja marca un contacto de referencia observado en campo y la flecha amarilla la dirección en que fue tomado el perfil según el mapa de perfilajes de la Q. Jatabamba.

B. Para cada uno de los radargramas interpretados se procede a medir la profundidad del contacto de interés en puntos predeterminados a distancias fijas. Estas medidas de profundidad se utilizarán para realizar un mapa de espesores a través de una interpolación. Para el presente estudio, tomando en cuenta las longitudes de los perfiles, se decidió medir la profundidad del contacto cada 2,5 metros. Asumiendo que los perfiles se realizaron a una velocidad constante, se realiza el proceso de la siguiente manera:



C. Una vez ingresados los datos en ArcMap se conformará una red de puntos a lo largo de los perfiles que conteniendo el atributo de espesor, pueden ser utilizados en una interpolación de datos (Fig. 3. 20). Además entre punto y punto se comprueba que la distancia aproximada sea de 2,5 metros.

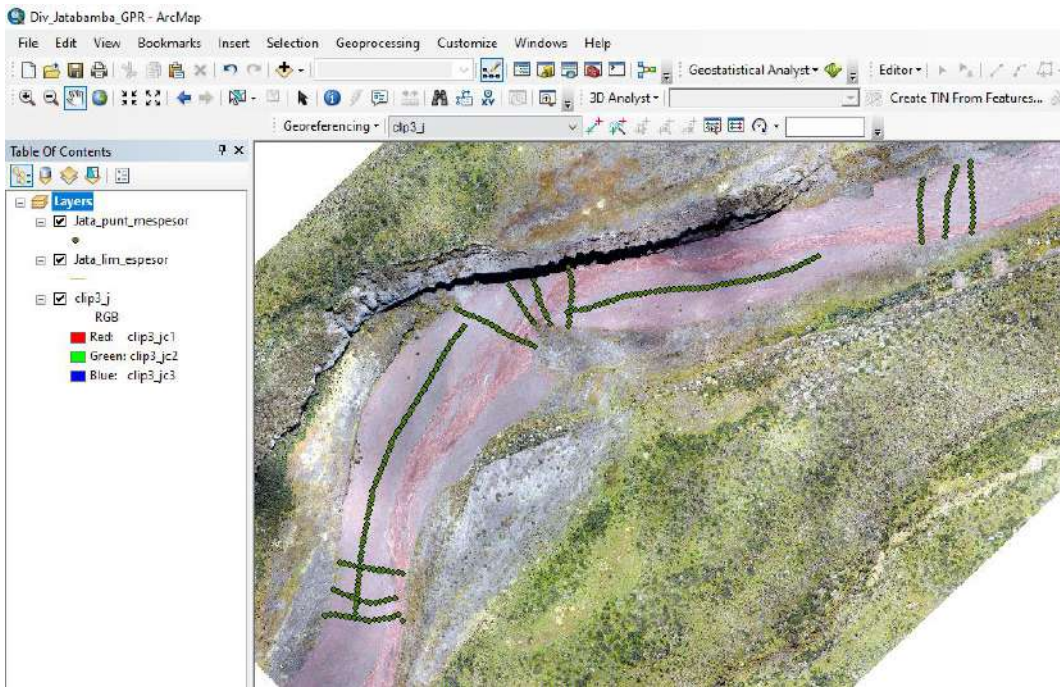


Fig. 3. 20 Mapa de puntos de espesores cada 2,5 m en cada perfil, Q. Jatabamba.

D. Para delimitar la interpolación en la zona donde se encuentran los lahares secundarios dentro de cada una de las quebradas, se realizó una adición a la tabla de datos anterior. Cada 10 metros aproximadamente, se elaboró un límite de puntos con un valor de espesor de 0 en el contacto lateral de los lahares secundarios (Fig. 3. 21).

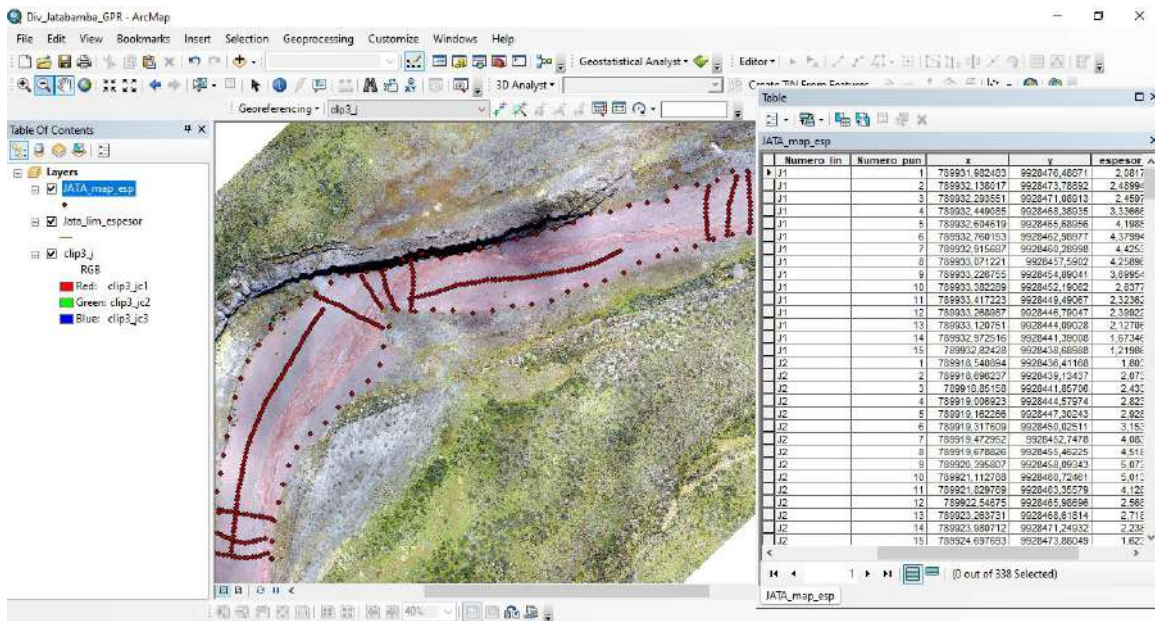


Fig. 3. 21 Mapa de puntos de espesor cada 2,5 m y límite de puntos en la frontera con un valor de espesor 0, Q. Jatabamba.

- E. Una vez lista la tabla de atributos en ArcMap, el siguiente paso es realizar la interpolación de puntos por medio del espesor. En este caso, el mejor método para construir este modelo de interpolación fue el método tipo kriging. Para llevar a cabo esta herramienta se debe ir al ArcToolbox dentro del software ArcMap, escoger la opción “Spatial Analysis Tools”, dentro de ella la alternativa “Interpolation” y finalmente escoger el ítem “Kriging”(Fig. 3. 22).

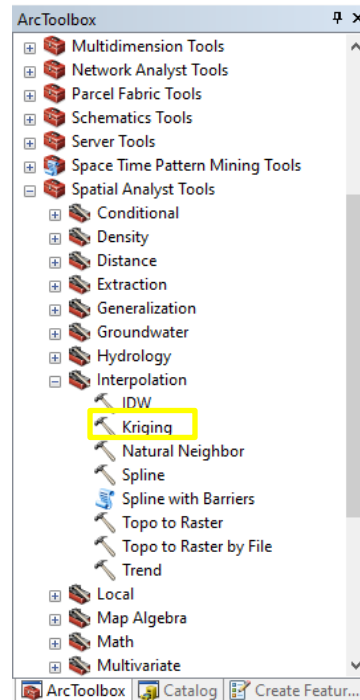


Fig. 3. 22 Caja de herramientas ArcToolBox en el software ArcMap, para escoger el método Kriging.

- F. Con la variación de algunos parámetros se llevará a cabo varios modelos de predicción de acuerdo a los datos de espesor obtenidos mediante el equipo GPR en las quebradas Jatabamba y Pucarumi (Fig. 3. 23) y reconocer en base a ello la distribución más aproximada.

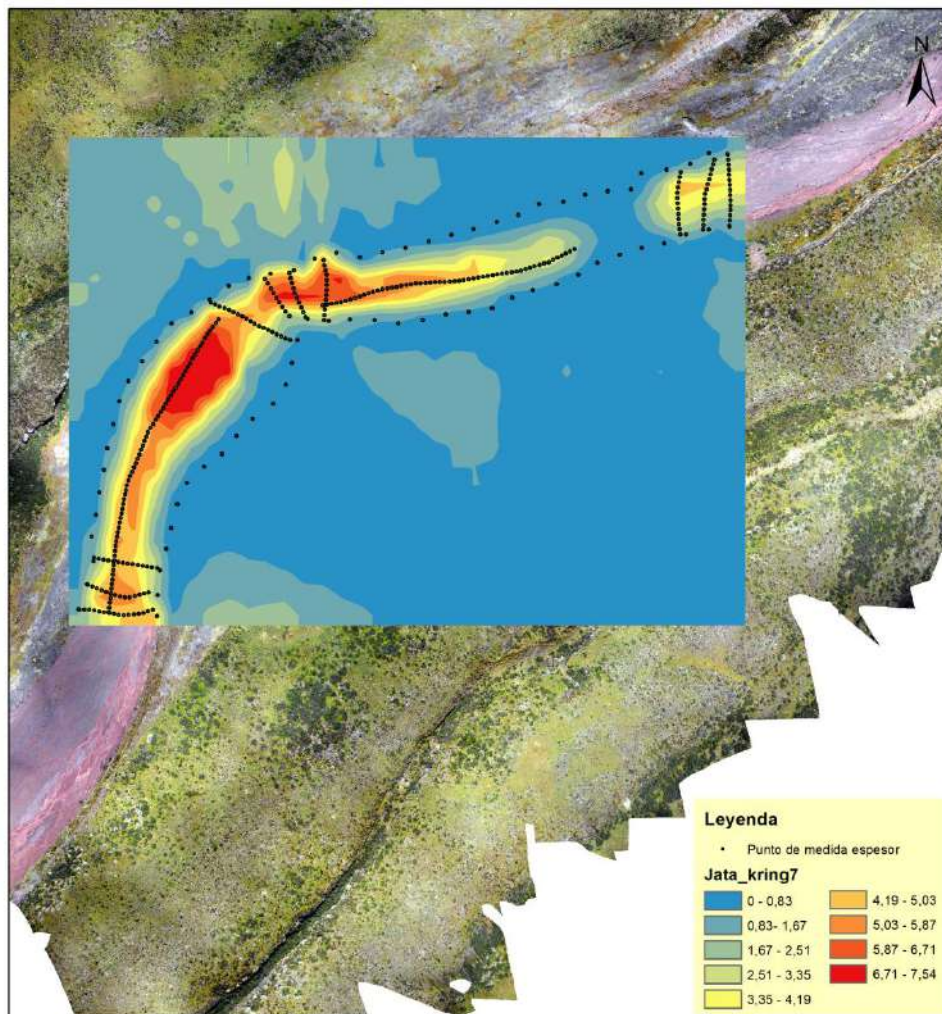


Fig. 3. 23 Ejemplo de un modelamiento tipo Kriging en la Q. Jatabamba.

3.3 CARTOGRAFÍA

3.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la cartografía de los lahares secundarios en primer lugar se eligió una zona de estudio ubicada en el flanco oriental del volcán Cotopaxi, en las quebradas Jatabamba (Fig. 3. 24A) y Pucarumi (Fig. 3. 24B).

Estas quebradas fueron escogidas en base a tres criterios:

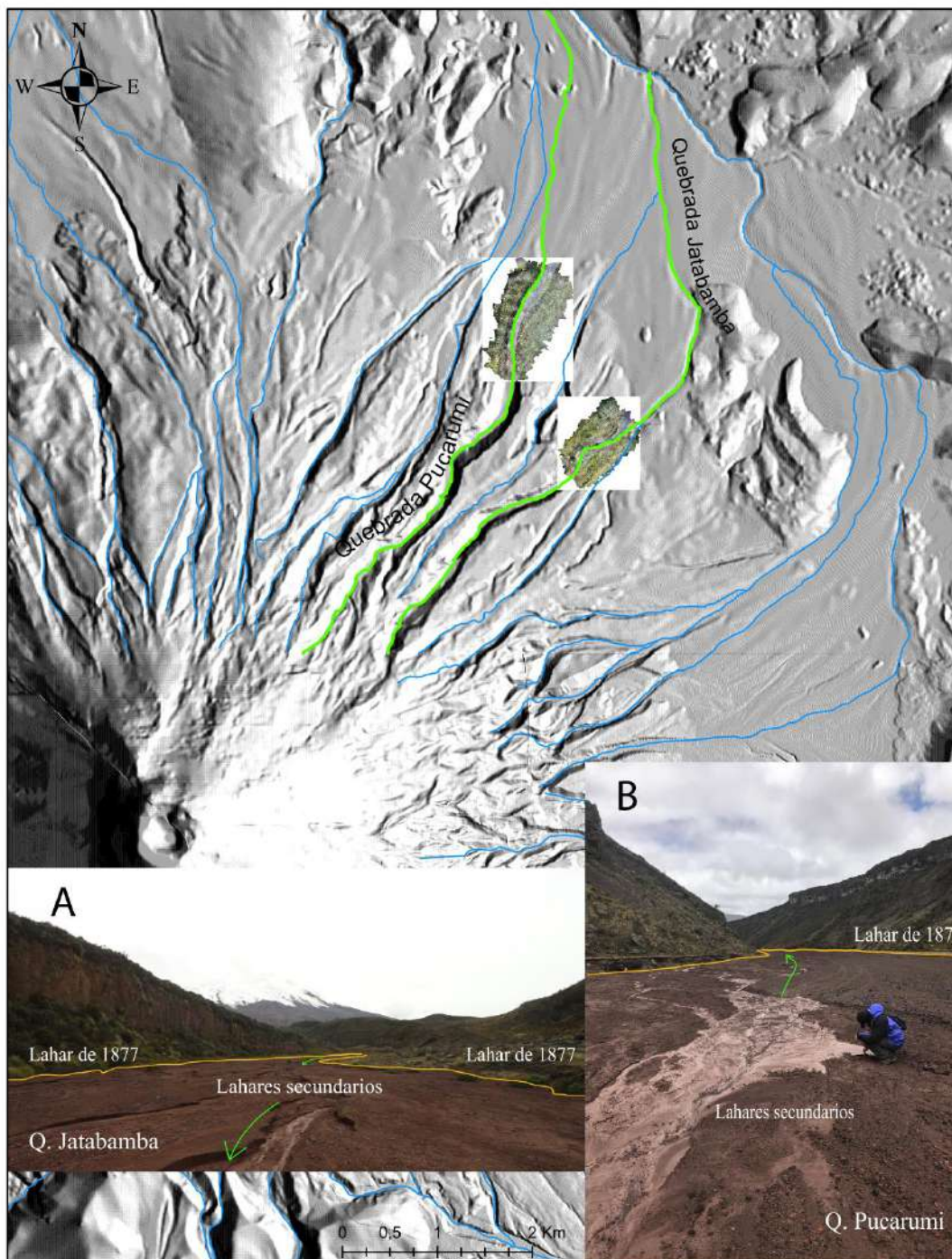


Fig. 3. 24 Mapa de ubicación de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi en el flanco oriental del volcán Cotopaxi. A. Quebrada Jatabamba, evidenciando lahares secundarios actuales y su dirección de flujo. B. Quebrada Pucarumi, evidenciando lahares secundarios actuales y su dirección de flujo. B. Quebrada Pucarumi, evidenciando lahares secundarios actuales y su dirección de flujo aguas abajo.

1. Observaciones previas realizadas en campo de lahares secundarios ocurriendo recurrentemente en la actualidad en cada una de las quebradas.
2. Cercanía geográfica entre ellas.

3. Accesibilidad para realizar los estudios correspondientes.

3.3.2 OBTENCIÓN DE ORTOFOTOGRAFÍAS MEDIANTE EL USO DE UNA UNIDAD AÉREA NO TRIPULADA (DRONE)

3.3.2.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA LA TOMA DE FOTOGRAFÍAS

La calidad de la cartografía realizada se basa en una adecuada georeferenciación de imágenes obtenidas, ya que el objetivo es poder compararlas unas con otras y con la mayor precisión posible. Para ello, en primer lugar se requiere la identificación y fijación de puntos de referencia en campo en cada una de las quebradas. Se escogieron puntos considerados inmóviles y que no vayan a desaparecer con el tiempo, puesto que debían ser reconocibles en cada ortofotografía que se tome a lo largo del tiempo establecido (desde mayo de 2018 hasta julio de 2019). Con estos puntos de referencia se podrá realizar un proceso de georeferenciación relativa.

Se escogieron distintas rocas de gran tamaño, color, o con alguna forma en especial; además con el tamaño adecuado para que sea reconocible a la escala de la ortofotografía. Para la determinación de las coordenadas de cada punto de referencia se utilizó un GPS diferencial portátil, Marca TOPCOM modelo GNSS Trimble perteneciente al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, con el cual se determinaron las coordenadas X e Y de los puntos seleccionados en el campo (Fig. 3. 25). Las coordenadas medidas fueron transformadas al sistema WGS 84 UTM zona 17S, el mismo que fue utilizado en todo el proceso de producción cartográfica.

Una vez definidas las coordenadas UTM de los puntos de referencia, los mismos serán utilizados durante el proceso de georeferenciación en el software ArcGis, respaldando la información con fotografías tomadas en campo de cada uno de los puntos de referencia.



Fig. 3. 25 Toma de datos de coordenadas geográficas mediante una antena de alta precisión. A. Quebrada Jatabamba. B. Quebrada Pucarumi.

Unidad aérea no tripulada (Drone) (Fig. 3. 26): fue utilizado para la adquisición de imágenes que llegarán a conformar las ortofotografías. Estos son sus datos principales (Tabla 3. 6):

Modelo	eBee Classic
Fabricante	Sensefly (www.sensefly.com)
Peso	700 g (1,5 lb), ultraligero
Área de cobertura	hasta 12 km ² en un solo vuelo
Resolución	Hasta 1,5 cm por pixel
Velocidad de vuelo	entre 40 y 90 km/h, (11- 25 m/s)
Resistencia a viento de	hasta 45 km/h (13 m/s)
Tiempo de autonomía de vuelo	máximo 50 minutos en condiciones óptimas (condiciones de viento favorables y buena batería)
Lanzamiento	Manual (no requiere catapulta)
Material del drone	Cuerpo y alas de espuma de polipropileno expandido (EPP)
Batería	recargable de polímero de litio

Tabla 3. 6 Datos generales de la unidad aérea no tripulada (drone).

- **Partes principales:**

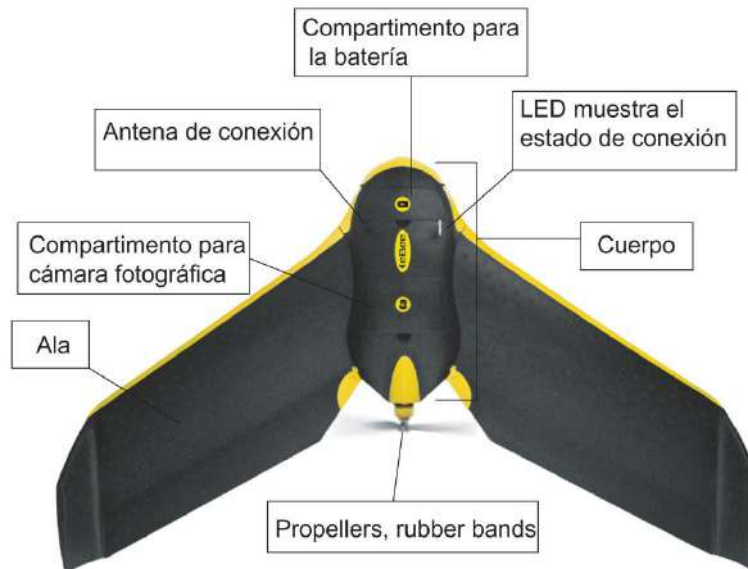


Fig. 3. 26 Unidad aérea no tripulada (drone) modelo eBee Classic y sus partes.

- **Cámaras fotográficas:** se utilizaron dos tipos de cámaras para la fotogrametría, la SenseFly S.O.D.A y la Canon S110 NIR.

SenseFly Sensor Optimised for Drone Applications (S.O.D.A.): es la primera cámara diseñada para fotogrametría con drones (Fig. 3. 27). Posee un sensor que capta las longitudes de onda del espectro visible, bandas roja, verde y azul (RGB), con una resolución de 20 megapíxeles. Para vuelos a 122 m de altura, su resolución del terreno es de 2,9 cm por píxel.

Es ideal para capturar imágenes en luz natural nítidas, a través de una amplia gama de condiciones de luz, lo que le permite producir ortomosaicos detallados y así como modelos digitales de superficie en 3D de alta precisión. Posee una tapa para cuidado del lente.



Fig. 3. 27 Cámara tipo sensefly S.O.D.A.

Canon S110 Near Infrared (NIR) (Fig. 3. 28): modelo adaptados para ser controlados por el piloto automático del dron. Adquiere datos de imagen en

las bandas de luz visible roja, verde, así como en la banda infrarrojo cercano. Posee una resolución de 12 megapíxeles. Para vuelos a 122 m de altura, su resolución del terreno es de 3,5 cm por píxel. Es importante conocer que sus parámetros de exposición pueden configurarse manualmente.



Fig. 3. 28 Cámara tipo Canon S110 NIR.

3.3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

3.3.3.1 PROCEDIMIENTO PREVIO A SALIDAS DE CAMPO

El procesamiento inicia con la planificación del vuelo mediante el uso del software eMotion 3 para delimitar las áreas de trabajo en cada una de las quebradas, donde se realizarán las fotografías aéreas con dron, es decir se definirá un plan de vuelo a modo de misiones. Éste será provisional hasta llegar a campo y verificar las zonas escogidas, el relieve para el vuelo y en especial zonas de despegue y aterrizaje (Fig. 3 .29 y 3. 30).

En la quebrada Jatabamba (Fig. 3. 29), la región fotografiada tenía un área de 20,5 ha la cual era cubierta con vuelos realizados a aproximadamente 114 m de altura durante los cuales se obtenían 189 fotografías en 13 minutos de vuelo.

En la quebrada Pucarumi (Fig. 3. 30), la región fotografiada tenía un área de 22 ha la cual era cubierta con vuelos realizados a aproximadamente 108 m de altura durante los cuales se obtenían 216 fotografías en 13 minutos de vuelo.

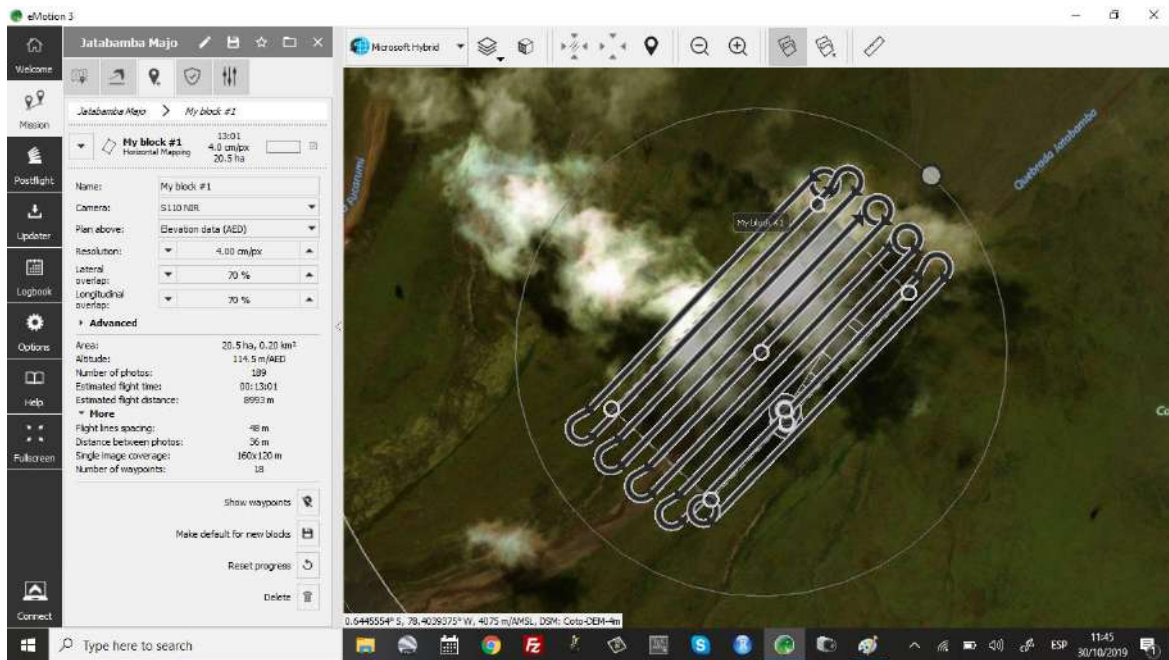


Fig. 3. 29 Pantalla de configuraciones del software eMotion3 en la Q. Jatabamba.

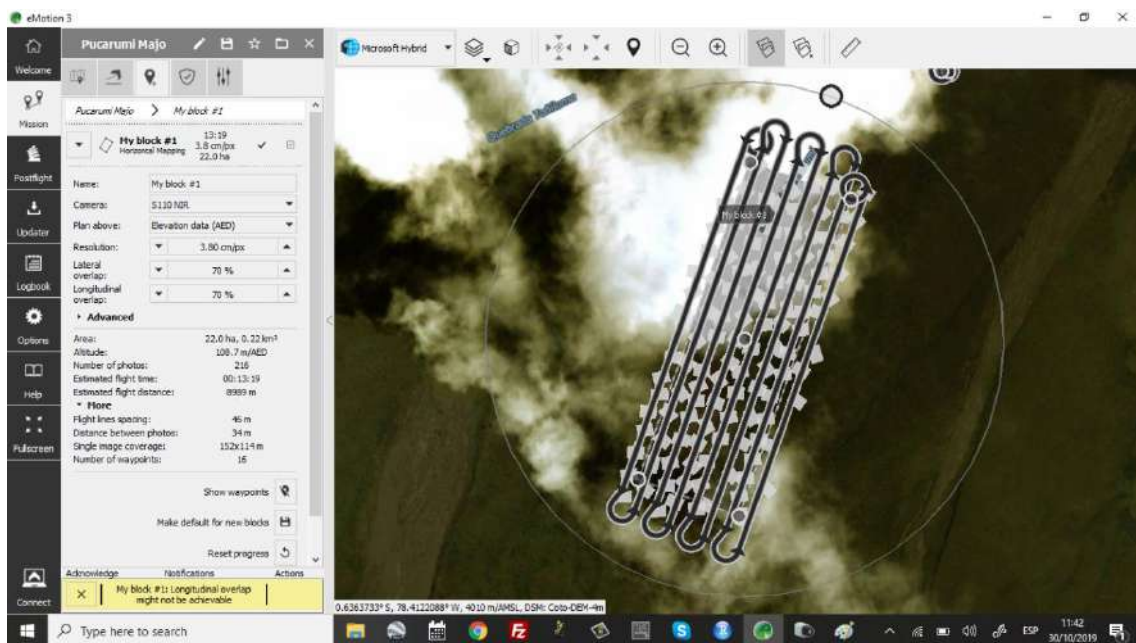
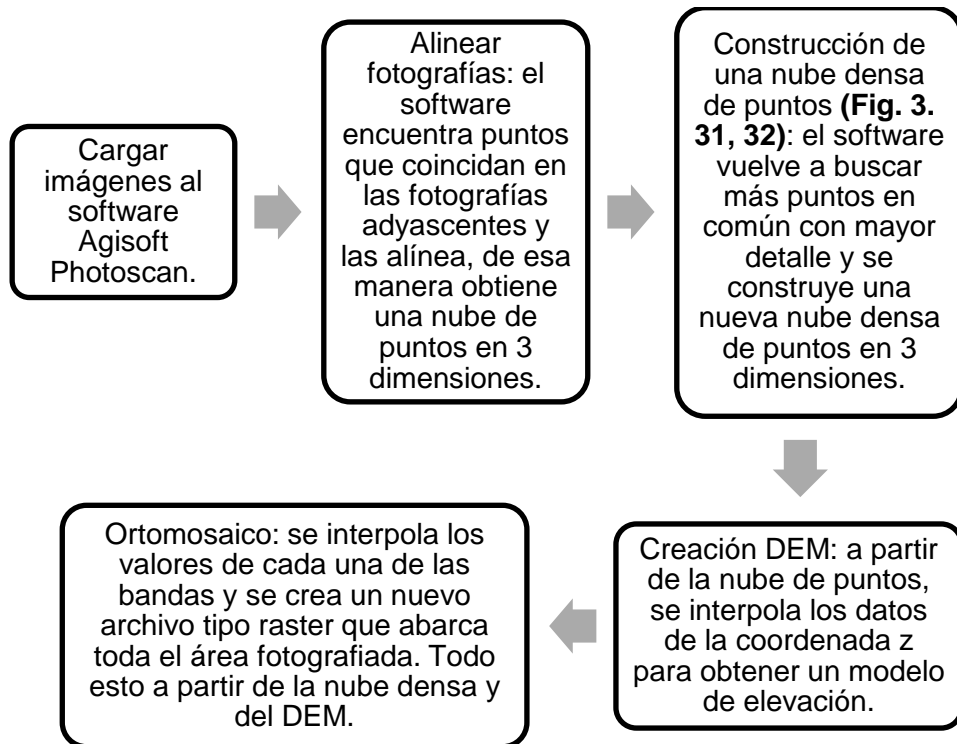


Fig. 3. 30 Pantalla de configuraciones del software eMotion3 en la Q. Pucarumi.

3.3.3.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES POST- CAMPO

Una vez culminadas las misiones en las áreas determinadas, los datos serán almacenados en la computadora portátil y posteriormente procesados. El software eMotion 3 permite descargar las fotografías tomadas con el dron, les otorga una ubicación geográfica referencial y una orientación, lo que facilita el siguiente tratamiento de datos en el software Agisoft Photoscan.

Agisoft Photoscan: software que asiste en el procesamiento final de las fotografías y que está basado en el principio de “Structure from Motion” (ver Capítulo 2). Esta aplicación construye el producto cartográfico con el conjunto de fotografías obtenidas en cada misión, para conformar un ortomosaico del área correspondiente. A este producto cartográfico final se le conoce como ortofotografía, se la obtiene siguiendo los siguientes pasos:



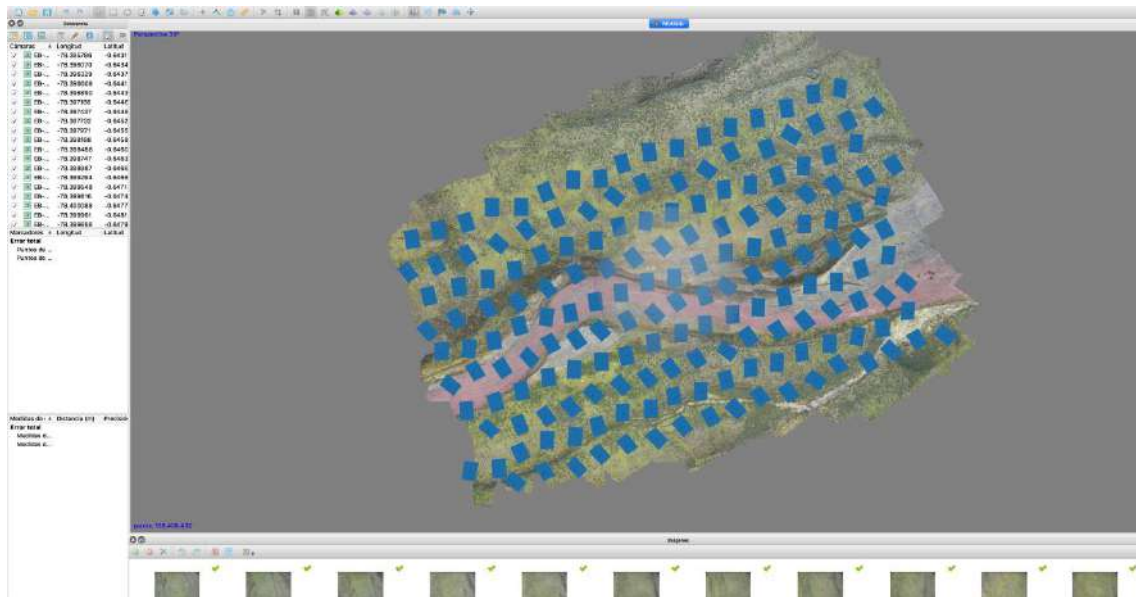


Fig. 3. 31 Procedimiento para conformar una ortofotografía: nube densa de puntos, además se observa las fotografías tomadas en la Q. Jatabamba.

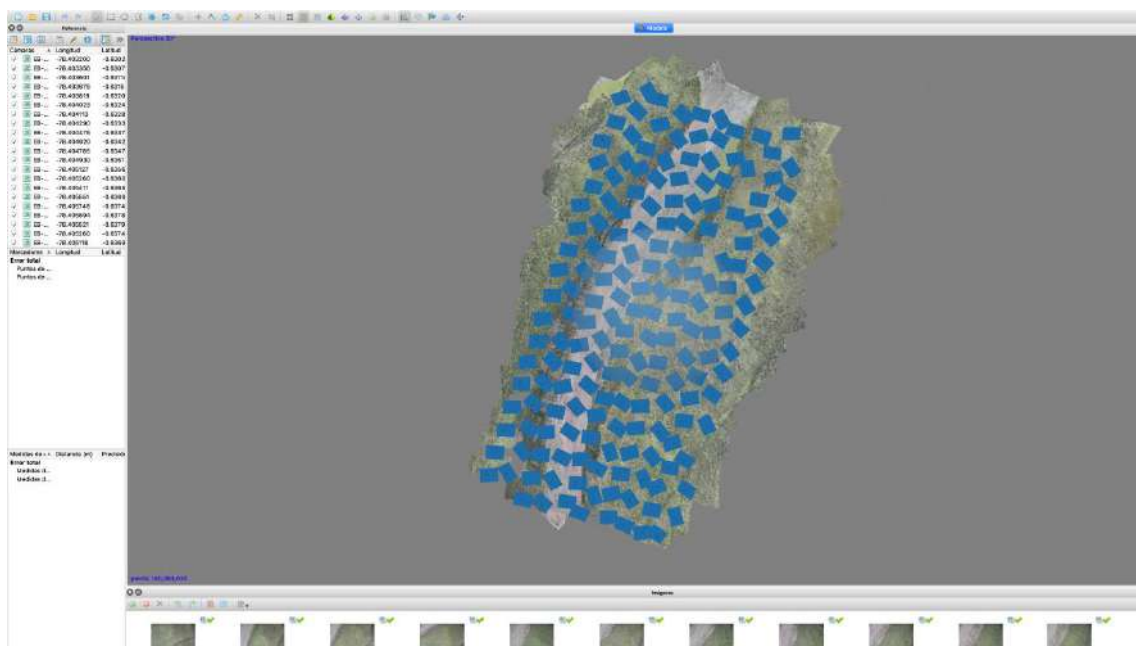


Fig. 3. 32 Procedimiento para conformar una ortofotografía: nube densa de puntos, además se observa las fotografías tomadas en la Q. Pucarumi.

3.3.4 PROCEDIMIENTO PARA LA CARTOGRAFÍA DE LAS ORTOFOTOGRAFÍAS

Una vez obtenidas las ortofotografías correspondientes en las quebradas Jatabamba y Pucarumi, se procede a georeferenciarlas en el software ArcMap del paquete ArcGis.

Para ello, se utiliza los puntos de referencia establecidos en el campo como ya se detalló (Capítulo 3.3.2) (Fig. 3. 33).

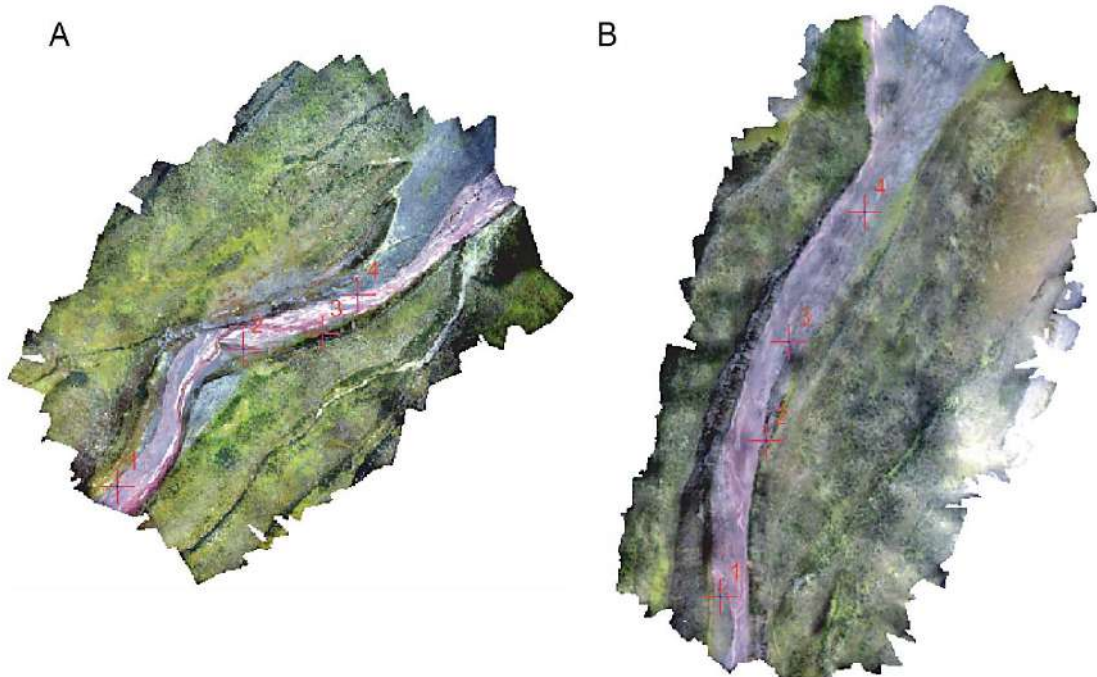


Fig. 3. 33 Georeferenciación. Asignación y distribución de todos los puntos de referencia en la Q. Jatabamba (A) y en la Q. Pucarumi (B).

Es importante comprobar que la georeferenciación se realizó de manera óptima comparando dos imágenes y verificando que exista poca variación de posición (menos de 2-3 píxeles) de objetos (típicamente rocas fuera del cauce) entre una imagen con respecto a la otra .

Para la cartografía fue primordial tomar en cuenta cuatro aspectos que facilitaron el proceso de identificación de los lahares ocurridos:

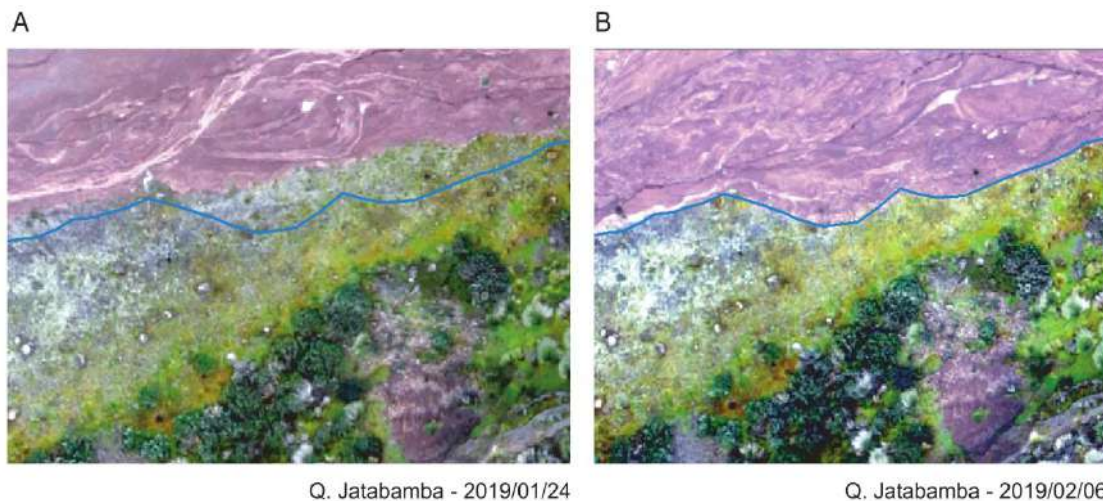
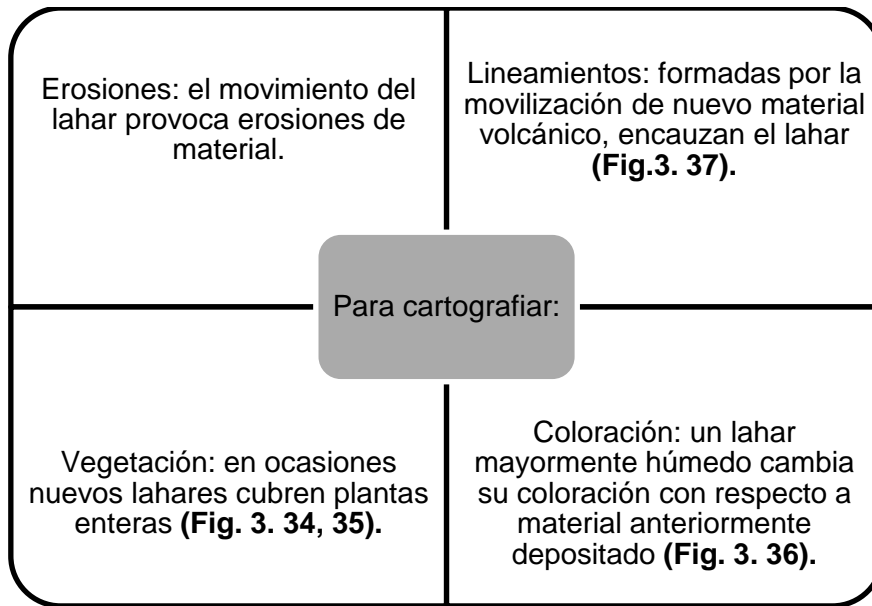


Fig. 3. 34 Evidencia de cómo la vegetación ayuda a la cartografía. Se muestra detalles de ortofotografías de la Q. Jatabamba realizadas con la cámara S.O.D.A. el (A) 24 de enero de 2019 y (B) 6 de Febrero de 2019. Se nota claramente que el lahar cubrió la vegetación.

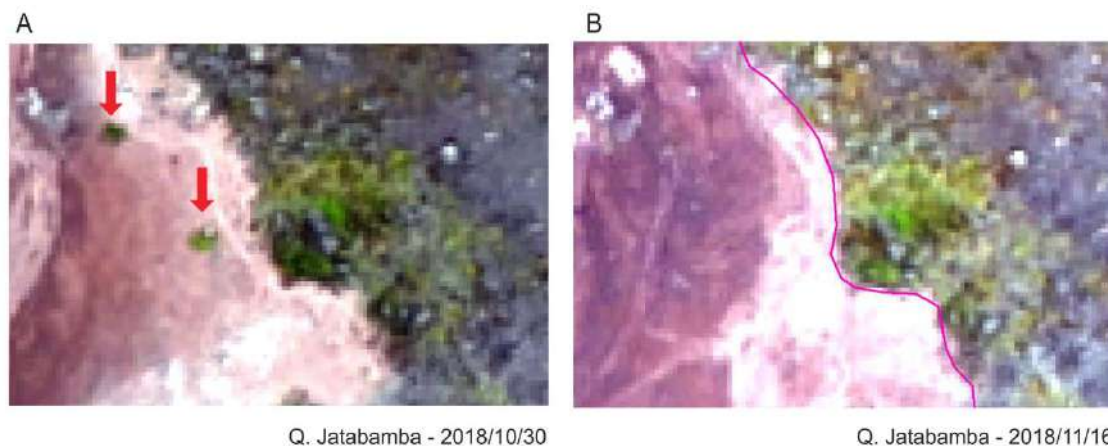


Fig. 3. 35 Evidencia de cómo la vegetación ayuda a la cartografía. Se muestra detalles de ortofotografías de la Q. Jatabamba realizadas con la cámara S.O.D.A. el

(A) 30 de octubre de 2018, y (B) 16 de noviembre de 2018. Se nota claramente que el lahar cubrió por completo a las plantas.

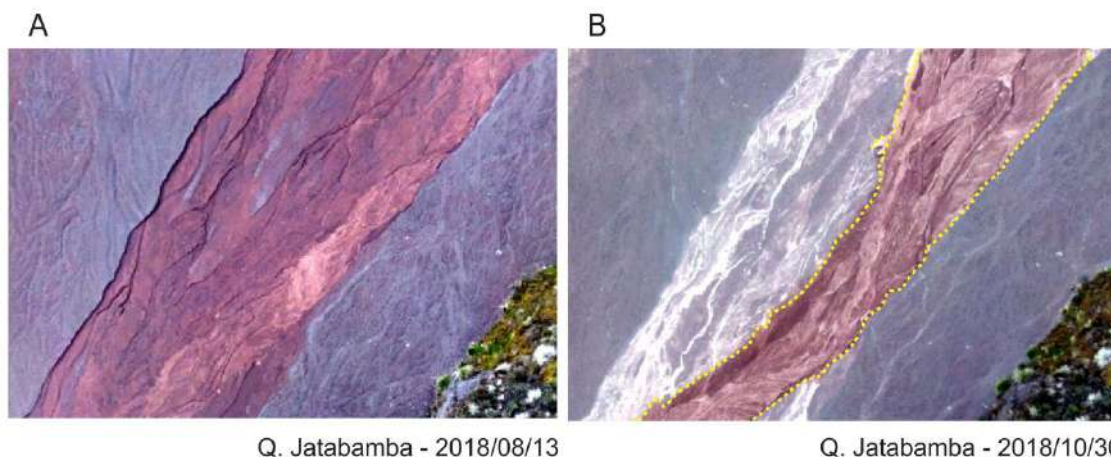


Fig. 3. 36 Evidencia de cómo la coloración ayuda a la cartografía. Se muestra ortofotografías de la Q. Jatabamba realizadas con la cámara S.O.D.A. el (A) 13 de agosto de 2018, y (B) 30 de octubre de 2018.

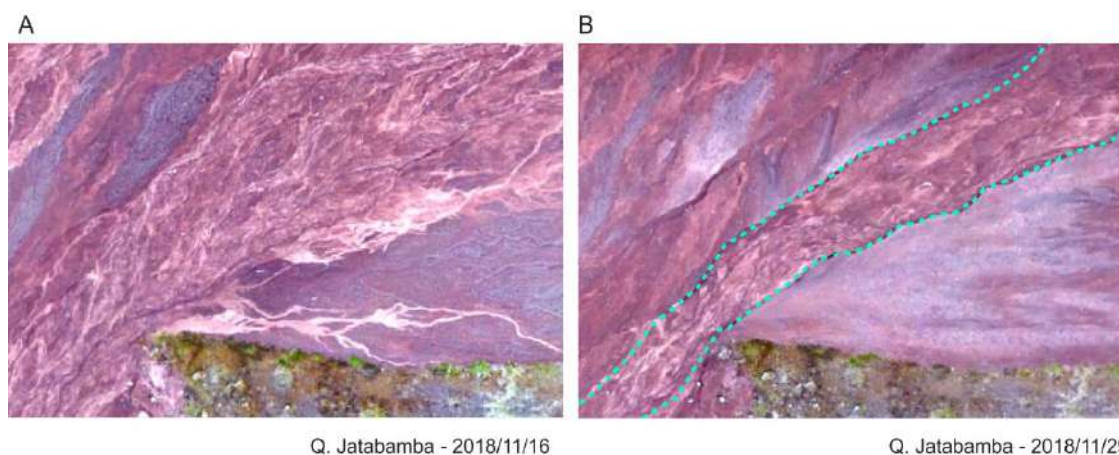
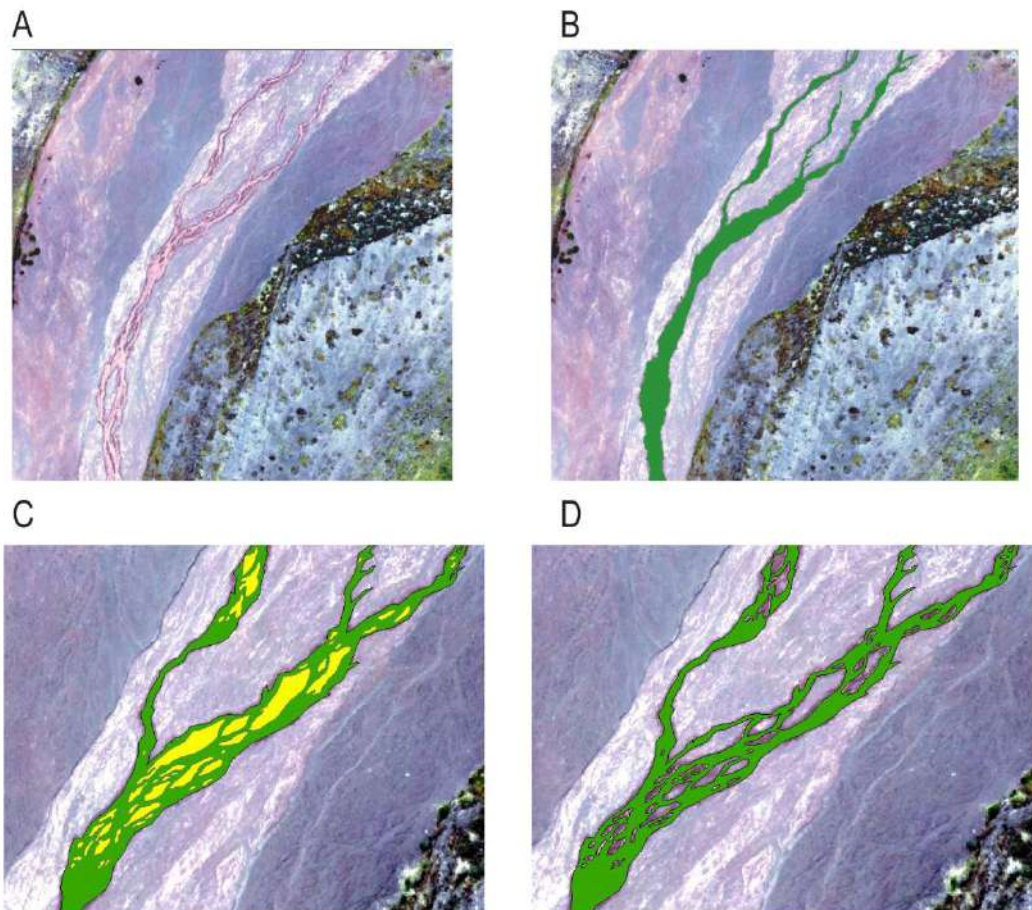


Fig. 3. 37 Evidencia de cómo los lineamientos ayudan a la cartografía. Se muestra ortofotografías de la Q. Jatabamba realizadas con la cámara S.O.D.A. el (A) 16 de noviembre de 2018, y (B) 29 de noviembre de 2018.

La cartografía en el software ArcMap 10.4.1 consiste en una examinación a detalle de las ortofotografías obtenidas en campo con la ayuda de herramientas del mismo software, siguiendo los siguientes pasos (Fig. 3. 38):



E

FID	Shape	Id	AREA
0	Polygon	0	2039,192915

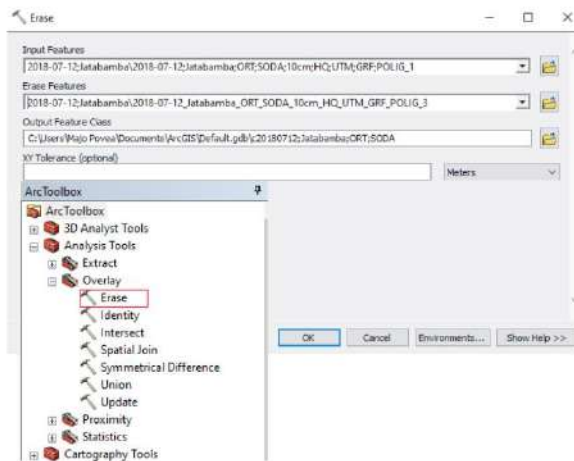


Fig. 3. 38 Pasos para la cartografía en ArcMap 10.4.1. Ortofotografía del 12 de julio de 2018. (A) Vista preliminar. (B) Creación de un polígono total en color verde. (C) Creación de polígonos a manera de huecos en color amarillo. (D) Resta de los polígonos anteriores mediante herramienta Erase. (E) Cálculo de área.

- A. Vista preliminar de la ortofotografía.
- B. Crear un polígono que encierre todo lo que punto a punto valoramos como el nuevo lahar secundario. Para ello se soporta en los cuatro aspectos ya mencionados.

- C. No todo lo encerrado en el primer polígono es parte del lahar secundario que se desea mapear, ya que en ocasiones hay zonas internas que no fueron afectadas por el flujo más reciente. Entonces se procede a realizar una segunda capa de polígonos que incluya los sitios que se considera que no corresponden al lahar más actual en la quebrada.
- D. Se ingresa al ArcToolbox, en la pestaña Analysis Tools, Overlay y se escoge la opción Erase. Esta herramienta permitirá restar la capa del primer polígono que engloba todo el lahar secundario menos la capa conformada por varios polígonos en forma de huecos de material que no corresponde al lahar más actual para así determinar su extensión real.
- E. A través del polígono final, se determina el área de extensión del lahar secundario. Para esto se creó una nueva columna en la tabla de atributos que calcule el área en base a la geometría del polígono.

3.4 PRECIPITACIÓN

Los datos de precipitaciones a lo largo de todo el período de tiempo de duración del trabajo de titulación fueron obtenidos a través de la página web del Fondo para la protección del agua (FONAG). El objetivo de estos datos es ser analizados y de ser posible relacionados con la ocurrencia de lahares secundarios en las quebradas Jatabamba y Pucarumi.

3.4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

La recolección de datos pluviométricos será de la estación M5076, que es la más cercana a nuestra zona de estudio (Fig. 3. 39). Para ello se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- A. Los datos de precipitación serán recolectados de la página web oficial del FONAG (<http://www.fonag.org.ec>), ingresando a la opción “Información hidrometeorológica” (Fig. 3. 40A.1) y posteriormente el ítem “Consultas por período” (Fig. 3. 40A.2).

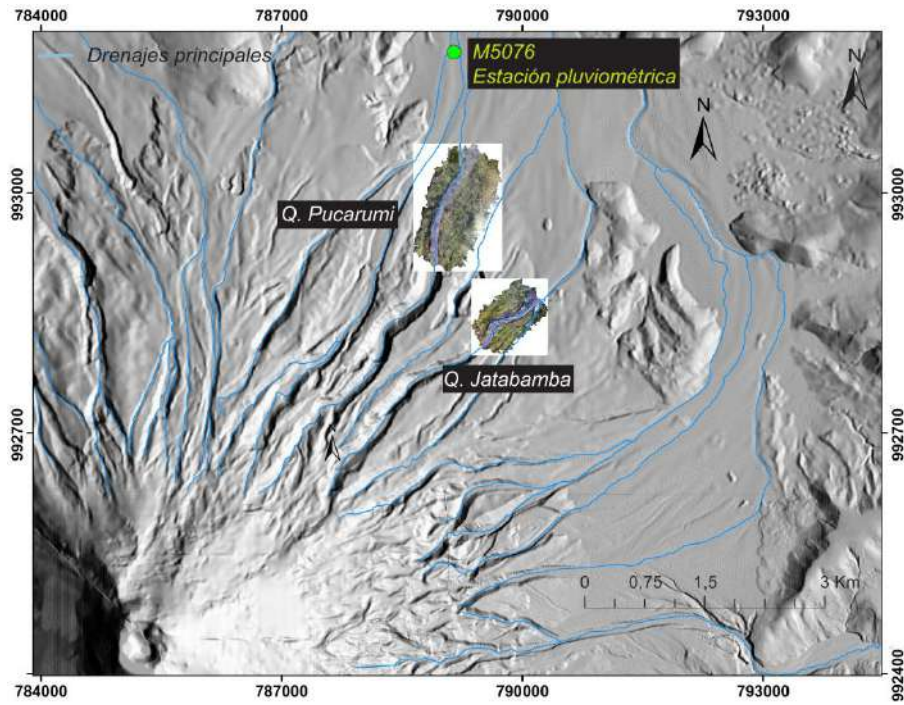


Fig. 3. 39 Mapa de ubicación de la estación M5076 del FONAG en relación a las zonas de estudio.



Fig. 3. 40 A.1 Ingresar a la página web oficial del FONAG e ingresar a "Información Hidroclimática". A.2 Escoger la alternativa "Consultas por período".

B. En esta nueva ventana que se abrirá se podrá elegir el nombre de la estación de dónde serán extraídos los datos (M5076), la variable, el período de tiempo (mayo de 2018 hasta julio de 2019) y la frecuencia de los datos que deseamos, en este caso diaria. También nos mostrará la ubicación espacial de la estación, en este caso pluviométrica (Fig. 3. 41). Dando click en la opción “Exportar” los datos serán descargados como un documento tipo excel.

Consultas por periodo

Información: Esta consulta le permite obtener información de una variable asociada a una estación en un periodo de fechas determinado.

Fig. 3. 41 Tabla de datos a llenarse para la adquisición de datos pluviométricos y mapa de ubicación de la estación M5076.

3.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS

En la base de datos descargada la información incluye la fecha y la cantidad de precipitación registrada en milímetros se realizarán gráficas de acumulación de lluvias para ambas quebradas, esto permitirá tener una idea de los períodos de lluvia generados en el período de tiempo estudiado y conocer si las lluvias más grandes fueron desencadenantes de lahares secundarios. Para ello se revisó los valores más altos de precipitación en cada período de tiempo de cada quebrada.

En base a las fechas en que fueron tomadas las fotografías en cada una de las quebradas, los milímetros de lluvia serán sumados de manera acumulada (Fig. 3. 42). Es decir, en el período de tiempo que pase entre una y otra fotografía, realizaremos la suma de milímetros de lluvia diaria. Esto permitirá tener una idea de la cantidad de lluvia en cierto período de tiempo, en comparación con los datos de superficie previamente obtenidos en la cartografía representados en una gráfica de dispersión,

con lo que se espera entender el rol de las precipitaciones durante la formación de lahares secundarios en el volcán Cotopaxi.

FECHAS DE ORTOFOTOGRAFÍAS	FECHAS DE LAHARES	AREA (m2)	INTERVALO FECHAS	SUMA PRECIPITACIÓN (mm)	N° de valores altos
17/5/2018 (dato base)	17/5/2018	31604,76			
12/7/2018	12/7/2018	2039,19291	17/05/2018 - 12/07/2018	60,7	0
26/7/2018	26/7/2018	7741,49061	13/07/2018 - 26/07/2018	8,2	0
13/8/2018	13/8/2018	3199,18312	27/07/2018 - 13/08/2018	57,5	3
30/10/2018	30/10/2018	10258,1192	14/08/2018 - 30/10/2018	165,6	3
16/11/2018	16/11/2018	12799,5449	31/10/2018 - 16/11/2018	69,1	4
29/11/2018	29/11/2018	4835,41103	17/11/2018 - 29/11/2018	54,9	3
13/12/2018	13/12/2018	762,026973	30/11/2018 - 13/12/2018	16,8	0
24/1/2019	24/1/2019	2725,66387	14/12/2018 - 24/01/2019	41	0
6/2/2019	6/2/2019	27847,0455	25/01/2019 - 06/02/2019	25,5	1
18/4/2019	18/4/2019	20715,996	07/02/2019 - 18/04/2019	197,6	8
8/5/2019	8/5/2019	36325,4206	19/04/2019 - 08/05/2019	42,9	1

Fig. 3. 42 Tratamiento de datos de pluviometría y correlación con el área de lahares secundarios.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 GRANULOMETRÍA

4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAHARES SECUNDARIOS

Se tomaron 3 muestras de depósitos de lahares en cada quebrada (Fig. 4. 1). A todas las muestras se les aplicó la metodología de análisis granulométrico presentada en el capítulo 3.1.

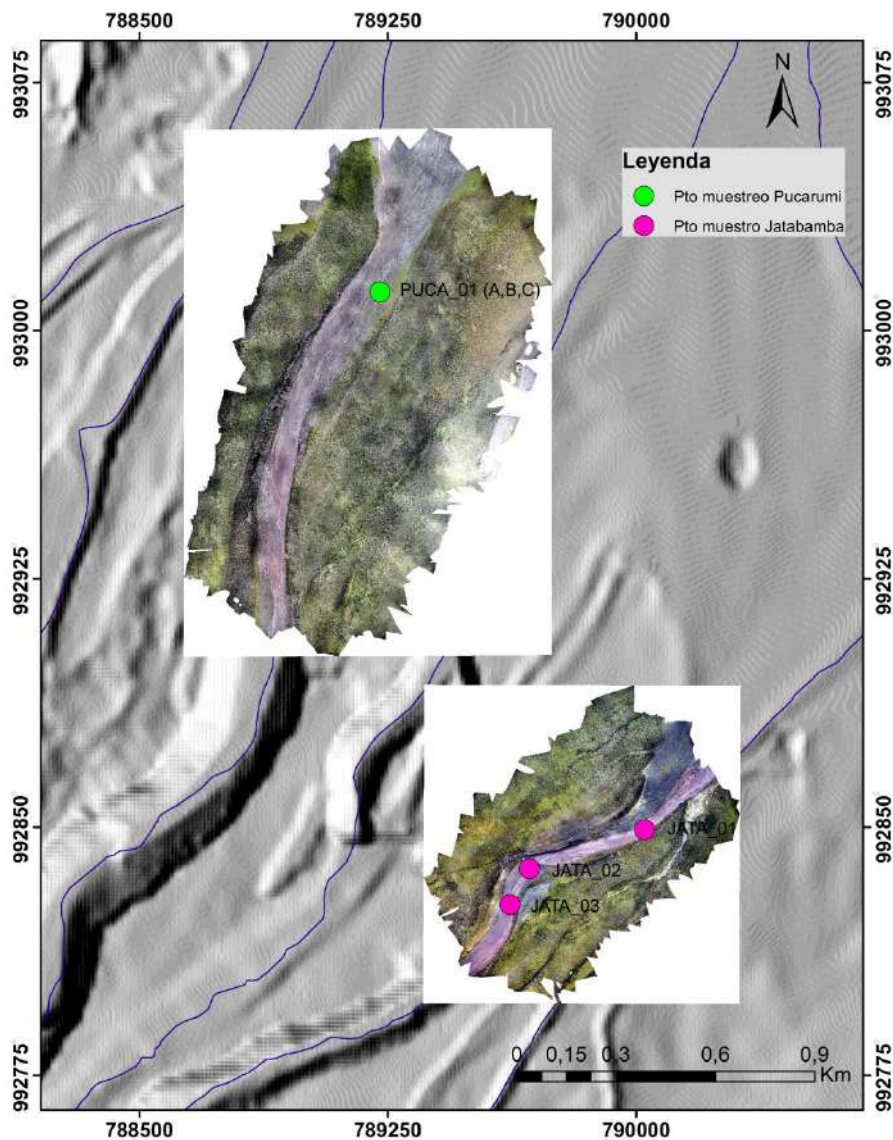


Fig. 4. 1 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo para las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.

De acuerdo a los análisis de tamaño de grano en escala de Phi todas las muestras presentan una distribución unimodal. Todas las muestras de la Quebrada Jatabamba exhiben histogramas con una distribución sesgada a la izquierda (Fig. 4. 2A-C), es

decir con una asimetría negativa que muestra una mayor abundancia en los tamaños de grano más finos. Dos de las muestras de la Quebrada Pucarumi también tienen distribuciones sesgadas a la izquierda (Fig. 4. 2D, E), y en un caso no se observa un pico claramente definido (Fig. 4. 2F), por lo que podría considerarse también un caso de distribución rectangular.

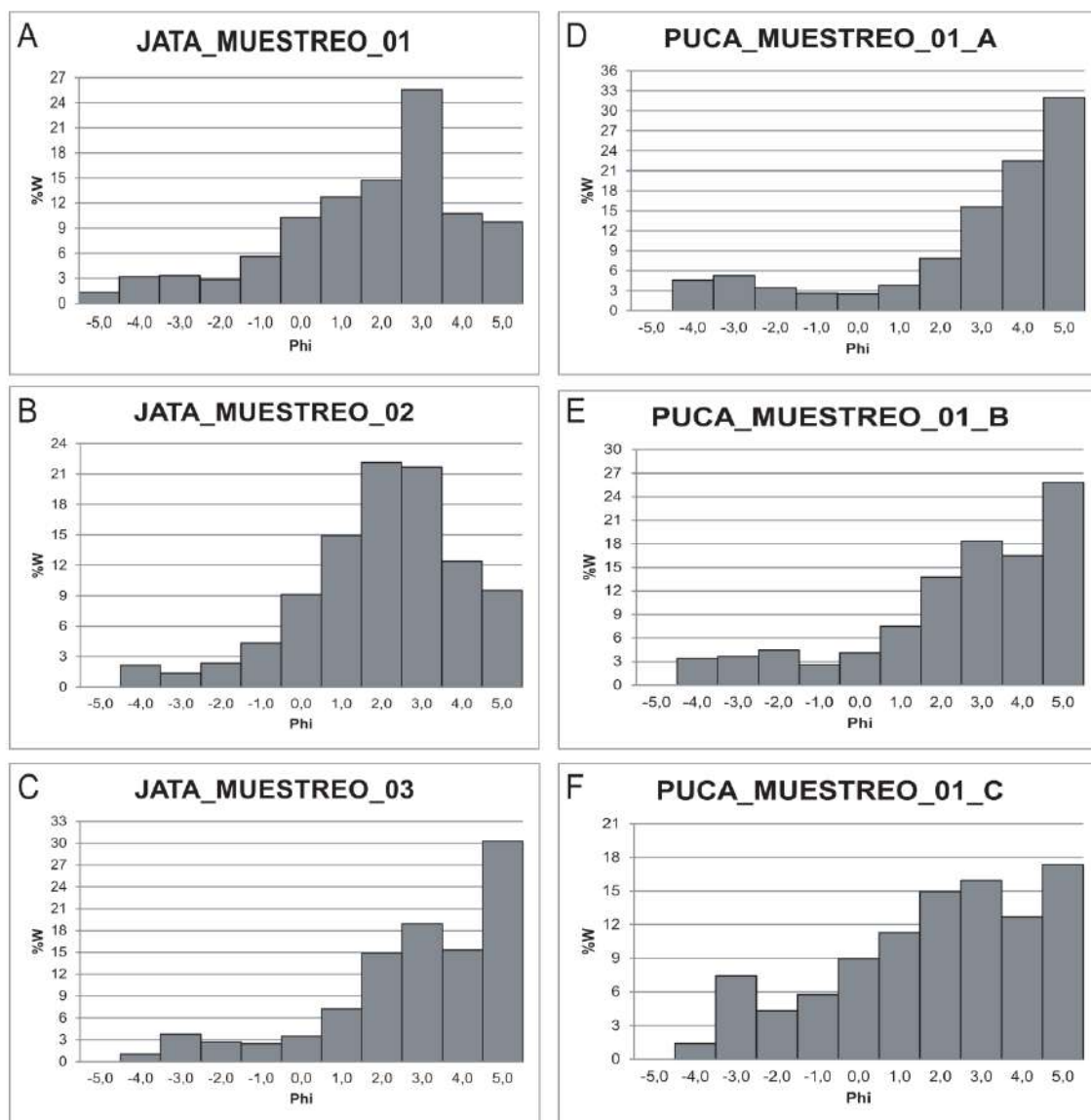


Fig. 4. 2 Histogramas de distribución para la Q. Jatabamba (A-C) y la Q. Pucarumi (D-F). %W= porcentaje en peso. Phi= escala del tamaño de grano.

Para la Quebrada Jatabamba la moda de las gráficas se encuentra entre ~22 ϕ a 30 ϕ , y para la Quebrada Pucarumi entre ~17 ϕ a 32 ϕ . Como información adicional, para la Quebrada Jatabamba, la muestra más vieja (JATA_MUESTREO_01) presenta una distribución en su mayoría con menor contenido de finos, a diferencia de la más joven (JATA_MUESTREO_03) que claramente presenta la tendencia a ser enriquecida en finos. La muestra de edad de depositación intermedia (JATA_MUESTREO_02) tiene el

mayor % W en partículas finas de igual forma, de 2ϕ a 3ϕ , pero no muestra una tendencia creciente hacia la izquierda hasta el final.

Las muestras de la Quebrada Pucarumi son en general, más semejantes entre sí. Las tablas de datos completos resultado de la granulometría para cada muestra se encuentran en los Anexo I Anexo II.

La información de los histogramas se complementa con los datos procesados en el software SFT que proporcionan los parámetros estadísticos gráficos (Tabla 4. 1) que permitirán su clasificación según Folk (1980).

Muestra	Parámetros estadísticos								
	Mz	Sigma- I		QD- phi	SkI	Skq Phi	KG		
Quebrada Jatabamba									
JATA_MUESTREO_01	1,32	2,38	Extremadamente pobrememente sorteado	1,5	-0,3	Negativa	-0,4	1,14	Leptocúrtica
JATA_MUESTREO_02	1,57	1,98	Pobrememente sorteado	1,25	-0,16	Negativa	-0,1	1,11	Leptocúrtica
JATA_MUESTREO_03	2,53	2,19	Extremadamente pobrememente sorteado	1,43	-0,31	Muy negativa	-0,02	1,12	Leptocúrtica
Quebrada Pucarumi									
PUCA_MUESTREO_01_A	2,23	2,69	Extremadamente pobrememente sorteado	1,38	-0,58	Muy negativa	-0,43	1,32	Leptocúrtica
PUCA_MUESTREO_01_B	2,13	2,49	Extremadamente pobrememente sorteado	1,58	-0,36	Muy negativa	-0,12	1,09	Mesocúrtica
PUCA_MUESTREO_01_C	1,42	2,64	Extremadamente pobrememente sorteado	1,88	-0,21	Negativa	-0,18	0,9	Leptocúrtica

Tabla 4. 1 Parámetros estadísticos gráficos de (Folk, 1980) en las quebradas Jatabamba y Pucarumi. Mz: media. Sigma-I: desviación estándar gráfica inclusiva (sorteo). QD-phi: desviación de cuartil. SkI: asimetría inclusiva gráfica. KG: curtosis gráfica.

Quebrada Jatabamba

Los valores de la media se encuentran entre 1,32 y 2,53; en base a su desviación estándar también podemos conocer que el sorteo de los depósitos es extremadamente pobrememente sorteado, lo cual es constatado con los histogramas. El valor negativo de su asimetría también confirma la forma de los histogramas, es una distribución negativa, es decir con tendencia a la izquierda. Para finalizar, los valores de curtosis clasifican como un tipo de curtosis leptocúrtica en todos los casos.

Quebrada Pucarumi

Los valores de la media se encuentran entre 1,42 y 2,23; en base a su desviación estándar podemos conocer que el sorteo de los depósitos es extremadamente pobremente sorteado. De nuevo, los valores de asimetría confirman la distribución negativa con la forma muy marcada de los histogramas. Finalmente, los valores de curtosis clasifican a dos muestras como leptocúrtica y un caso de mesocúrtica.

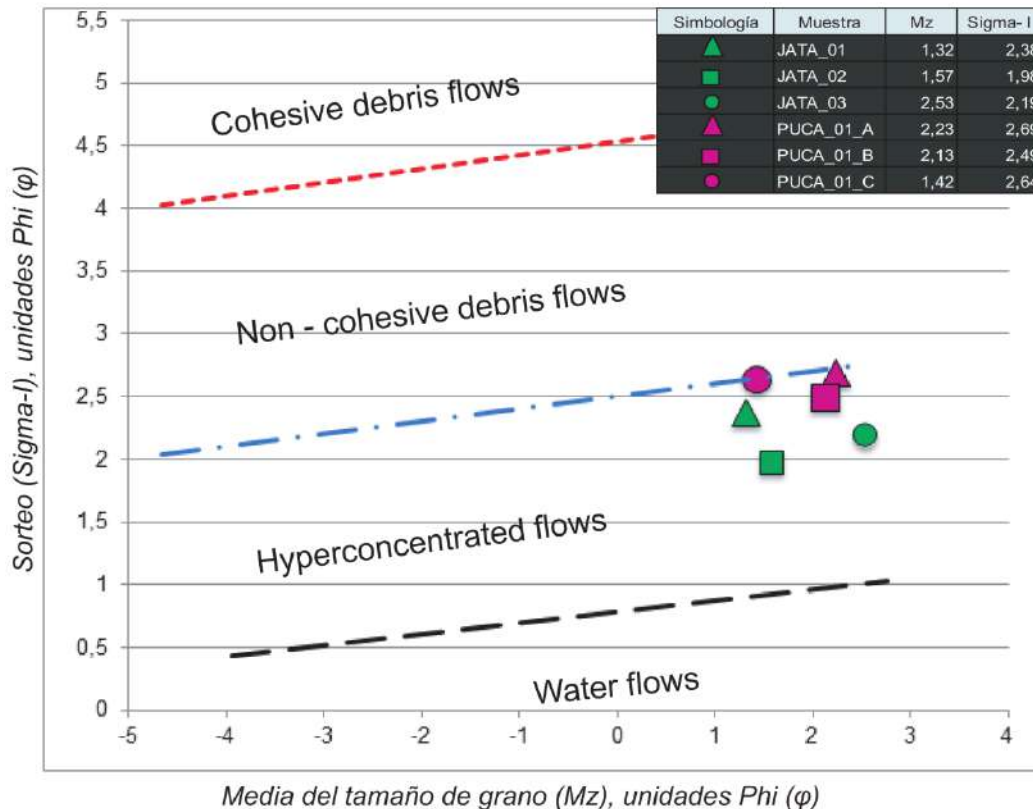


Fig. 4. 3 Método de clasificación de flujos de lahares secundarios propuesto por Pierson and Scott (1999) para la Q. Jatabamba y Pucarumi.

Consolidando toda la información se puede evidenciar que las muestras tomadas en ambas quebradas corresponden a depósitos de flujos hiperconcentrados, casi en el límite de flujos de escombros no-cohesivos, según la clasificación de Pierson y Scott (1999) (Fig. 4. 3). Esto es concordante con su origen a partir de lahares secundarios.

4.1.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES

El análisis de componentes fue realizado en base a la Tabla 3. 3. Primero se presentan las tablas de resultados para las fracciones $1\ \phi$ (ó 0,5 mm) y posteriormente para $-1\ \phi$ (ó 2 mm), producto del conteo de componentes de manera aleatoria de las muestras, tanto para la Quebrada Jatabamba (Tabla 4. 2, Tabla 4. 4), como para la Quebrada Pucarumi (Tabla 4. 3, Tabla 4. 5):

1 φ ó 0,5 mm

Muestra	VR	VN	VB	NVR	NVN	NVG	CR	MO	% VES	%NO VES	% CR	%MO
JATA_01	87	59	8	74	71	4	56	2	42,66	41,27	15,51	0,55
JATA_02	87	96	14	33	42	7	43	0	61,18	25,47	13,35	0,00
JATA_03	85	31	38	66	43	6	36	7	49,36	36,86	11,54	2,24

Tabla 4. 2 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Jatabamba para la fracción de 1 φ. VR= Vesiculadas rojas. VN= Vesiculadas negras. VB= Vesiculadas Blancas. NVR= No vesiculadas rojas. NVN= No vesiculadas negras. NVG= No vesiculadas grises. CR= Cristales. MO= Materia orgánica.

Muestra	VR	VN	VB	NVR	NVN	NVG	CR	MO	% VES	%NO VES	% CR	%MO
PUCA_01_A	105	82	17	12	47	11	31	6	65,59	22,51	9,97	1,93
PUCA_01_B	47	64	8	27	68	5	95	3	37,54	31,55	29,97	0,95
PUCA_01_C	83	85	24	18	44	8	47	2	61,74	22,51	15,11	0,64

Tabla 4. 3 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Pucarumi para la fracción de 1 φ. VR= Vesiculadas rojas. VN= Vesiculadas negras. VB= Vesiculadas Blancas. NVR= No vesiculadas rojas. NVN= No vesiculadas negras. NVG= No vesiculadas grises. CR= Cristales. MO= Materia orgánica.

-1 φ ó 2 mm

Muestra	VR	VN	VB	NVR	NVN	NVG	CR	MO	% VES	%NO VES	% CR	%MO
JATA_01	94	160	24	1	3	19	0	0	92,36	7,64	0	0,00
JATA_02	109	151	9	3	12	27	0	2	85,94	13,42	0	0,64
JATA_03	90	107	75	2	8	6	0	12	90,67	5,33	0	4,00

Tabla 4. 4 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Jatabamba para la fracción de -1 φ. VR= Vesiculadas rojas. VN= Vesiculadas negras. VB= Vesiculadas Blancas. NVR= No vesiculadas rojas. NVN= No vesiculadas negras. NVG= No vesiculadas grises. CR= Cristales. MO= Materia orgánica.

Muestra	VR	VN	VB	NVR	NVN	NVG	CR	MO	% VES	%NO VES	% CR	%MO
PUCA_01_A	141	154	16	0	2	1	0	3	98,11	0,95	0	0,95
PUCA_01_B	110	113	63	0	7	17	0	0	92,26	7,74	0	0,00
PUCA_01_C	143	139	24	1	1	5	0	3	96,84	2,22	0	0,95

Tabla 4. 5 Resultados del análisis de componentes cuantitativo en la Q. Pucarumi para la fracción de -1 ϕ . VR= Vesiculadas rojas. VN= Vesiculadas negras. VB= Vesiculadas Blancas. NVR= No vesiculadas rojas. NVN= No vesiculadas negras. NVG= No vesiculadas grises. CR= Cristales. MO= Materia orgánica.

A través de estos resultados se obtuvieron gráficas de porcentajes que faciliten la visualización de datos y nos permitan compararlos (Fig. 4. 4). En las gráficas se han utilizado las siguientes clases: componentes vesiculados (VES), componentes no vesiculados (NO VES), cristales (CR) y materia orgánica (MO).

Los componentes no vesiculados correspondían en su mayoría a rocas de tipo andesítico, más abundantes en la fracción más fina de 1 ϕ . Esto proporciona información sobre el material que están erosionando los lahares desde su fuente y durante su movimiento, además de la energía de arrastre, que en este caso no serán tan grande.

Los componentes vesiculados corresponden a pómez y escórias que son los más abundantes en todas las muestras, en la fracción gruesa y fina; siendo más evidente en la gruesa. No requieren de una energía de arrastre tan grande para ser transportadas al ser menos densas, a esto se debe su cantidad predominante en la fracción gruesa. Además al ser fácilmente erosionables, su tamaño disminuye con sencillez y se deforman.

El resultado principal que se observa de la Fig. 4. 4 es que claramente el análisis de componentes muestra una similitud entre la Quebrada Jatabamba y la Quebrada Pucarumi. Es decir, la fuente de material que es erosionado para la formación de los lahares secundarios es la misma para las dos quebradas.

Y la principal diferencia que se puede visualizar es que la de fracción de -1 ϕ carece de presencia de cristales en sus componentes, y se asume que es un producto de la meteorización y el transporte. Los cristales principales observados fueron: plagioclasa, piroxeno y vidrio volcánico.

Como el color que tienen los lahares secundarios en las quebradas de la zona de estudio es rojizo muy característico, los grupos de componentes vesiculados y no vesiculados fueron divididos y contabilizados en sub-categorías, como indican las tablas anteriores, ya que evidentemente podrían ser clasificados de esa manera (Fig. 4. 5). Mediante estos datos, se realizarán gráficas de pastel.

1 φ ó 0,5 mm

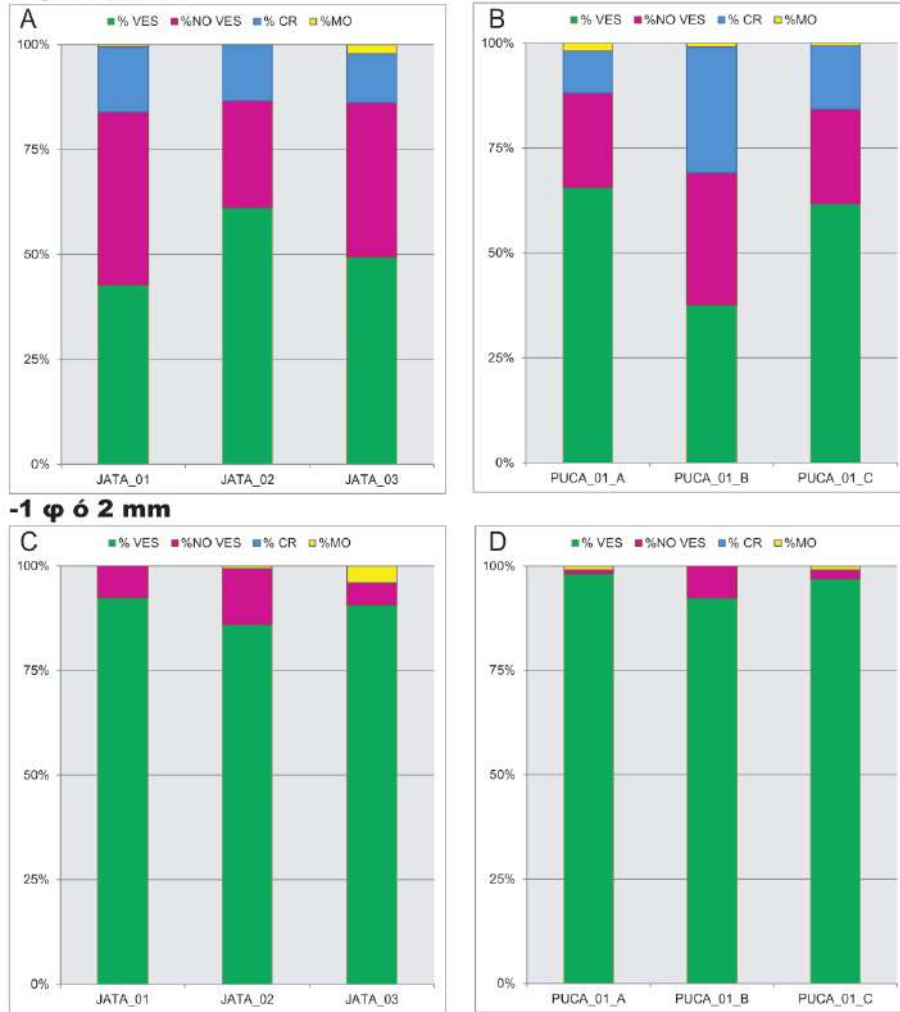


Fig. 4. 4 Resultados de análisis de componentes representados en gráficas de columnas apiladas para las fracciones de 1 φ (A,B) y -1 φ (C,D) para la Q. Jatabamba y Q. Pucarumi.



Fig. 4. 5 Componentes vesiculados del análisis de componentes cuantitativa de la Q. Jatabamba, muestra JATA_MUESTREO_01, fracción -1 φ. Sub-categorías por colores blanco (crema), rojo y negro.

Los resultados de los componentes vesiculares y no vesiculares fueron sumados para obtener porcentajes por colores (Fig. 4. 6). Para la fracción más fina de 1ϕ la abundancia del color rojo es mayor, con relación a la fracción más gruesa, el contenido de componentes de color rojo están entre 51% y 39%. En cambio para la fracción gruesa de -1ϕ el color predominante es el negro, con un aumento notable en los colores claros; el contenido de componentes de color rojo está entre 42% y 33%.

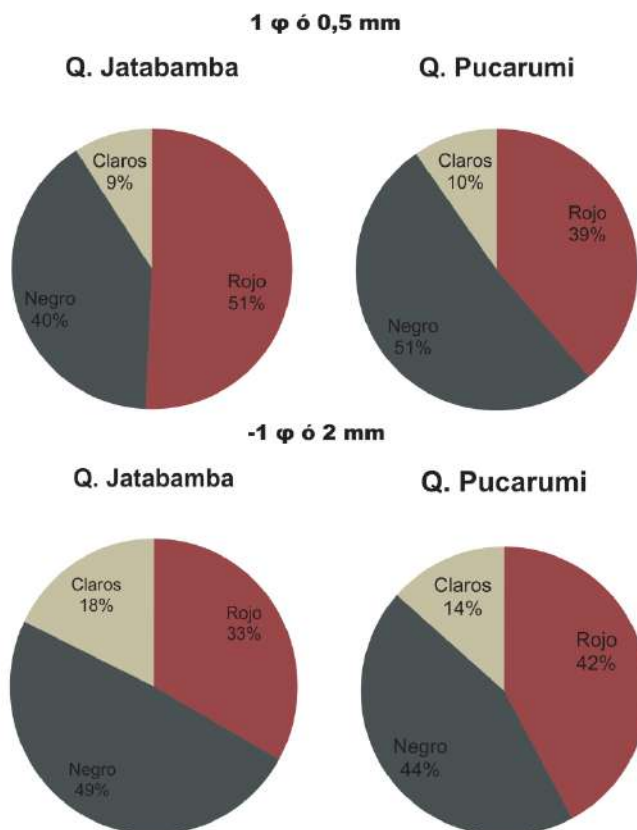


Fig. 4. 6 Sub-categorías por colores en el análisis de componentes de las fracciones de 1ϕ y -1ϕ para los componentes vesiculados y no vesiculados.

Como resultado se determinó que la subdivisión por colores de los componentes muestra, al igual que el análisis de componentes (Fig. 4. 4), una distribución muy similar para las Quebradas Jatabamba y Pucarumi en ambas fracciones. Es decir, la fuente de material que está siendo erosionado es la misma para las dos quebradas.

4.2 RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR)

Los radargramas analizados e interpretados, se presentarán con el mapa de ubicación de los perfiles realizados en campo, tanto para la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 7) como para la Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 8).

En general, la interpretación de los radargramas no fue compleja, debido a su concordancia con las observaciones hechas en superficie del contacto con el depósito de 1877. La zona interpretada como el relleno de los lahares secundarios se caracteriza por tener varios reflectores pequeños, más o menos fuertes y discontinuos (Fig. 4. 7 y Fig. 4. 8).

En la Quebrada Jatabamba se puede observar que la parte más próxima a la cabecera de la quebrada y la central son las que mayores espesores muestran (Fig. 4. 7J8, J6), siendo más evidente en el perfil J6 donde se observan espesores de hasta 8 m. En los perfiles aguas abajo el espesor parece ir disminuyendo como se observa en el perfil J13 donde hay espesores de 6,6 m aguas arriba y de 2,6 m aguas abajo. Finalmente en la parte más baja los espesores están alrededor de 5 m (Fig. 4. 7J3).

En el caso de la Quebrada Pucarumi los espesores se mantienen un poco más constantes en toda la extensión, alcanzando hasta los 5,6 m (Fig. 4. 8P2, P9, P11). El perfil P6, que va aguas abajo, muestra un espesor de 2,7 m aguas arriba y 4 m aguas abajo (Fig. 4. 8P6). Se debe conocer que en el caso de algunos perfiles no se pudo identificar el contacto con el depósito del lahar de 1877 en superficie, como es el caso del perfil P11, por lo que la interpretación de los radargramas respectivos se basó en las observaciones hechas en los perfiles adyacentes.

Todos los radargramas interpretados pueden observarse en el Anexo III para la Quebrada Jatabamba y Anexo IV para la Quebrada Pucarumi.

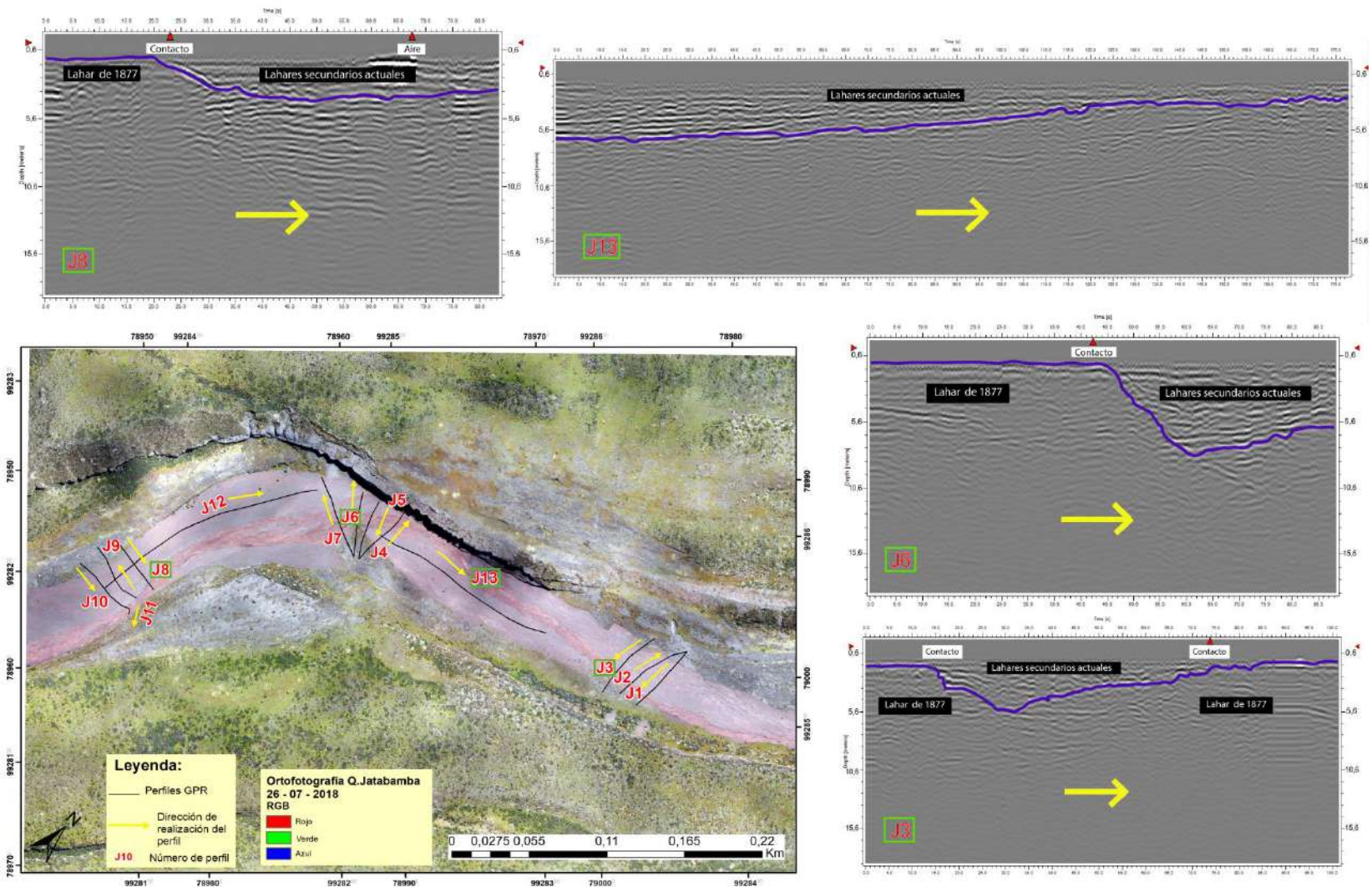


Fig. 4. 7 Mapa de perfilajes con GPR en campo con los radargramas más representativos de toda la Quebrada Jatabamba.

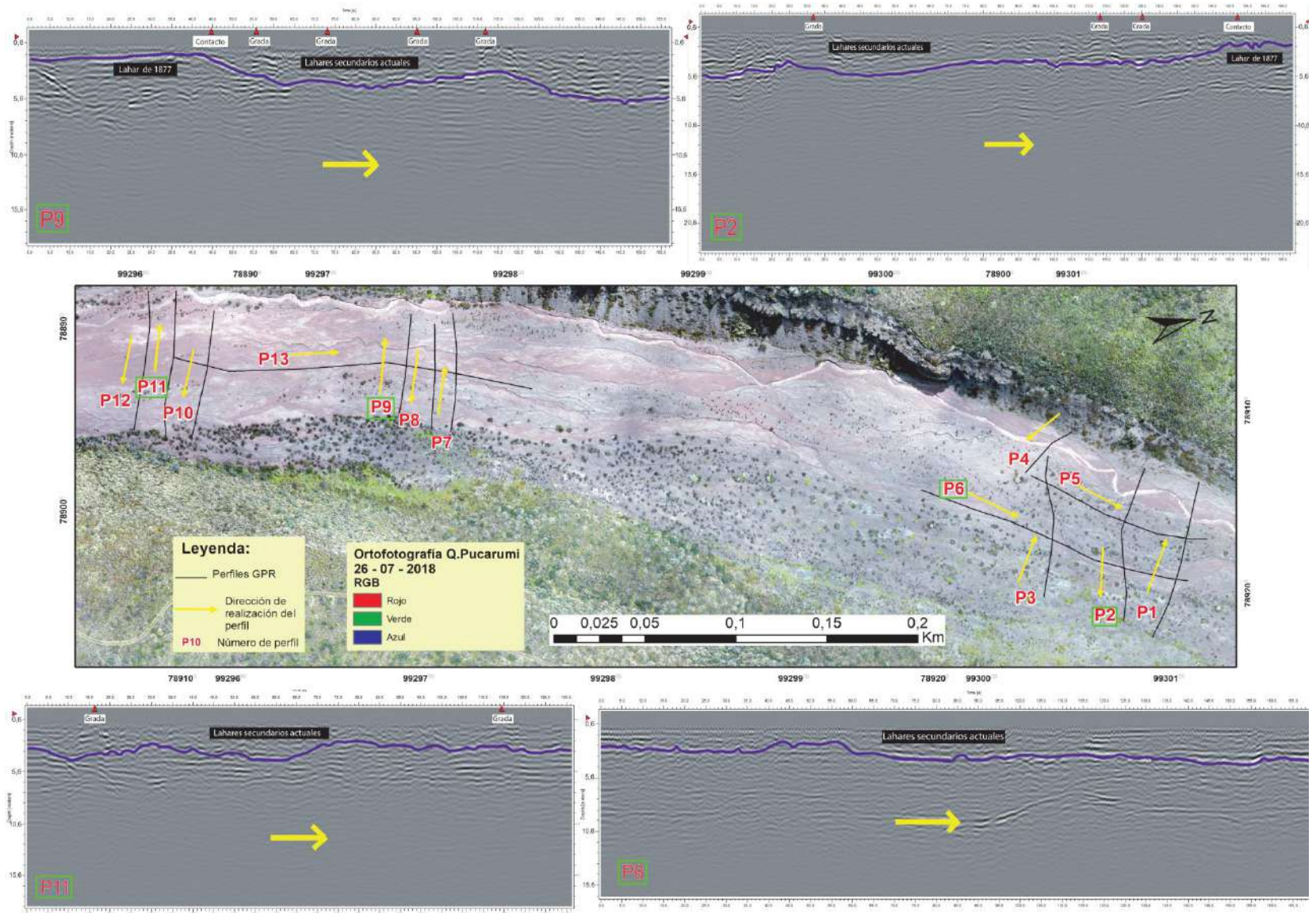


Fig. 4. 8 Mapa de perfilajes con GPR en campo con los radargramas más representativos de toda la Quebrada Pucarumi.

4.3 MAPA DE PUNTOS DE ESPESOR

Los valores de espesor medidos mediante los radargramas fueron tratados geoestadísticamente con el fin de obtener mapas de espesores en las zonas estudiadas. En este caso, el método estadístico empleado fue la interpolación de puntos mediante el kriging empleando las tablas de datos de los Anexo V y VI que contienen las coordenadas de georeferenciación en X y Y en UTM, nombre del perfil y el espesor medido según lo descrito en la metodología (ver capítulo 3.2).

Dentro de las tablas de Anexos, se consideró también los límites que presentan los lahares secundarios dentro de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi, teniendo como valor 0 m en el atributo del espesor de ellos (Figs. 4. 9 y 4. 10)

En base a los valores espacialmente localizados en la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 9) y Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 10) fueron elaborados tres modelos de kriging para ser interpretados como se muestra a continuación.

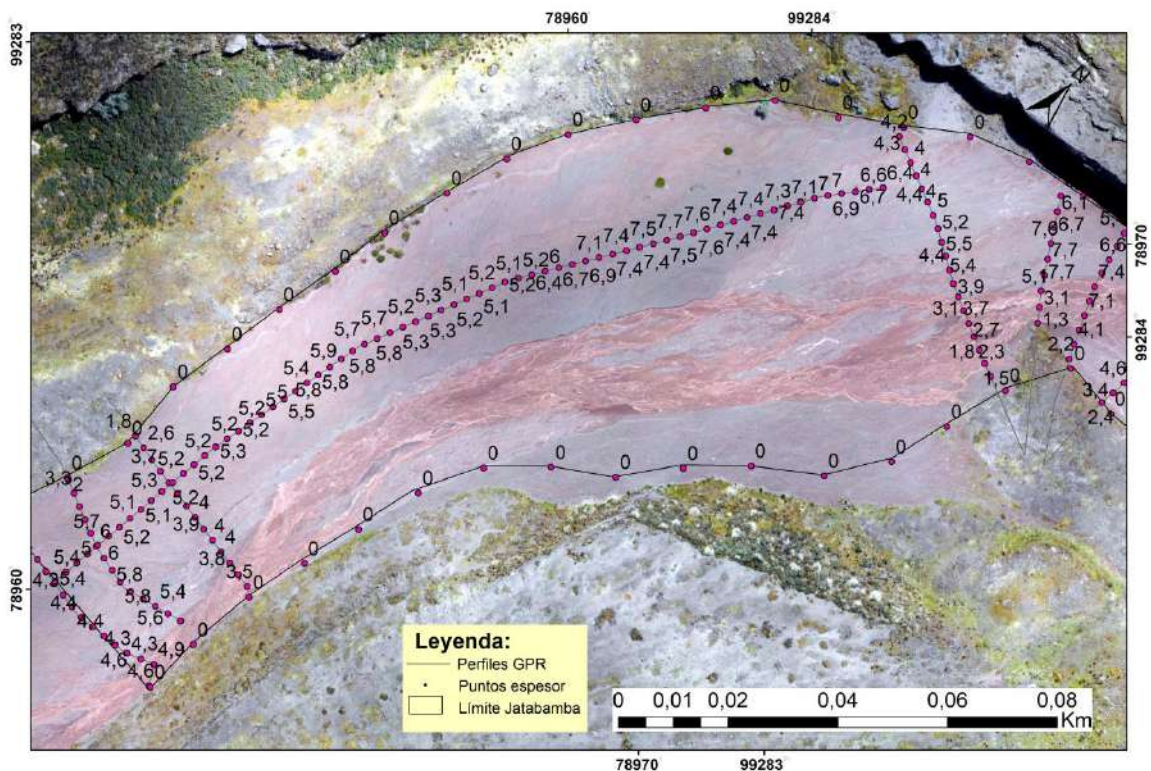


Fig. 4. 9 Se observa la distribución espacial de los valores de espesor y su límite en parte de la Quebrada Jatabamba.

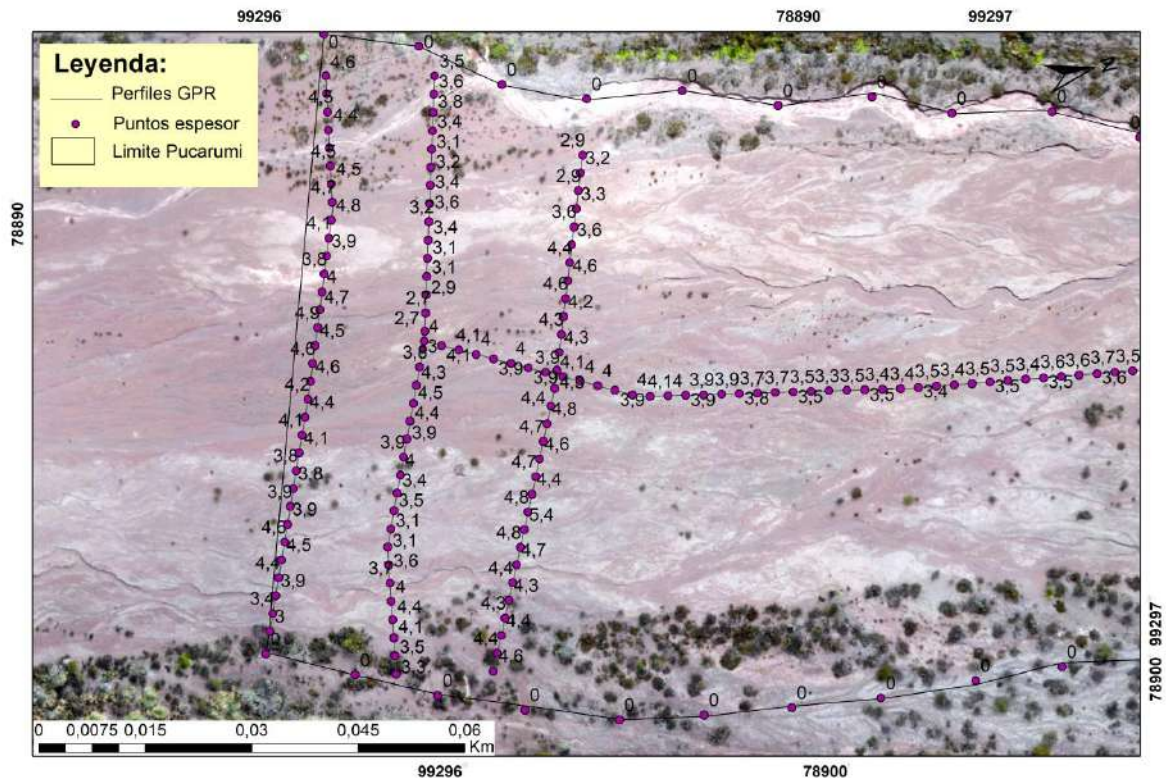


Fig. 4. 10 Se observa la distribución espacial de los valores de espesor y su límite en parte de la Quebrada Pucarumi.

Los modelos de interpolación tipo kriging fueron elaborados comprobando previamente el histograma de distribución de datos y sus variogramas, con el fin de analizar la distribución espacial que tienen los datos en el área definida, y así elegir el mejor tipo de kriging a aplicarse.

Quebrada Jatabamba: Se llevó a cabo 3 modelos de kriging (Fig. 4. 12), 2 de tipo ordinario y 1 de tipo simple. El kriging simple utiliza la media para compensar la falta de información cuando los datos son escasos o alejados (Emery, 2013), es decir maneja sus ecuaciones en base a valores esperados conocidos; por el otro lado, para el kriging ordinario la media es desconocida.

Todas las estimaciones espaciales obtenidas de esta quebrada muestran la misma distribución de datos en sus predicciones. La buena distribución de los datos ayuda a que el pronóstico de resultados se realice más uniformemente y con menos errores.

El mejor modelo de kriging es el simple (Fig. 4. 12C), el valor de la media conocida y el ajuste en el semivariograma (Fig. 4. 11) es más exacto. El modelo muestra como espesor máximo en la Quebrada Jatabamba 7,61 m.

Quebrada Pucarumi: Se llevó a cabo 3 modelos de kriging (Fig. 4. 13), 2 de tipo ordinario y 1 de tipo simple. Las estimaciones espaciales también muestran un mismo

patrón para el área de estudio, con la diferencia de que en la Quebrada Pucarumi la distribución de los perfilajes de GPR no fue la óptima, la mayoría de datos abarca los extremos provocando que hacia el centro de la quebrada, se encuentren los valores más estimados.

El mejor modelo de kriging es el simple (Fig. 4. 13C). El modelo muestra como espesor máximo en la Quebrada Pucarumi un valor de 5,59 m.

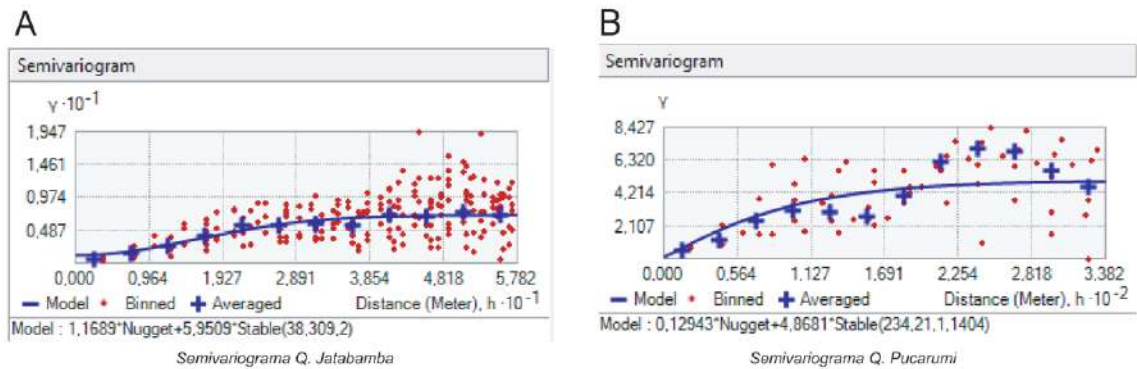


Fig. 4. 11 Ajuste de semivariogramas para las quebradas Jatabamba y Pucarumi.

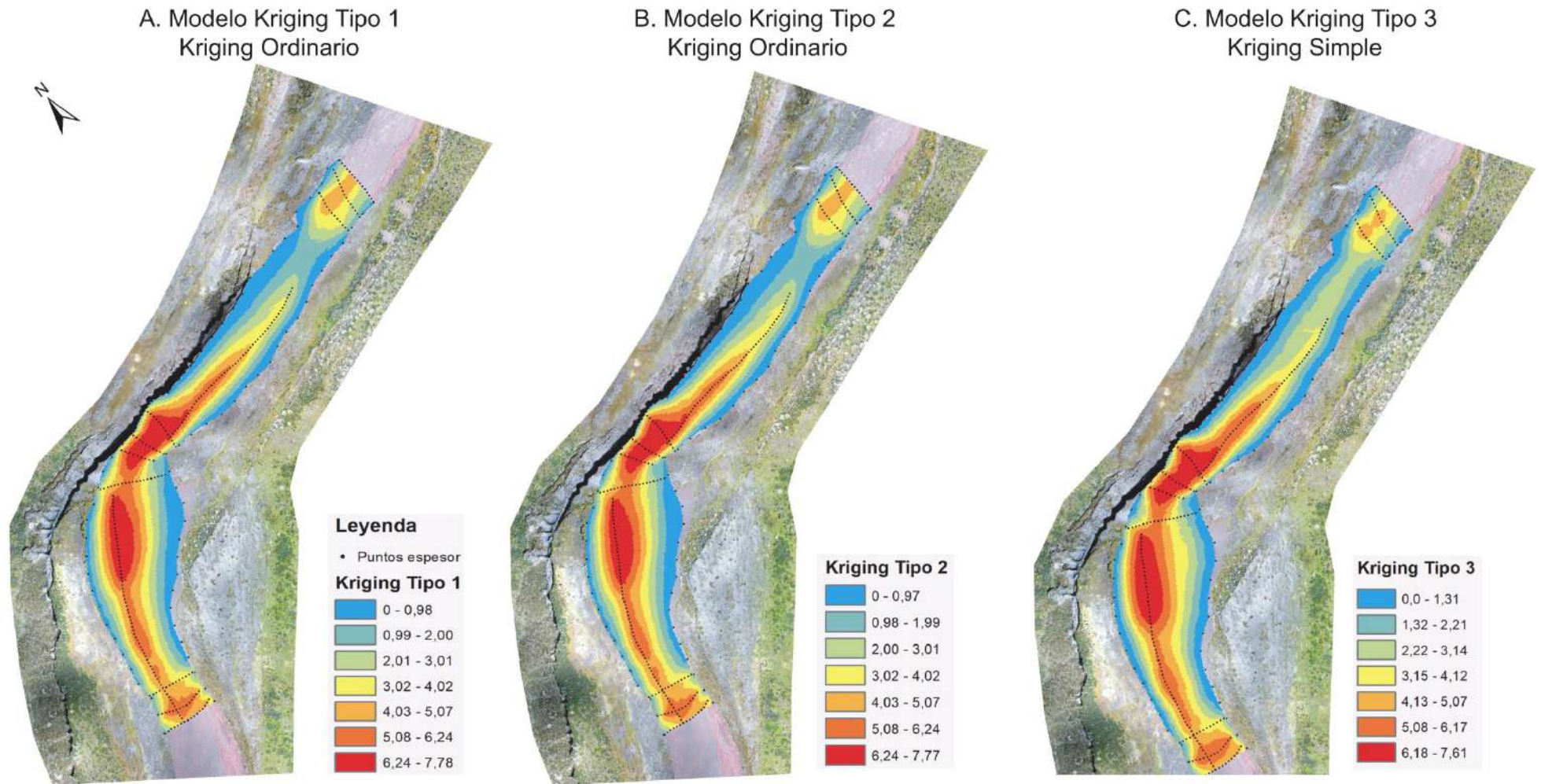


Fig. 4. 12 Modelos de interpolación tipo kriging en base al espesor de los depósitos de lahares secundarios de la Q. Jatabamba.

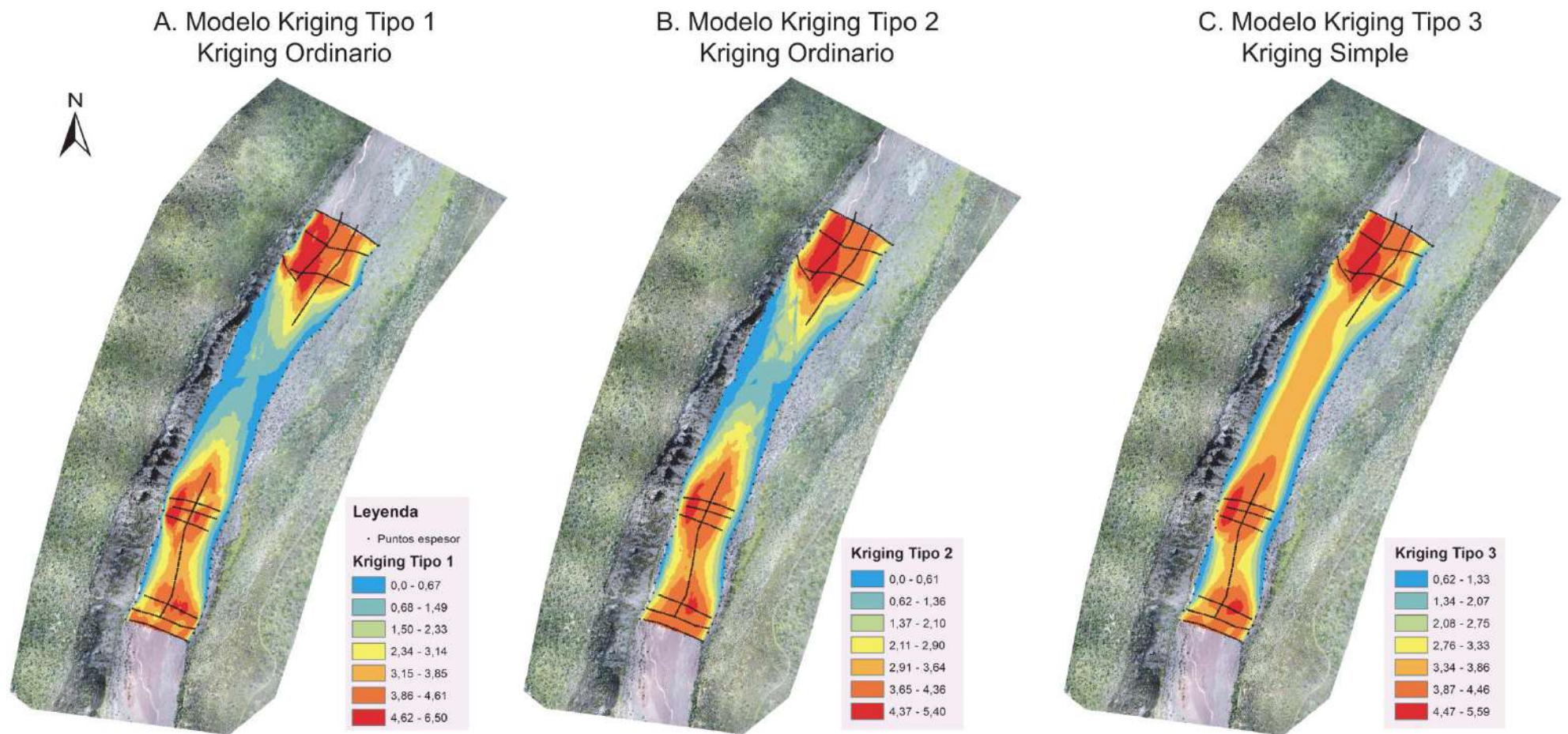


Fig. 4. 13 Modelos de interpolación tipo kriging en base al espesor de los depósitos de lahares secundarios de la Q. Pucarumi.

Se generaron también diagramas de dispersión espacial en el eje Y para conocer la disposición de los datos de espesor para la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 14A) y Pucarumi (Fig. 4. 14B).

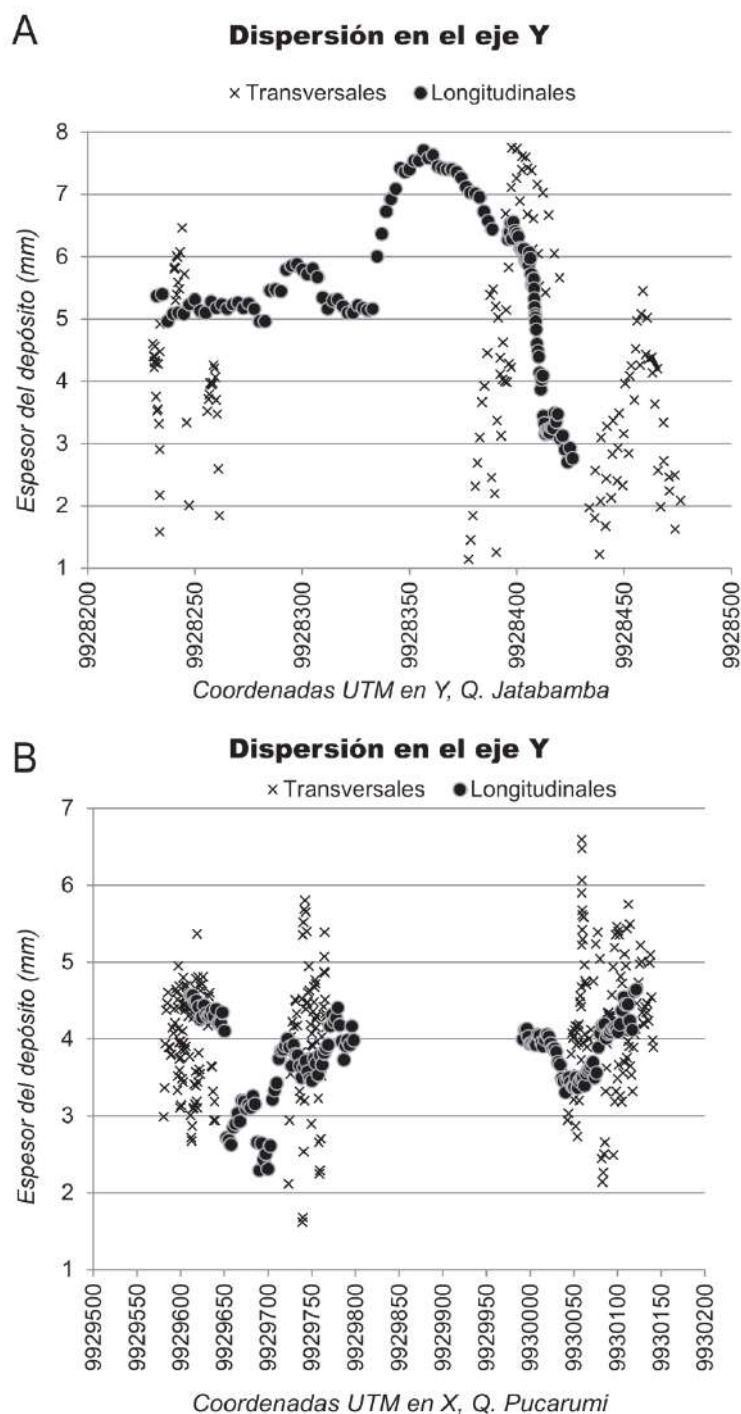


Fig. 4. 14 Diagramas de dispersión de espesor en el eje Y diferenciando perfiles transversales y longitudinales. A. Q. Jatabamba. B. Q. Pucarumi.

En base a la variación en el eje Y bien marcada que se observa en los perfilajes realizados a lo largo de las quebradas se determinó que la acumulación de los

mayores espesores ocurre en las partes más altas y medias de los drenajes. Esta disposición es más evidente para la Quebrada Jatabamba puesto que los mayores espesores se cuantifican en la parte media del drenaje, donde la quebrada tiende a estrecharse.

Como resultado se conoce que para la Quebrada Jatabamba el espesor promedio de toda la quebrada es de 4,80 m en total en un período de tiempo de 143 años, con un máximo de 7,75 m y un mínimo de espesor de 1,13 m. Es decir, en base al valor máximo de depositación, se han depositado 5,4 cm de espesor de lahares secundarios al año en la Quebrada Jatabamba.

Para la Quebrada Pucarumi el espesor promedio de toda la quebrada es de 4,03 m en total en un período de tiempo de 143 años, con un máximo de 6,59 m y un mínimo de espesor de 1,62 m. Es decir, en base al valor máximo de depositación, se han depositado 4,6 cm de espesor de lahares secundarios al año en la Quebrada Pucarumi.

4.4 CARTOGRAFÍA

La cartografía de lahares secundarios fue llevada a cabo mediante ortofotografías obtenidas con un drone durante un período de tiempo de un año, desde mayo de 2018 hasta julio de 2019.

En los primeros meses del período de observación se utilizó principalmente la cámara S.O.D.A. Sin embargo hacia el final del proyecto esta cámara presentó un desperfecto, por lo que fue necesario utilizar la cámara NIR entre Abril y Julio de 2019 (Tabla 4. 6). La cámara S.O.D.A. simplificaba la visualización de los nuevos depósitos de lahares secundarios por sus fotografías en bandas roja, verde y azul, de luz visible. La cámara NIR solamente tiene las bandas roja y verde, de luz visible y una banda de infrarojo cercano, por lo que las comparaciones y cartografía se hicieron utilizando estas bandas, lo que no presentó mayor inconveniente.

Fecha	Quebrada		Cámara
	Jatabamba	Pucarumi	
17/5/2018	x		SODA
28/6/2018		x	NIR
12/7/2018	x	x	SODA
26/7/2018	x	x	SODA, NIR
13/8/2018	x		SODA, NIR
30/10/2018	x	x	SODA
16/11/2018	x	x	SODA

29/11/2018	x	x	SODA
13/12/2018	x	x	SODA
24/1/2019	x		SODA
6/2/2019	x	x	SODA
4/4/2019		x	NIR
18/4/2019	x	x	NIR
8/5/2019	x		NIR
9/5/2019		x	NIR
12/7/2019		x	NIR

Tabla 4. 6 Tabla de fechas en las que fueron obtenidas las fotografías en campo y la cámara utilizada.

La toma de fotografías en campo fue realizada de la manera más periódica y simultánea posible en ambas quebradas, si bien por diferentes circunstancias (clima, problemas logísticos, etc.) no fue posible realizarla de manera uniforme (Fig. 4. 15).

Para visualizar el contraste y el cambio de la topografía con el paso del tiempo, se realizó mapas de cartografía de lahares secundarios para la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 16) y para la Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 17). La cartografía acumulada en el tiempo muestra cómo los lahares secundarios en el intervalo de tiempo de estudio se transponen unos a otros, cómo se distribuyen a lo largo de la quebrada y cómo varía su tamaño.

Todos los mapas cartográficos de las fechas en que se observó un nuevo lahar secundario en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi están adjuntos en formato A3 en el Anexo VIII.

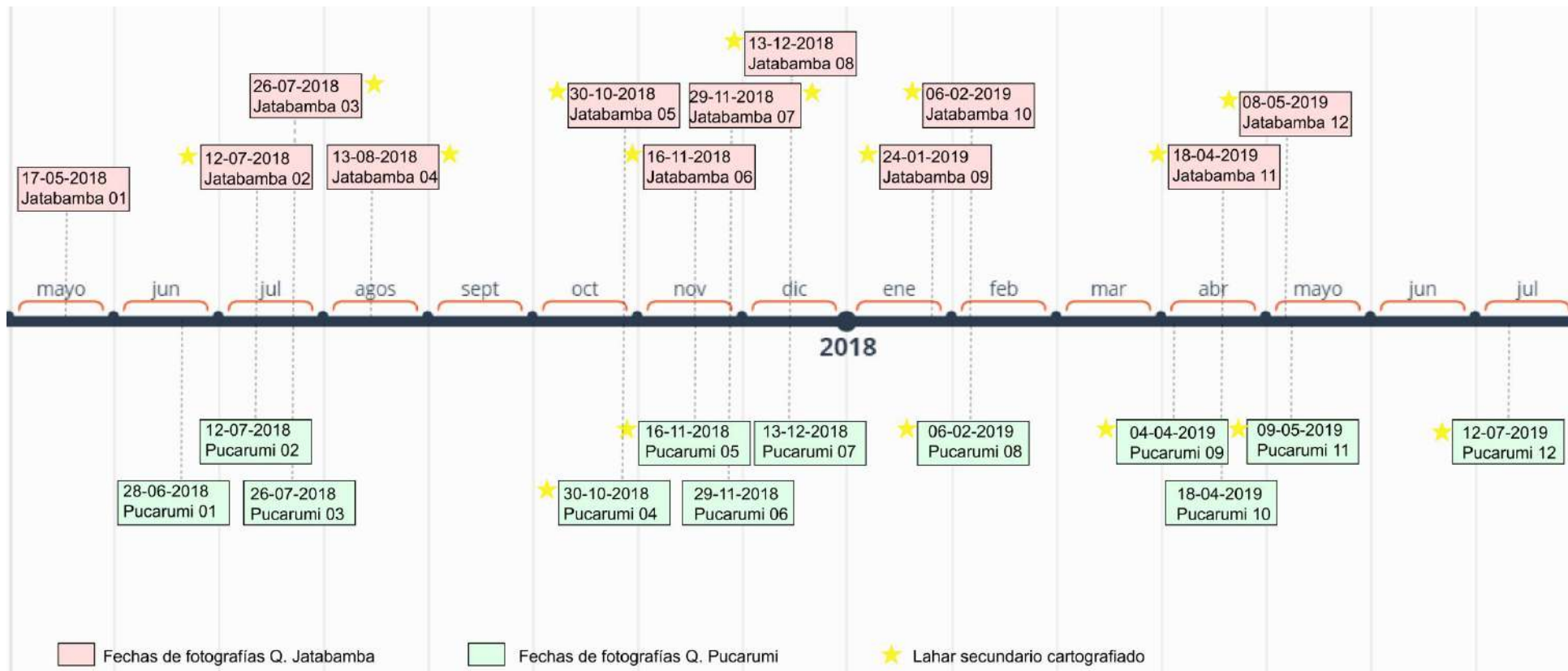


Fig. 4. 15 Línea de tiempo que detalla la toma de fotografías en campo y sus lahares secundarios cartografiados. La parte superior contiene información de la Q. Jatabamba y la inferior de la Q. Pucarumi.

Esta cartografía es evidencia de que la Quebrada Jatabamba es una quebrada sumamente activa, con cada nueva ortofotografía se obtuvo un nuevo lahar secundario cartografiado (Fig. 4. 16A-D).

Entre julio de 2018 e inicios de noviembre de 2019 el tamaño de los lahares cartografiados es variado. P.e. el lahar del 26 de julio de 2018 (Fig. 4. 16A) presenta un área de 7741,49 m² (Tabla 4. 8), mientras que el del 13 de agosto de 2018 (Fig. 4. 16A) solamente 3199,18 m² (Tabla 4. 8). Pasando a disminuir significativamente entre finales de noviembre de 2018 y enero de 2019. P.e. lahar del 13 de diciembre de 2018 de 762,03 m² (Tabla 4. 8). Pero entre febrero y mayo de 2019 los lahares incrementan su tamaño y cubren prácticamente por completo a todos los lahares anteriores. P.e. lahar del 08 de mayo de 2019 (Fig. 4. 16 D) con un área de 36325,42 m² (Tabla 4. 8).

La cartografía evidencia que por el contrario, la Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 17) es menos activa, se cartografiaron 7 lahares secundarios, siendo estos lahares de menor tamaño y en un espacio más limitado.

Se muestra un producto de lahares secundarios muy esporádicos e inicialmente de menor tamaño. P.e. lahar del 30 de octubre de 2018 (Fig. 4. 17A); con un área de 621,76 m² (Tabla 4. 8). A partir del mes de febrero de 2019 se reconoce un incremento del tamaño y frecuencia de ellos. P.e. lahar de 04 de abril de 2019 (Fig. 4. 17C) de 4470,42 m² (Tabla 4. 8).

La Tabla 4. 7 resume los valores más importantes a conocer, el número de ortofotografías obtenidas mediante el dron y el número de lahares secundarios cartografiados; teniendo en cuenta que la primera ortofotografía obtenida en ambas quebradas sirvió como base para iniciar el proceso de cartografiado .

Quebrada	N° de Fotografías obtenidas	N° de lahares secundarios cartografiados
Jatabamba	12	11
Pucarumi	12	6

Tabla 4. 7 Tabla resumen de los lahares cartografiados en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.

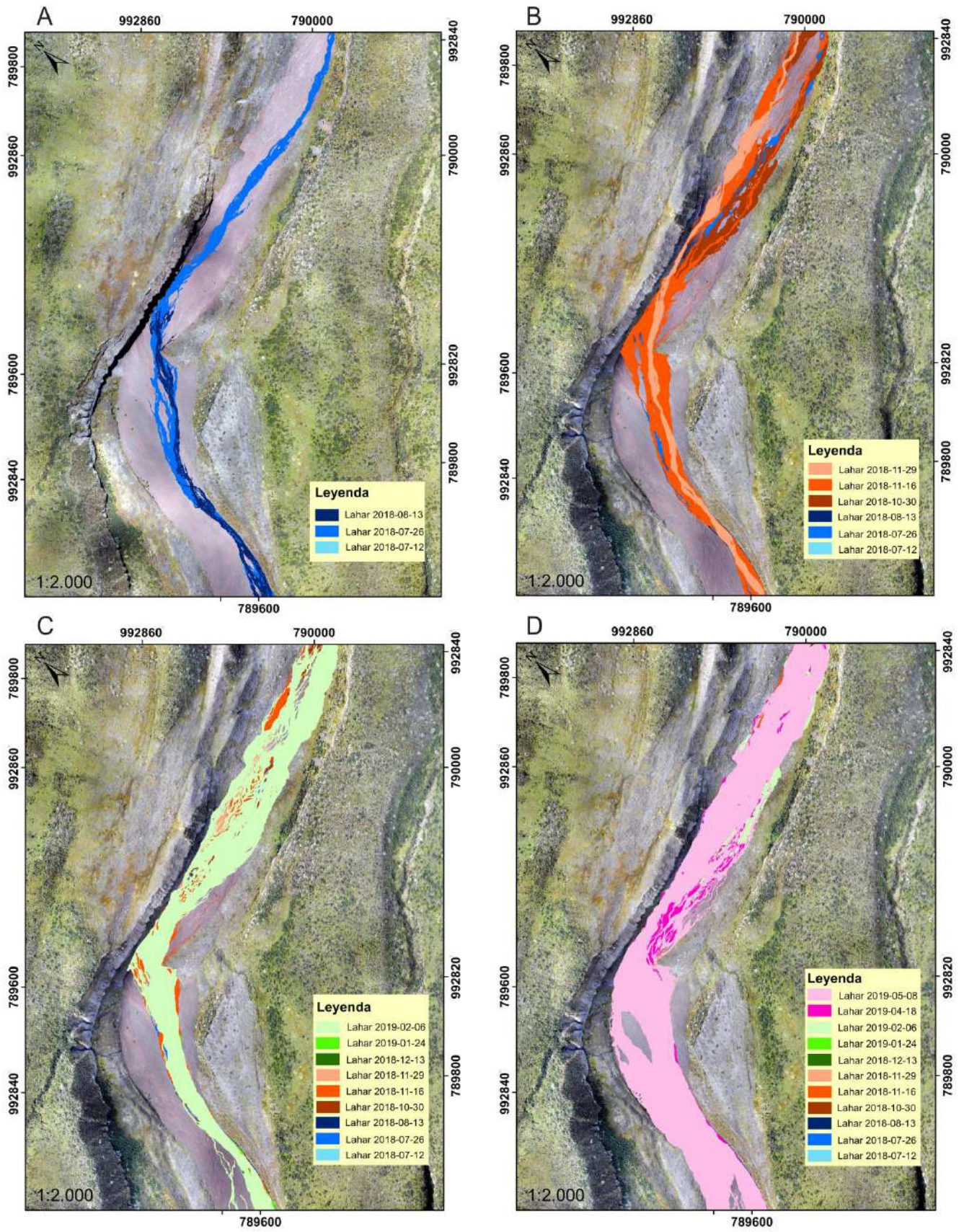


Fig. 4. 16 Cartografía de lahares secundarios acumulada en el tiempo – Q. Jatabamba.

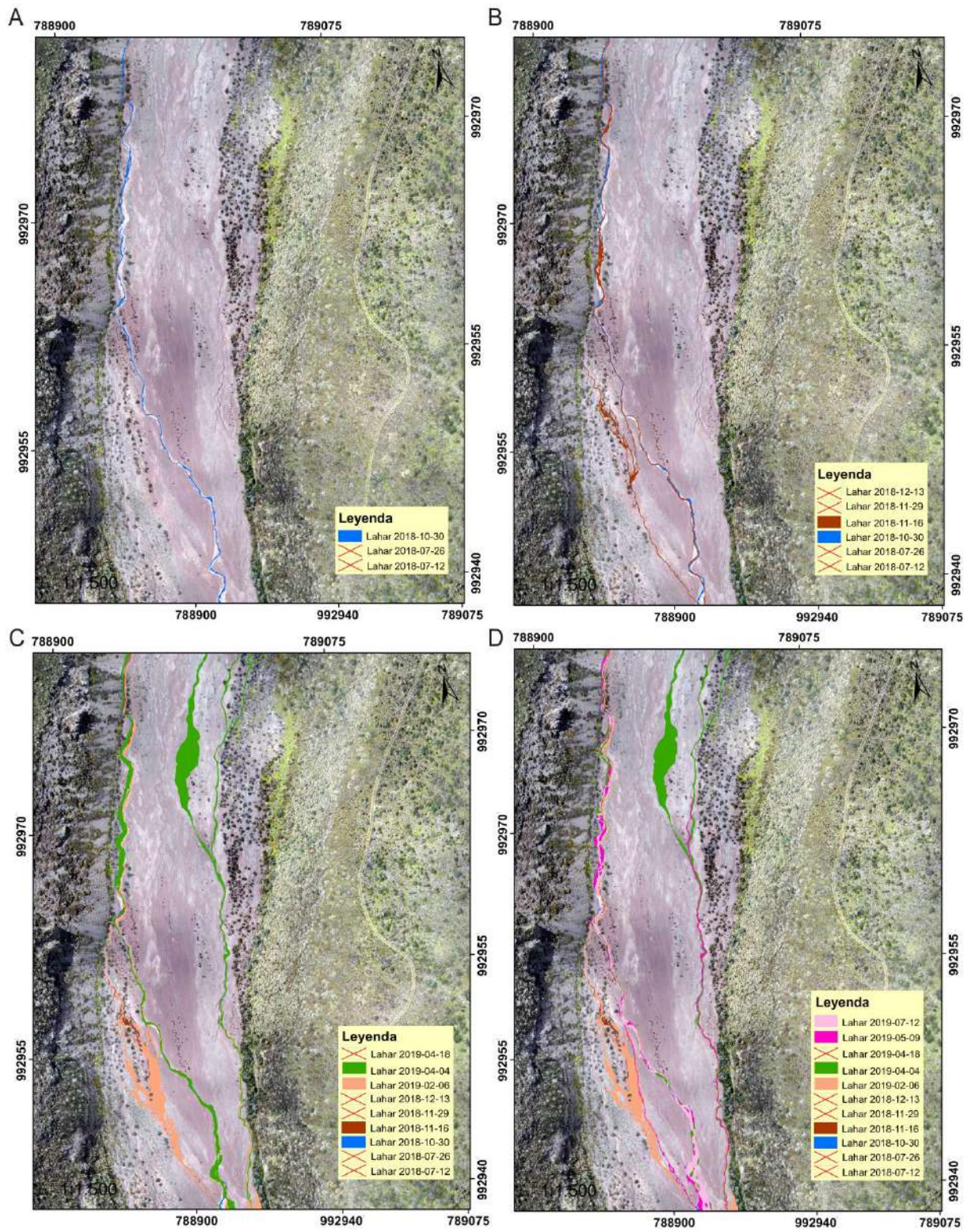


Fig. 4. 17 Cartografía de lahares secundarios acumulada en el tiempo – Q. Pucarumi.

El área calculada de los polígonos cartografiados como lahares secundarios en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi se presenta en la siguiente Tabla 4. 8:

Q. Jatabamba		Q. Pucarumi	
Fecha	Área (m²)	Fecha	Área (m²)
2018-07-12	2039,19	2018-07-12	0,00
2018-07-26	7741,49	2018-07-26	0,00
2018-08-13	3199,18	2018-10-30	621,76
2018-10-30	10258,12	2018-11-16	907,78
2018-11-16	12799,54	2018-11-29	0,00
2018-11-29	4835,41	2018-12-13	0,00
2018-12-13	762,03	2019-02-06	2477,68
2019-01-24	2725,66	2019-04-04	4470,42
2019-02-06	27847,05	2019-04-18	0,00
2019-04-18	20716,00	2019-05-09	2309,68
2019-05-08	36325,42	2019-07-12	1708,18

Tabla 4. 8 Tabla de áreas de los lahares secundarios cartografiados en la Q. Jatabamba (izquierda) y Pucarumi (derecha).

4.5 PRECIPITACIÓN

Las gráficas de precipitación acumulada (Fig. 4. 18 y Fig. 4. 19) contribuyen a identificar las épocas meteorológicas predominantes durante cierto intervalo de tiempo, además de eventos de precipitación de gran valor que podrían ser desencadenantes de lahares. Las 4 épocas meteorológicas identificadas son:

- Mayo 2018 a julio 2018 y diciembre 2018 a febrero 2019 = Épocas secas.
- Agosto 2018 a noviembre 2018 y marzo 2019 a julio 2019 = Épocas lluviosas.

Las Fig. 4. 18 y 4. 19 identifican grandes lluvias que pudieron desencadenar lahares, pero su resultado fundamental es la evidencia de que existen lahares secundarios formados en épocas secas, donde la intervención de la lluvia como desencadenante en la formación de un lahar es mínima. Por ello se piensa en la intervención que puede tener el glaciar o alguna diferencia entre quebradas.

Es importante conocer la correlación entre la cantidad de lluvia (mm) y el tamaño del lahar (m²), para ello se ha realizado una gráfica de asociación entre la fecha cuando fueron cartografiados los lahares, su área (m²) (Tabla 4. 8) y la cantidad de lluvia acumulada entre fotografía y fotografía (mm) para la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 20) y la Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 21).

Gráfica de precipitación acumulada - Quebrada Jatabamba

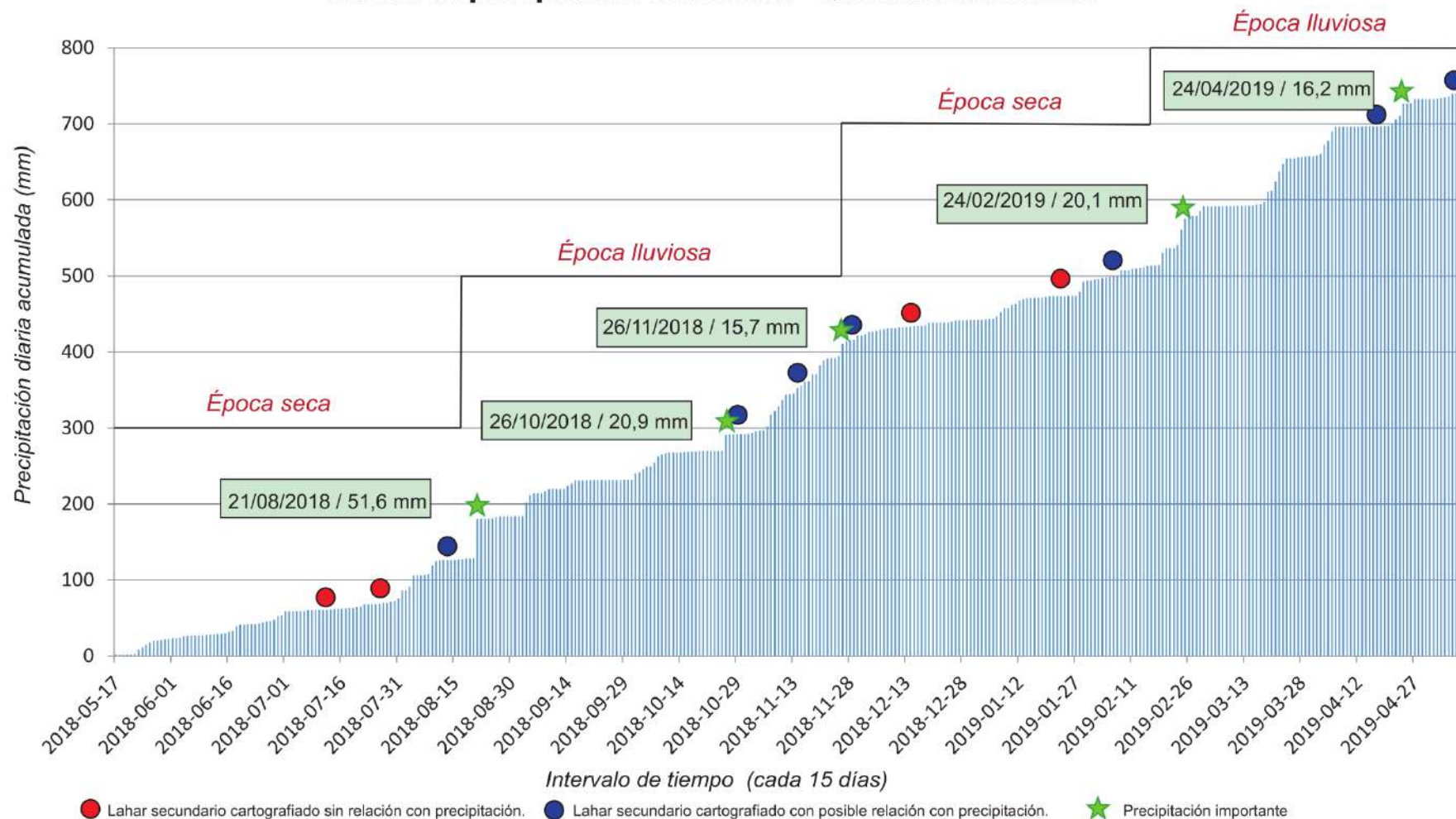


Fig. 4. 18 Precipitación acumulada diaria en mm de la estación hidrológica M5076 del FONAG - Q. Jatabamba.

Gráfica de precipitación acumulada - Quebrada Pucarumi

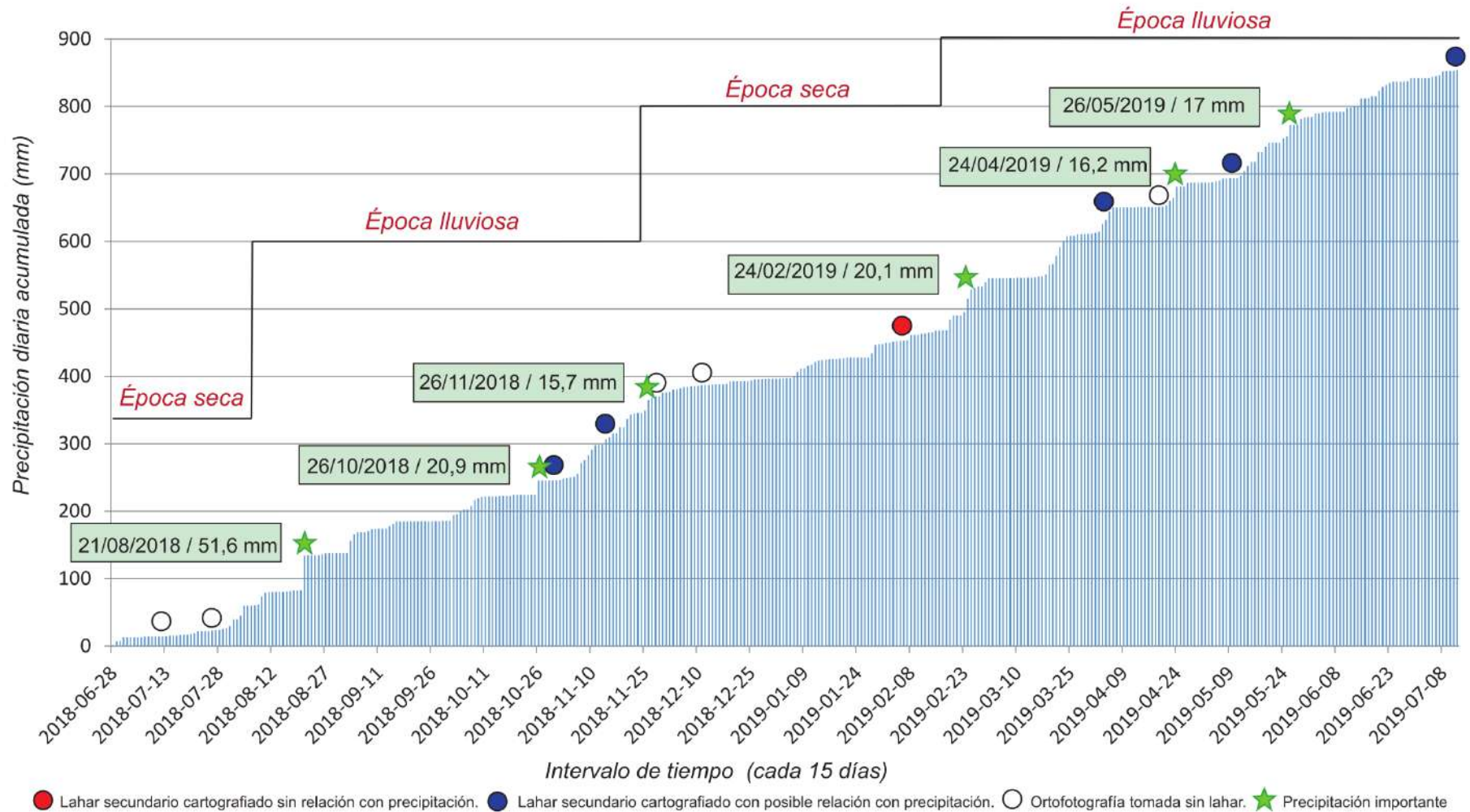


Fig. 4. 19 Precipitación acumulada diaria en mm de la estación hidrológica M5076 del FONAG - Q. Pucarumi.

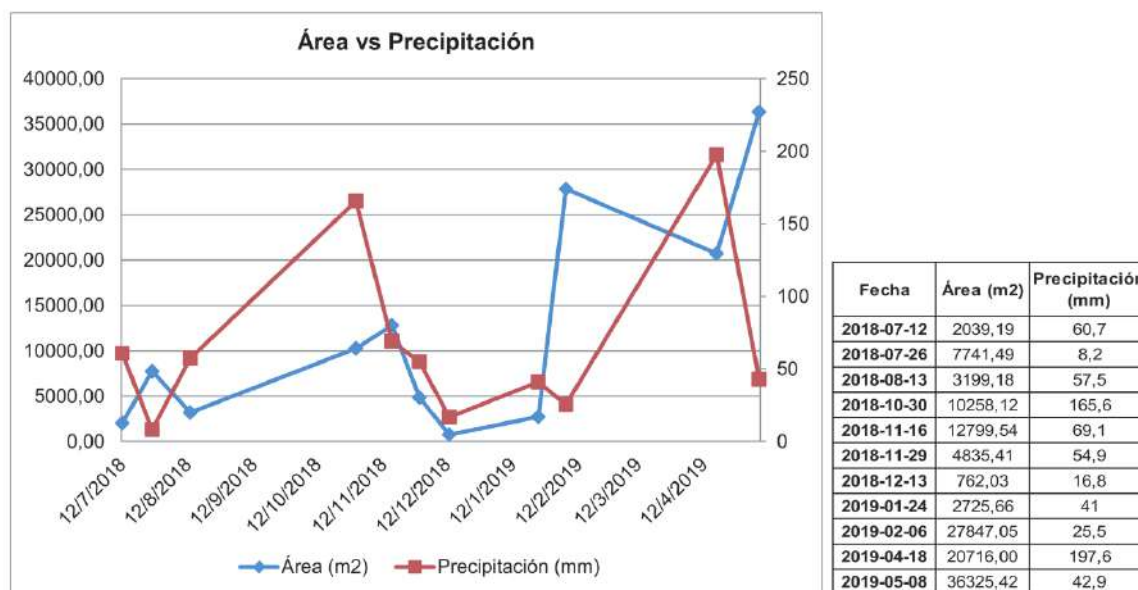


Fig. 4. 20 Área del lahar cartografiado vs cantidad de precipitación acumulada – Q. Jatabamba.

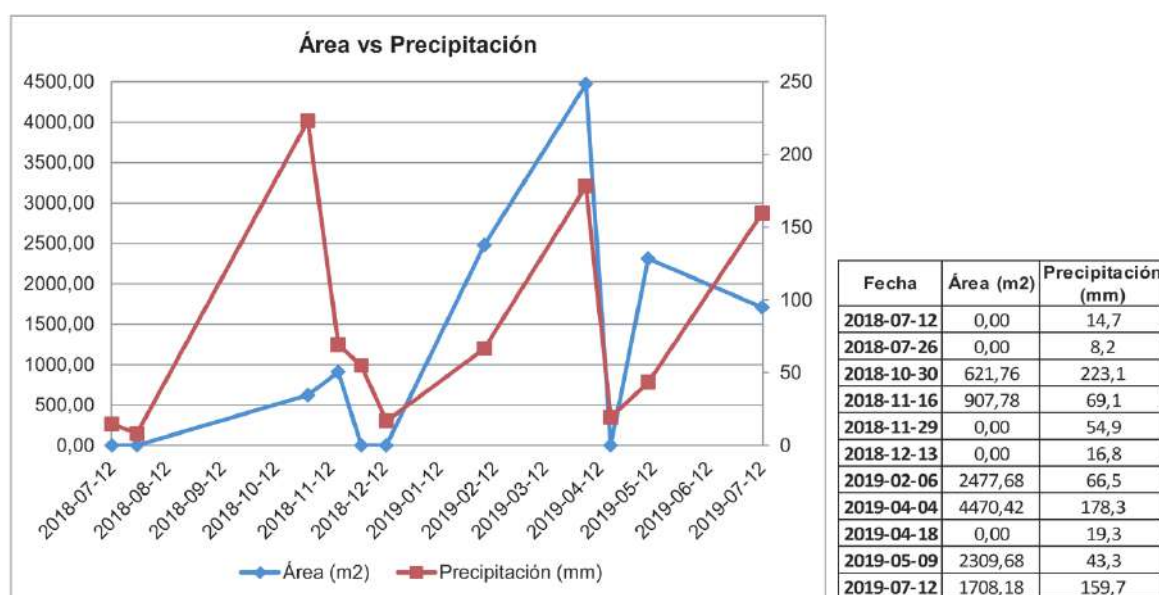


Fig. 4. 21 Área del lahar cartografiado vs cantidad de precipitación acumulada – Q. Pucarumi.

Para la Quebrada Jatabamba (Fig. 4. 20) la correlación entre la precipitación y el área de los lahares es más congruente en la segunda época seca determinada entre diciembre de 2018 y febrero de 2019, la información adicional plotada no presenta mayor vinculación entre ella. Para la Quebrada Pucarumi (Fig. 4. 21) la correlación es más óptima entre los meses de febrero a mayo de 2019. Pero de manera general, no hay una correlación clara que asegure que la lluvia es el detonante de lahares secundarios.

Finalmente, para complementar todas las gráficas, se realizó una gráfica de dispersión comparando el área de los lahares en la Quebrada Jatabamba como en la Quebrada Pucarumi en fechas donde exista una ortofotografía para ambas en base al Anexo VII. De esta forma se analizaron datos para 8 fechas y se obtuvo la Fig. 4. 22.

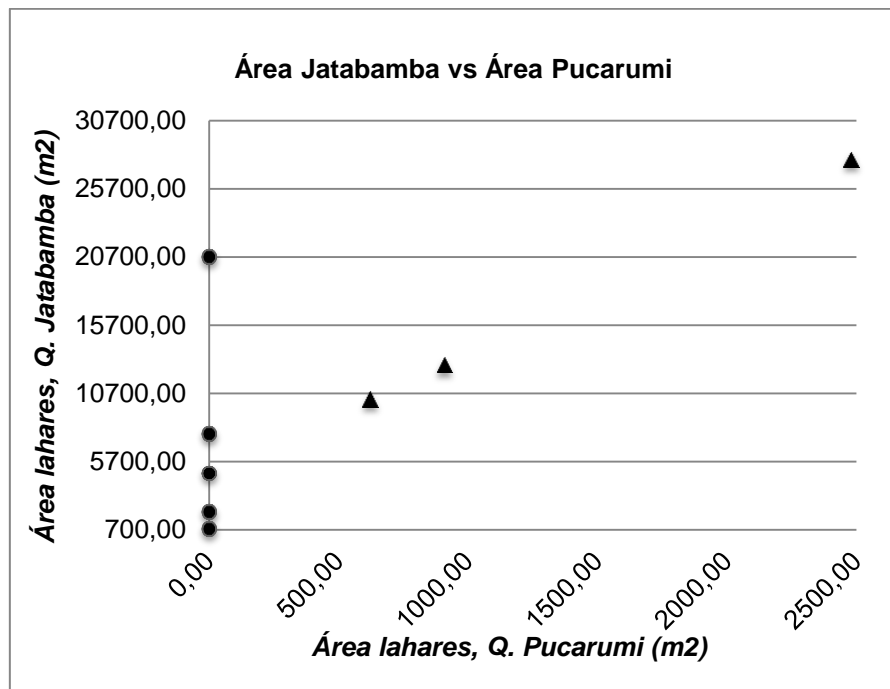


Fig. 4. 22 Área de los lahares cartografiados en la Q. Jatabamba vs área de los lahares cartografiados en la Q. Pucarumi en la misma fecha.

La cercanía de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi explica que cualquier agente de agua desencadenante de lahares secundarios (lluvia, agua del glaciar, etc.) que ocurra en esta zona afectará a ambas quebradas de igual forma. Entonces, si fuera este el caso, la relación entre las áreas en ambas quebradas sería lineal, como la distribución que muestran los datos representados por un triángulo negro.

La Fig. 4. 22 muestra dos tipos de formación de lahares secundarios; la primera forma pone a la vista que la relación entre áreas no es lineal (círculos negros), es decir, existe un factor externo que afecta a la Quebrada Pucarumi y que se traduce en una menor cantidad de lahares secundarios formados. Y la segunda forma en cambio exhibe una relación lineal de áreas, en donde cualquiera que sea la fuente de agua, afecta a ambas quebradas, pero teniendo en cuenta que la dimensión en la que ocurre en la Quebrada Jatabamba es proporcionalmente mayor a la Quebrada Pucarumi.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

5.1 DISCUSIÓN

5.1.1 COMPORTAMIENTO DE LOS DRENAJES A LARGO PLAZO

Las quebradas Jatabamba y Pucarumi estudiadas a largo plazo, (e.d. a partir del lahar del 26 de junio de 1877), presentan un comportamiento muy similar. Tanto los resultados obtenidos mediante la granulometría (Capítulo 4.1) como los del GPR (Capítulos 4.2 y 4.3) muestran que ambas quebradas presentan características bastante similares. A simple vista los depósitos de ambas quebradas son muy parecidos, y a través de los estudios granulométricos y de componentes, se obtuvieron similares resultados en cuanto a clasificación y características principales. (i) Los depósitos de ambas quebradas fueron designados como flujos hiperconcentrados, con valores muy cercanos en cuanto al tamaño y al sorteo (Fig. 4. 3). (ii) El análisis de componentes refleja de manera general un mayor contenido en material de tipo vesiculado, predominando la escória y la pómez, con cierta presencia de materia orgánica y siendo el característico el color rojizo, que es característico de sus depósitos.

Además, los análisis realizados a través del GPR dan una conclusión semejante. Los espesores promedio calculados en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi en un período de tiempo de 143 años, tomando como referencia de su inicio en 1877, dan como resultado una tasa de depositación aproximada de 5,4 cm/año en la Quebrada Jatabamba y de 4,6 cm/año para la Quebrada Pucarumi, en base al valor máximo de depositación.

Todo esto sugiere que tanto la zona fuente de los lahares, como los procesos que dan lugar a su formación son relativamente uniformes en esta zona del volcán.

5.1.2 COMPORTAMIENTO DE LOS DRENAJES A CORTO PLAZO

Por otra parte, el análisis de la ocurrencia de lahares secundarios en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi durante el período de mayo 2018 a julio de 2019 muestra un comportamiento muy distinto entre cada una de ellas. La Quebrada Jatabamba ha mostrado ser claramente más activa que la Quebrada Pucarumi, a través de la cartografía a detalle con fotografías tomadas con drone.

En total, en la Quebrada Jatabamba se evidenciaron 11 lahares secundarios, mientras en la Quebrada Pucarumi solamente fueron 6 y de una extensión muy reducida. Esto resulta sorprendente en vista de que ambas quebradas tienen sus zonas fuentes muy cercanas, por lo que se esperaría que si los lahares son disparados por lluvias, los mismos ocurran en ambas quebradas al mismo tiempo. Sin embargo, los datos de cartografía y la comparación con los datos de precipitaciones indica: 1) que no hay una relación directa entre la ocurrencia de lluvias y la ocurrencia de lahares en ninguna de las quebradas (Fig. 4. 18 y 4. 19); 2) que no existe relación entre el tamaño de los lahares ocurridos simultáneamente en cada quebrada (Fig. 4. 22). El material disponible para ser erosionado y mezclarse con una fuente de agua para formar nuevos lahares secundarios también está disponible para las dos quebradas. Entonces, la problemática es el origen de estos lahares secundarios y qué factores diferencian a la Quebrada Pucarumi de la Quebrada Jatabamba.

Uno de los factores podría explicar estas diferencias es la topografía que tenga cada quebrada. De esta forma, las fotografías tomadas con el drone pueden corresponder a sitios topográficamente muy diferentes, por lo que las zonas de mayor acumulación de la quebrada Pucarumi podrían estar lejanas, aguas arriba en el drenaje, y en las imágenes obtenidas solamente se observa la parte final de los lahares ocurridos.

Los perfiles topográficos de ambas quebradas (Fig. 5. 1) hacen notar dos diferencias: 1) la longitud del perfil topográfico de la Quebrada Pucarumi evidencia que su zona de toma de fotografías es aproximadamente 1 km más distante que en Jatabamba, 2) el perfil de la Quebrada Jatabamba alcanza una zona con menor pendiente antes de los 1500 m de distancia en el cauce, en la Quebrada Pucarumi esta disminución de pendiente se observa después de los 1500 m; siendo estos posibles sitios de depositación de material. Sin embargo, a pesar de estas ligeras diferencias, sus perfiles topográficos son casi idénticos y sus valores de pendientes muy cercanos, lo que constata que la topografía no es el factor que distingue una quebrada de la otra. Estos datos fueron obtenidos del DEM de la zona de estudio en la Quebrada Jatabamba y Pucarumi, respectivamente.

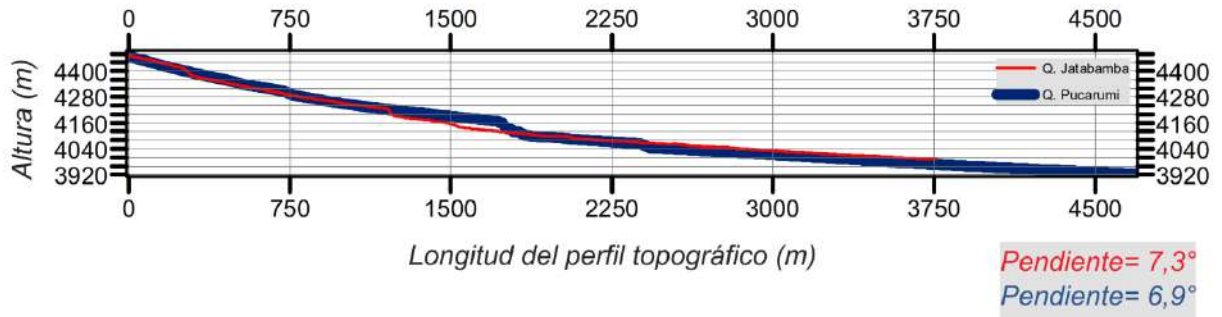


Fig. 5. 1 Perfiles topográficos y pendientes de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi, desde la zona fuente hasta dónde se tomaron las fotografías aéreas. Q. Jatabamba (línea roja). Q. Pucarumi (línea azul).

5.1.3 POSIBLE INFLUENCIA DEL GLACIAR EN LA GENERACIÓN DE GLACIARES

Por lo general, se asume que los lahares secundarios son generados por lluvias que ocurren en los flancos de los volcanes, donde puede existir abundante material disponible para ser removilizado (Vallance & Iverson, 2015). En el caso de los lahares secundarios del volcán Cotopaxi, el estudio realizado en las quebradas Jatabamba y Pucarumi muestra que la ocurrencia de lluvias no puede explicar por completo la formación de lahares secundarios; tomando en cuenta que ambas quebradas son muy similares en cuanto a su zona fuente y a su comportamiento a largo plazo. Esto lleva a la conclusión de que debe existir una fuente adicional de agua que tiene una importancia significativa en la formación de los lahares secundarios del Cotopaxi, y que dicha fuente actualmente está disponible para la Quebrada Jatabamba, pero no para la quebrada Pucarumi.

La fuente de agua adicional más evidente se genera por la fusión del glaciar del Cotopaxi, que según los resultados de este proyecto de titulación, podemos proponer que en ocasiones es desencadenante de lahares secundarios. Con el fin de probar esta hipótesis, se realizó una salida de campo hacia la zona de cabecera de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi para observar más a detalle las características de la zona fuente donde se originan los lahares secundarios.

La zona fuente, como ya se había propuesto, se caracteriza por presentar similitudes para ambos drenajes. Entre ellas cabe destacar: (i) cantidad y tipo de material disponible, (ii) ausencia de acumulaciones de depósitos de lahares secundarios, (iii) topografía muy similar y cercanía geográfica, ya que en sus cabeceras estas

quebradas se unen. Sin embargo, hay una diferencia significativa observada: la cabecera de la Quebrada Jatabamba parece tener una pequeña lengua de glaciar que alimenta el drenaje, mientras en la cabecera de la Quebrada Pucarumi el glaciar parece estar mayormente derretido. La (Fig. 5. 2A-C) muestra de menor a mayor detalle la zona de cabecera de ambas quebradas. Es evidente la proximidad entre quebradas, como también que la lengua de glaciar que tiene influencia sobre la Quebrada Jatabamba y la alimenta llega hasta una parte más baja y se la observa consistente; por otro lado, la lengua que alimenta la Quebrada Pucarumi está disminuída y con señales de mayor desgaste y retroceso. Es decir, se considera está la diferencia que existe entre quebradas y la razón por la que la Quebrada Pucarumi muestre una actividad muy reducida comparada con la Quebrada Jatabamba.

Sin embargo, los resultados del presente estudio no dan luces sobre el proceso específico que produciría la formación de agua suficiente a partir de la lengua de glaciar. El presente estudio permite suponer la ocurrencia de algún tipo de interacción entre las lluvias y el glaciar que podría dar lugar a mayores aportes de agua hacia la Quebrada Jatabamba. Pero también es necesario algún proceso que permita la fusión repentina de la lengua del glaciar, de pequeña escala y sin ocurrencia de lluvia, que igualmente permiten formar lahares secundarios preferentemente en la Quebrada Jatabamba.

En el largo plazo, en vista de las grandes similitudes existentes entre ambas quebradas, se puede suponer que el aporte del glaciar ha sido siempre significativo durante la formación de los lahares secundarios en el volcán Cotopaxi.

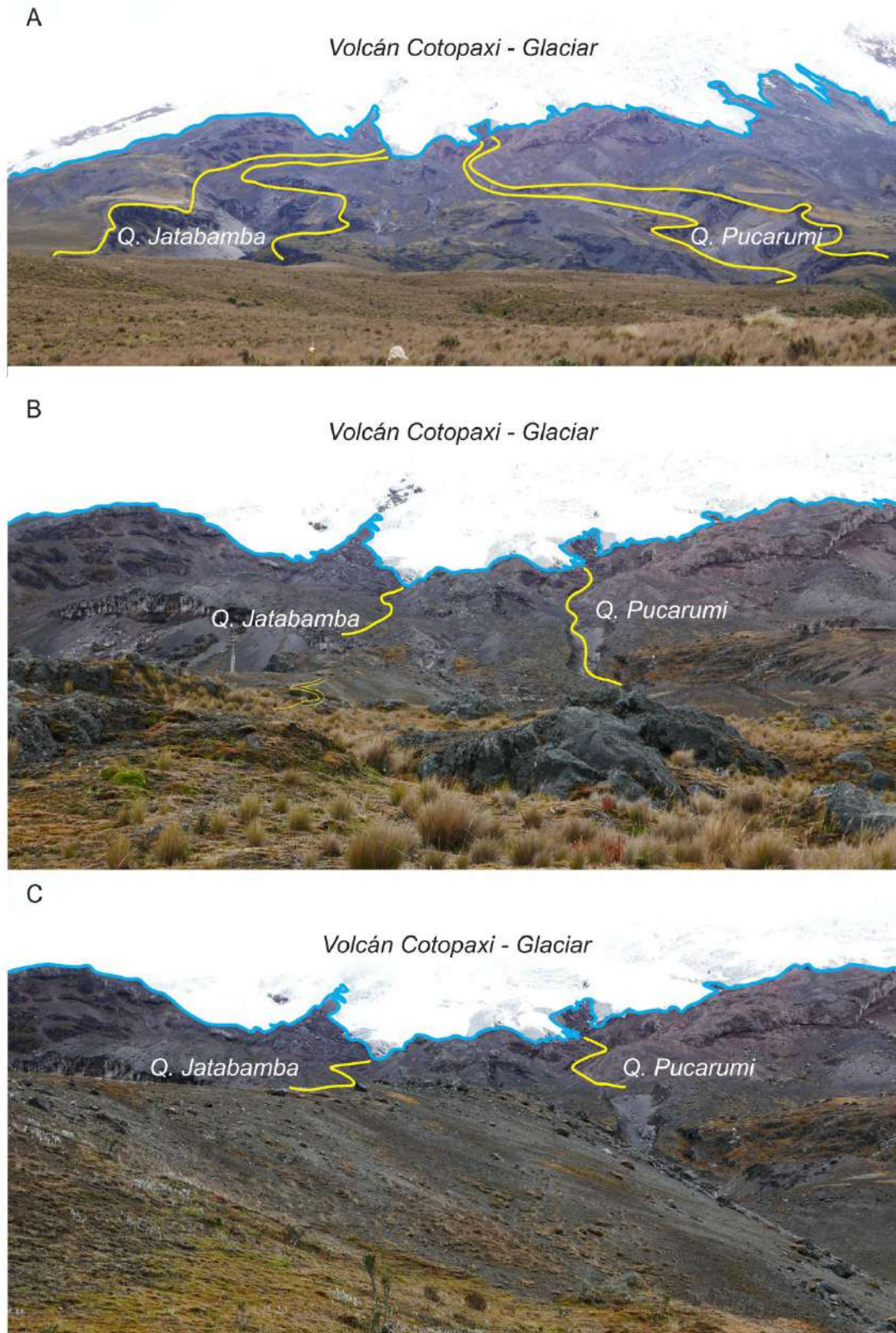


Fig. 5. 2 Lenguas de glaciar. A. Proximidad de las quebradas y las lenguas de glaciar que tienen influencia. B. Mayor detalle, a la izq. la Q. Jatabamba alimentada por una lengua de glaciar bien consolidada y que llega hasta la parte más baja, a la der. la Q. Pucarumi alimentada por una lengua de glaciar muy reducida. C. Con mayor cercanía se observa la disposición del glaciar.

5.2 CONCLUSIONES

- La granulometría de los depósitos de las Quebradas Jatabamba y Pucarumi permite clasificarlos como flujos secundarios hiperconcentrados, con una composición donde predomina el material vesiculado (escórias, pómez), además cuentan con cristales en su mayoría de plg y vidrio, material no vesiculado (rocas andesíticas) y materia orgánica. El color rojizo es característico de estos depósitos.
- Las medidas realizadas con el GPR permiten determinar que el espesor acumulado a partir del lahar de 1877 en las Quebradas Jatabamba y Pucarumi presenta una tendencia a ser mayor hacia el centro de los cauces, en la zona más próxima a la cabecera de las quebradas y en las áreas más estrechas. Se determinó que en un período de tiempo de 143 años la Quebrada Jatabamba presenta una tasa de deposición promedio de 5,4 cm/año y la Quebrada Pucarumi de 4,6 cm/año en base a tasas de depositación máximas .
- Entre Mayo 2018 y Julio 2019, a través de las fotografías tomadas con drone se cartografiaron 11 lahares secundarios en la Quebrada Jatabamba y 6 en la Quebrada Pucarumi. En la quebrada Jatabamba los depósitos cubrieron áreas de entre 700 y 36000 m², mientras en la Quebrada Pucarumi cubrieron áreas de entre 600 y 4400 m². De este modo se pudo determinar que la Quebrada Jatabamba es actualmente más activa que la Pucarumi.
- No existe una correlación ni temporal ni de tamaño entre los lahares secundarios cartografiados en la Quebrada Jatabamba y la Pucarumi.
- Para ambas quebradas, la correlación entre la lluvia y la ocurrencia de un lahar secundario se cumple en ciertos casos, pero no se cumple en la mayoría de ocasiones. Por ello, se considera que la fuente de agua para generar los lahares secundarios del volcán Cotopaxi no proviene solamente de agua de lluvia, si no también a partir de algún mecanismo de derretimiento del glaciar.

5.3 RECOMENDACIONES

- Para trabajos con drone, se recomienda contar con partes de repuesto, pues los accidentes son probables y su falta podría retrasar la planificación y ejecución del trabajo.
- Se recomienda realizar un estudio comparativo de los lahares secundarios cartografiados con los registros de la red sísmica del Instituto Geofísico – EPN

cercana a la zona de estudio. Esto permitiría conocer la fecha exacta de ocurrencia de los lahares cartografiados y el valor de precipitación que los desencadenó.

- Se recomienda contar con datos de precipitación más próximos a la zona de estudio, pues el clima es muy cambiante y al estar la estación en las faldas del volcán podría no registrar lluvias de la zona más alta, cercana a las cabeceras de las quebradas.
- Para obtener modelos de kriging con mayor exactitud se recomienda realizar más perfiles con GPR en las partes donde no hubo toma de datos.
- Para contar con una imagen más real del glaciar y conocer su retroceso, se recomienda disponer de imágenes satelitales actuales o shapefiles.
- Se recomienda llevar un seguimiento de los lahares secundarios, pues su impacto por superficie puede que no sea muy considerable, pero aún así causa daños. Por ejemplo: sus depósitos a veces son tan grandes que construyen límites del mismo material depositado con el objetivo de evitar que los sedimentos lleguen al canal de agua; una ocasión, se observó que los depósitos llegaron hasta el canal de agua y lo obstruyeron, después se tuvo que traer maquinaria para retirarlo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E., Pareschi, M. T., Rosi, M., & Zanchetta, G. (2004). Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador). *Natural Hazards*, 33(2), 161-189.
- Andrade, D., Escuela Politécnica Nacional (Quito, Ecuador), & Institut de recherche pour le développement (France) (Eds.). (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Corporación Editora Nacional.
- Annan, A. P. (2005). Ground-Penetrating Radar. En *Near-Surface Geophysics Part 1: Concepts and Fundamentals* (p. 82).
- Annan, A. P., & Davis, J. L. (1976). Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*, 12.
- Bailey, J. T., Evans, S., & Robin, G. de Q. (1964). Radio Echo Sounding of Polar Ice Sheets. *Nature*, 204(4957), 420-421. <https://doi.org/10.1038/204420a0>
- Barclay, J., Alexander, J., & Sušnik, J. (2007). Rainfall-induced lahars in the Belham Valley, Montserrat, West Indies. *Journal of the Geological Society*, 164(4), 815-827. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-078>
- Biskup, K., & Lorenzo, H. (2005). *Aplicabilidad del radar de subsuelo para el estudio de la zona no saturada del suelo: Ejemplos en ambientes arenosos costeros*. 9.
- Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Gavilanes-Ruiz, J. C., Norini, G., Sarocchi, D., Caballero, L., & Cortes, A. (2010). Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: Surface hydro-repellency as initiation process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(1-2), 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.014>
- Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1996). *Volcanic successions: Modern and ancient; a geological approach to processes, products and successions* (reprinted). Chapman & Hall.
- Cronin, S. J., Hodgson, K. A., Neall, V. E., Palmer, A. S., & Lecointre, J. A. (1997). 1995 Ruapehu lahars in relation to the late Holocene lahars of Whangaehu River, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 40(4), 507-520.
- Doyle, E. E., Cronin, S. J., & Thouret, J.-C. (2011). Defining conditions for bulking and debulking in lahars. *Geological Society of America Bulletin*, 123(7-8), 1234-1246. <https://doi.org/10.1130/B30227.1>
- Emery, X. (2013). *Geoestadística*. Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile.

- Ettinger, S. (2014). *GPR-derived architecture of a lahar-generated fan at Cotopaxi volcano, Ecuador*. 15.
- Ettinger, S., Manville, V., Kruse, S., & Paris, R. (2014). GPR-derived architecture of a lahar-generated fan at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Geomorphology*, 213, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.013>
- Fagents, S. A., & Baloga, S. M. (2006). Toward a model for the bulking and debulking of lahars. *Journal of Geophysical Research*, 111(B10), B10201. <https://doi.org/10.1029/2005JB003986>
- Ferreira, M. R., & Aira, V. G. (2017). *Aplicaciones topográficas de los drones*. 11.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). *Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters*. 24.
- Geoscience, M. (2011). *MALÁ ProEx Control Unit Manual v.2.0*.
- Gómez-Ortiz, D. (2010). Application of ground penetrating radar (GPR) to delineate clay layers in wetlands. A case study in the Soto Grande and Soto Chico watercourses, Doñana (SW Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 7.
- Graettinger, A. H., Manville, V., & Briggs, R. M. (2010). Depositional record of historic lahars in the upper Whangaehu Valley, Mt. Ruapehu, New Zealand: Implications for trigger mechanisms, flow dynamics and lahar hazards. *Bulletin of Volcanology*, 72(3), 279-296. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0318-2>
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., Samaniego, P., Pennec, J. L. L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 6.
- Hall, M., & Mothes, P. (2007). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675-702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Inman, D. (1952). Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 22.
- Jones, R. J. (2016). The Initiation of Rain-Triggered Lahars. *University of Leeds School of Earth and Environment*, 301.
- MALA GeoScience. (2012). *MALA Professional Explorer*. DRM Latinoamérica.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques*, 12.

- Mothes, P. A., Hall, M. L., & Janda, R. J. (1998). The enormous Chillos Valley Lahar: An ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59(4), 233-244.
- Mothes, P. A., & Vallance, J. W. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador. En *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (pp. 141-168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00006-X>
- Mothes, P., Espin, P., & Minard, H. (2016). *Mapa regional de amenazas volcánicas potenciales del volcán Cotopaxi, zona norte*. [Map]. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y el Instituto Geográfico Militar.
- Mothes, P., Hall, M. L., Andrade, D., Samaniego, P., Pierson, T. C., Ruiz, A. G., & Yepes, H. (2004). *Character, stratigraphy and magnitude of historical lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador)*. 23.
- Murcia, H.F., Hurtado, B. O., Cortés, G. P., Macías, J. L., & Cepeda, H. (2008). The ~2500 yr B.P. Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 171(3-4), 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.11.016>
- Murcia, Hugo F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G. E., Arnosio, M., & Scolamacchia, T. (2011). Depósitos volcánicoclásticos: Términos y conceptos para una clasificación en español. *Revista Geológica de América Central*, 48. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i48.12211>
- Nocquet, J.-M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguiña Mendoza, J. M., Martínez, W., Tavera, H., & Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287-291. <https://doi.org/10.1038/ngeo2099>
- Pierson, T. C. (2005). *Hyperconcentrated flow—Transitional process between water flow and debris flow*. 44.
- Pierson, T. C., & Costa, J. (1987). A rhéologie classification of subaerial sediment-water flows. *U.S. Geological Survey*.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 17-66. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90082-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90082-Q)
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., & Aguilera, E. (2014). Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from

- multiscale lahar simulations. *Geomorphology*, 207, 51-63.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.026>
- Procter, J. N., Cronin, S. J., Fuller, I. C., Sheridan, M., Neall, V. E., & Keys, H. (2010). Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu. *Geomorphology*, 116(1-2), 162-174.
- Rodolfo, K. S., & Arguden, A. T. (Eds.). (1991). Rain-lahar generation and sediment delivery systems at Mayon Volcano, Philippines. *Society for Sedimentary Geology*, 18. <https://doi.org/10.2110/pec.91.45>
- Saltos, E. (2017). *Estimación de los caudales de los lahares del 26 de junio de 1877 en cuatro quebradas mayores del volcán Cotopaxi*. Escuela Politécnica Nacional.
- Scott, K. M., & Vallance, J. W. (1995). *Sedimentology, Behavior, and Hazards of Debris Flows at Mount Rainier, Washington*. 66.
- Smith, G. A. (1986). Coarse-grained nonmarine volcanoclastic sediment: Terminology and depositional process. *Geological Society of America Bulletin*, 11.
- Sodiro, L. (1877). *Relación Sobre la Erupción del Cotopaxi Acaecida el Día 26 de Junio, de 1877*. Biblioteca Nacional del Ecuador «Eugenio Espejo».
- Thompson, E. H. (1965). Review of methods of independent model aerial triangulation. *The Photogrammetric Record*, 5(26), 72-79. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1965.tb00401.x>
- Umbal, J. V., & Rodolfo, K. S. (1996). *The 1991 Lahars of Southwestern Mount Pinatubo and Evolution of the Lahar-Dammed Mapanuepe Lake*. 32.
- Vallance, J. W., & Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. En *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 649-664). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00037-7>
- Volker, H. X., Wasklewicz, T. A., & Ellis, M. A. (2007). A topographic fingerprint to distinguish alluvial fan formative processes. *Geomorphology*, 88(1-2), 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.008>
- Zapata, M. C. Z. (2015). *Estimación del volumen de los glaciares Antisana 12 y Antisana 15 mediante el método geofísico de radar de penetración de suelo (GPR)*. 154.

ANEXOS

Anexo I Tablas de datos de las muestras de la Q. Jatabamba, resultados de la granulometría de los depósitos de lahares secundarios.

JATA_MUESTREO_01							
Peso inicial muestra seca=			1346,76				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,24	468,65	17,41	1,33	17,41	0,31
16	-4,0	447,27	488,78	41,51	3,17	58,92	1,05
8	-3,0	407,39	450,87	43,48	3,33	102,4	1,82
4	-2,0	375,77	412,68	36,91	2,82	139,31	2,48
2	-1,0	344,66	417,88	73,22	5,60	212,53	3,78
1	0,0	315,39	449,73	134,34	10,27	346,87	6,17
0,5	1,0	316,84	483,41	166,57	12,74	513,44	9,13
0,25	2,0	416,26	608,63	192,37	14,71	705,81	12,55
0,125	3,0	206,45	540,39	333,94	25,54	1039,75	18,49
0,063	4,0	399,33	540,09	140,76	10,76	1180,51	20,99
Fondo	5,0	411,18	538,27	127,09	9,72	1307,6	23,25
				1307,60	100,00	5624,55	100
JATA_MUESTREO_02							
Peso inicial muestra seca=			1143,94				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,2	451,2	0	0,00	0	0,00
16	-4,0	447,25	471,56	24,31	2,15	24,31	0,54
8	-3,0	407,49	422,69	15,2	1,35	39,51	0,87
4	-2,0	375,77	402,39	26,62	2,36	66,13	1,46
2	-1,0	344,53	393,62	49,09	4,35	115,22	2,55
1	0,0	315,34	418,35	103,01	9,12	218,23	4,83
0,5	1,0	316,89	485,63	168,74	14,94	386,97	8,56
0,25	2,0	216,11	466,21	250,1	22,14	637,07	14,09
0,125	3,0	406,6	651,52	244,92	21,68	881,99	19,51
0,063	4,0	399,44	539,28	139,84	12,38	1021,83	22,60
Fondo	5,0	411,18	518,9	107,72	9,54	1129,55	24,99
				1129,55	100,00	4520,81	100
JATA_MUESTREO_03							
Peso inicial muestra seca=			1201,35				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,25	451,25	0	0,00	0	0,00
16	-4,0	447,28	459,03	11,75	1,00	11,75	0,32
8	-3,0	407,36	451,3	43,94	3,74	55,69	1,50
4	-2,0	375,78	407,73	31,95	2,72	87,64	2,35
2	-1,0	344,52	373,59	29,07	2,47	116,71	3,13

1	0,0	315,44	355,92	40,48	3,44	157,19	4,22
0,5	1,0	317,02	402,08	85,06	7,24	242,25	6,51
0,25	2,0	216,13	390,91	174,78	14,87	417,03	11,20
0,125	3,0	406,57	628,95	222,38	18,92	639,41	17,17
0,063	4,0	399,41	579,82	180,41	15,35	819,82	22,02
Fondo	5,0	411,16	766,98	355,82	30,27	1175,64	31,58
				1175,64	100,00	3723,13	100

Anexo II Tablas de datos de las muestras de la Q. Pucarumi, resultados de la granulometría de los depósitos de lahares secundarios.

PUCA_MUESTREO_01_A							
Peso inicial muestra seca=			1405,16				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,2	451,2	0	0,00	0	0,00
16	-4,0	447,37	509,61	62,24	4,54	62,24	1,39
8	-3,0	407,42	479,39	71,97	5,25	134,21	2,99
4	-2,0	375,44	422,66	47,22	3,45	181,43	4,04
2	-1,0	344,58	380,31	35,73	2,61	217,16	4,84
1	0,0	316,33	350,5	34,17	2,49	251,33	5,60
0,5	1,0	316,98	369,27	52,29	3,82	303,62	6,77
0,25	2,0	215,68	322,86	107,18	7,82	410,8	9,16
0,125	3,0	406,32	619,35	213,03	15,54	623,83	13,90
0,063	4,0	399,78	707,82	308,04	22,48	931,87	20,77
Fondo	5,0	411,16	849,75	438,59	32,00	1370,46	30,54
				1370,46	100,00	4486,95	100

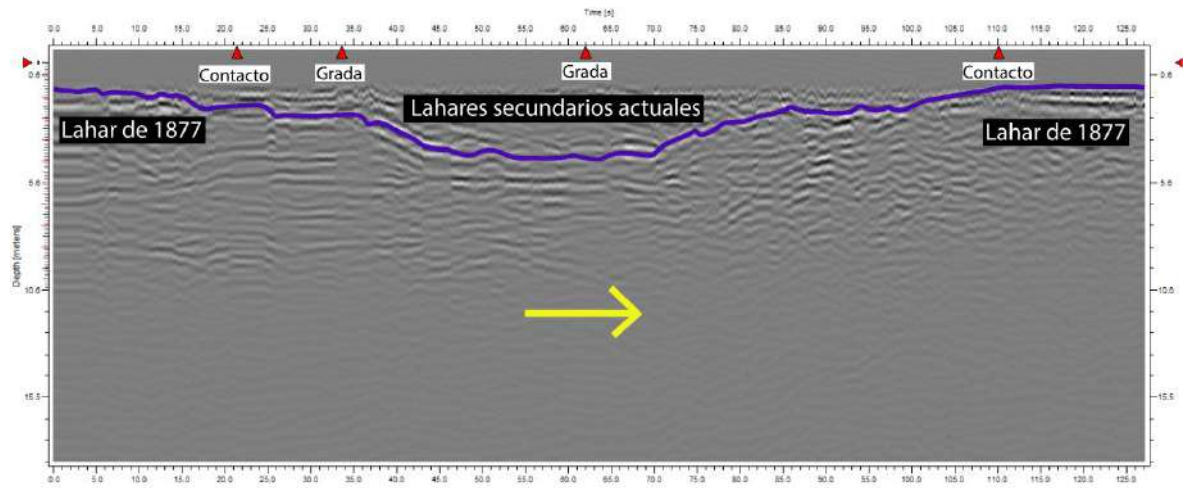
PUCA_MUESTREO_01_B							
Peso inicial muestra seca=			1129,18				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,24	451,24	0	0,00	0	0,00
16	-4,0	447,44	484,82	37,38	3,38	37,38	0,96
8	-3,0	407,37	447,35	39,98	3,62	77,36	2,00
4	-2,0	375,93	425,08	49,15	4,45	126,51	3,26
2	-1,0	344,5	373	28,5	2,58	155,01	4,00
1	0,0	316,29	361,45	45,16	4,09	200,17	5,17
0,5	1,0	316,88	399,74	82,86	7,50	283,03	7,30
0,25	2,0	215,57	367,41	151,84	13,75	434,87	11,22
0,125	3,0	406,19	608,51	202,32	18,32	637,19	16,44
0,063	4,0	399,65	581,8	182,15	16,49	819,34	21,14
Fondo	5,0	411,16	696,14	284,98	25,81	1104,32	28,50
				1104,32	100,00	3875,18	100

PUCA_MUESTREO_01_C							
Peso inicial muestra seca=			1226,39				
Diámetro mm	Phi	peso tamiz (g)	peso tamiz + muestra (g)	peso muestra (g)	% W	peso acumulado (g)	% acumulado
31,5	-5,0	451,22	451,22	0	0,00	0	0,00
16	-4,0	447,49	464,19	16,7	1,40	16,7	0,34
8	-3,0	407,47	496,17	88,7	7,42	105,4	2,12
4	-2,0	375,81	427,31	51,5	4,31	156,9	3,16

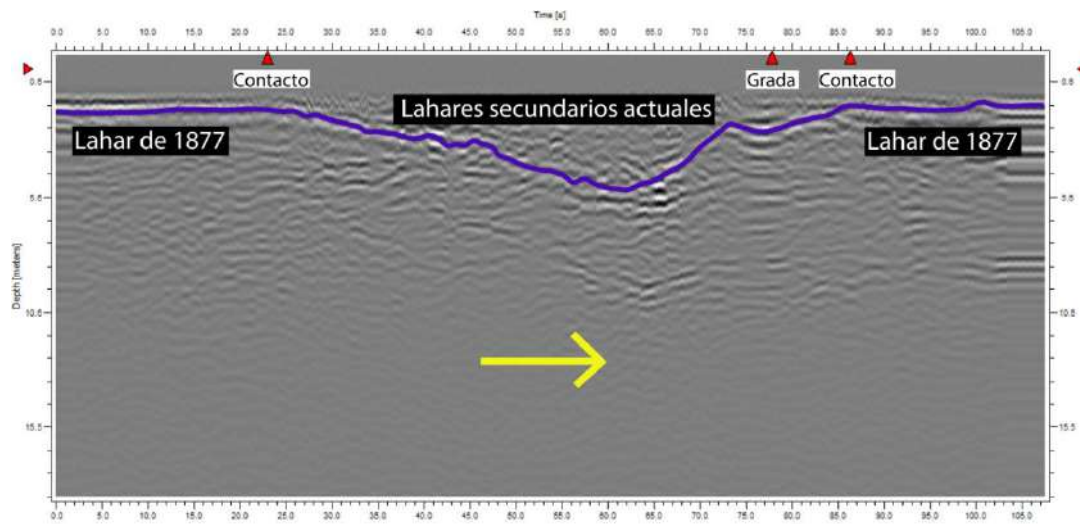
2	-1,0	344,66	413,2	68,54	5,73	225,44	4,53
1	0,0	316,25	423,17	106,92	8,94	332,36	6,68
0,5	1,0	316,86	451,93	135,07	11,29	467,43	9,40
0,25	2,0	215,22	394,13	178,91	14,96	646,34	13,00
0,125	3,0	406,28	596,86	190,58	15,93	836,92	16,83
0,063	4,0	399,6	551,3	151,7	12,68	988,62	19,88
Fondo	5,0	411,17	618,65	207,48	17,35	1196,1	24,06
				1196,10	100,00	4972,21	100

Anexo III Radargramas obtenidos con el equipo GPR interpretados, Quebrada Jatabamba.

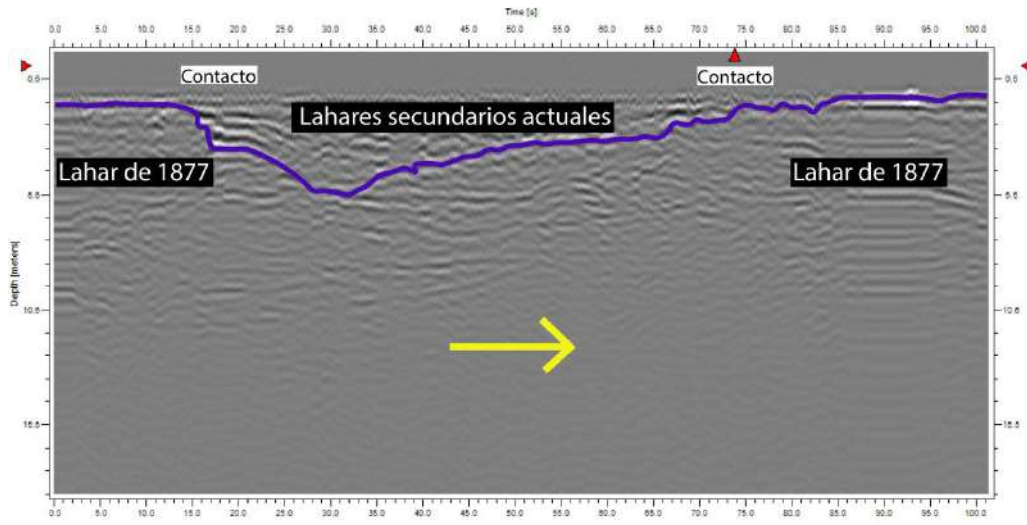
J1



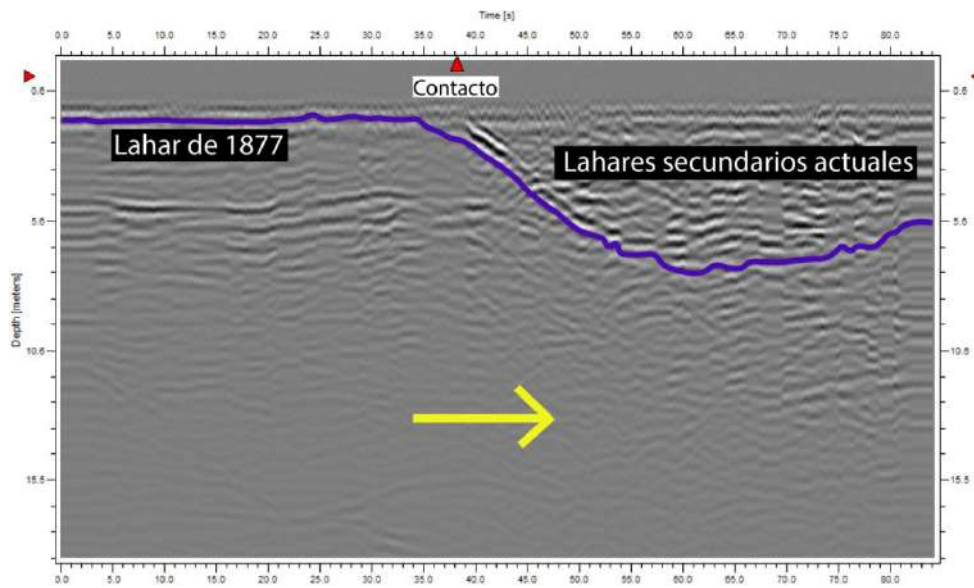
J2



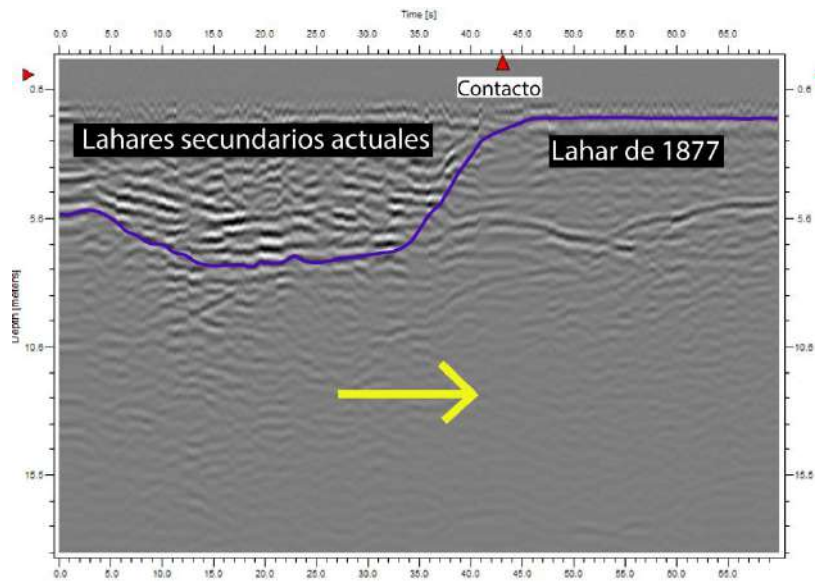
J3



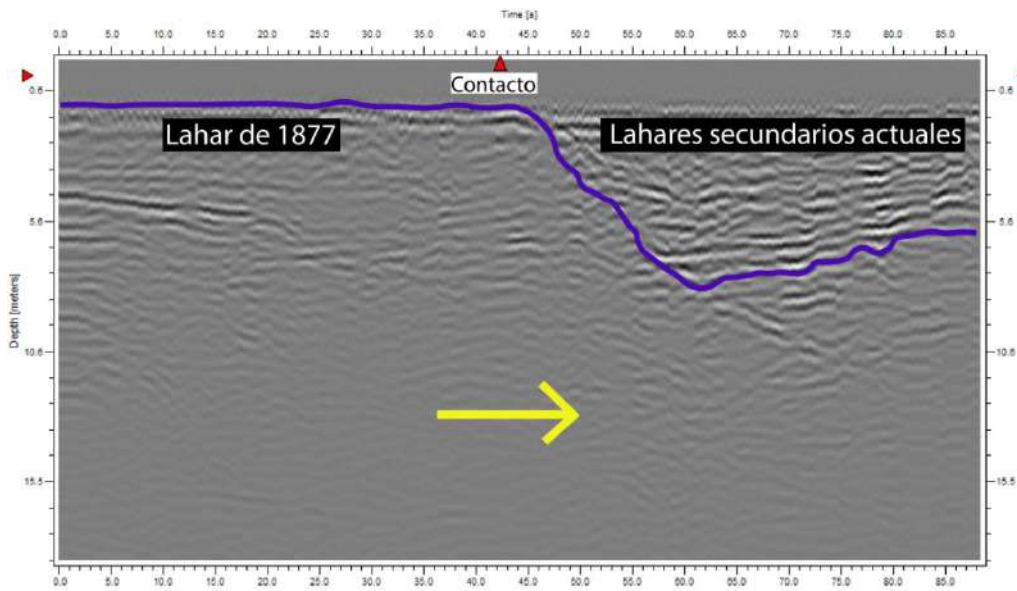
J4



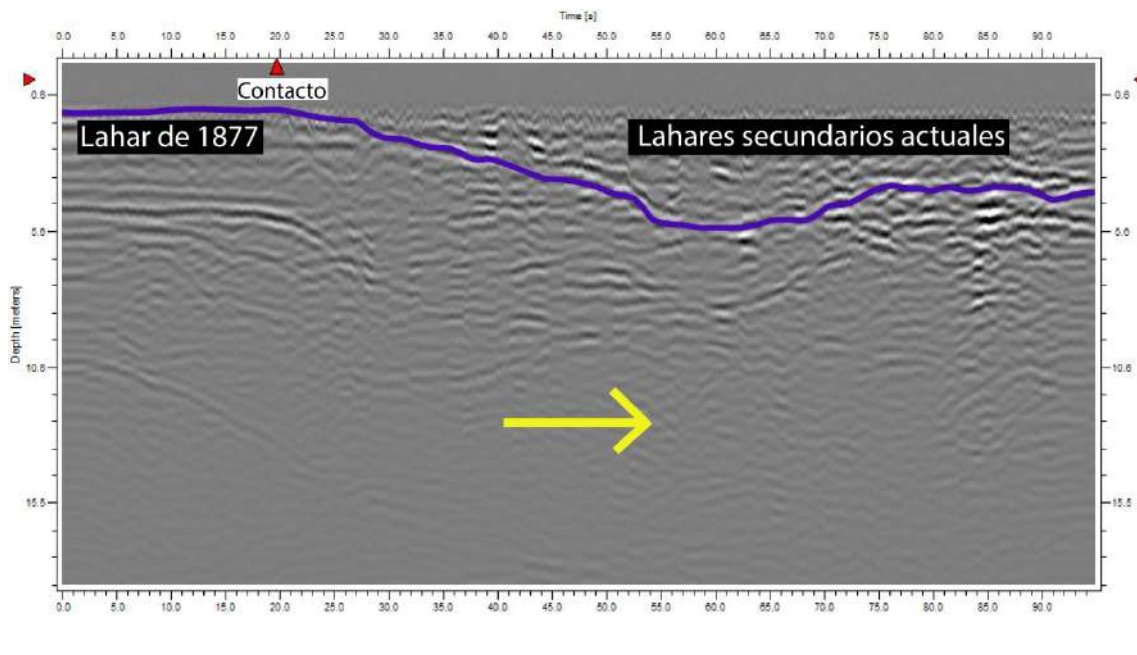
J5



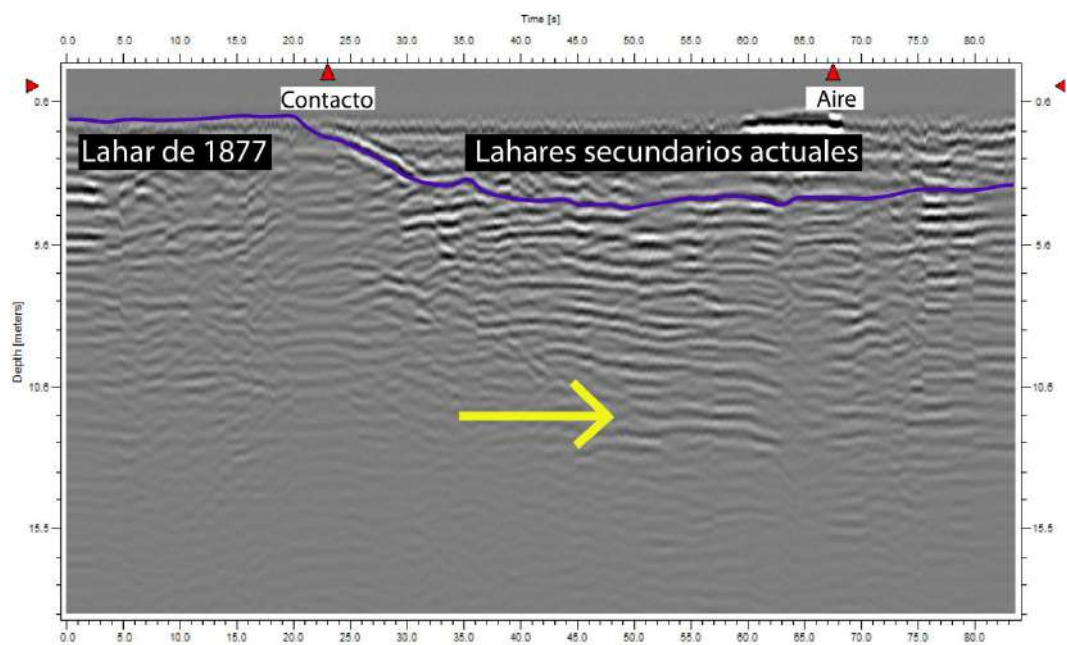
J6



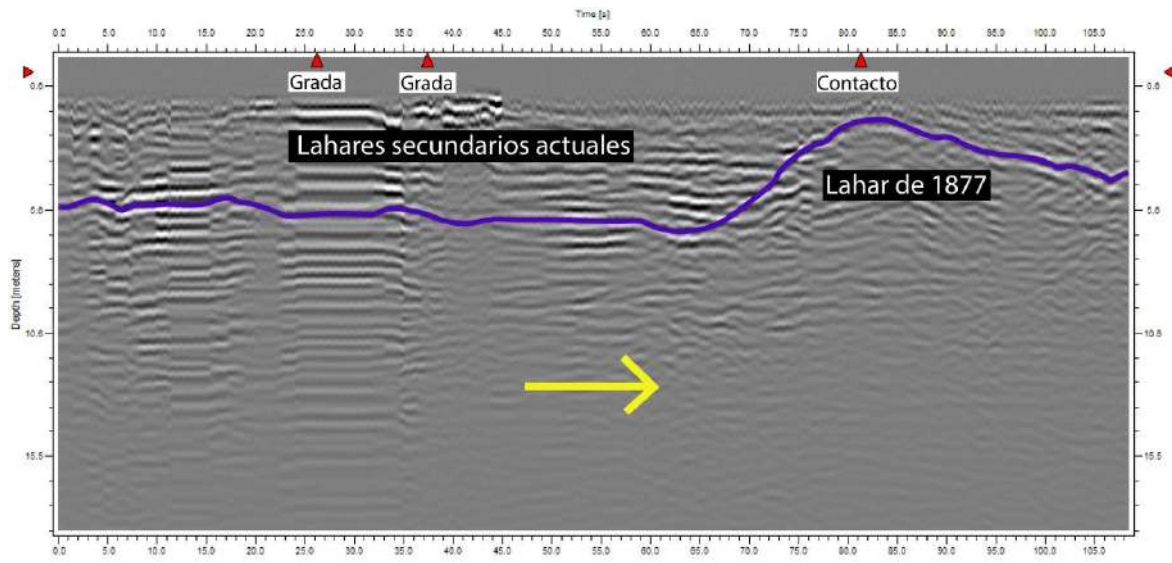
J7



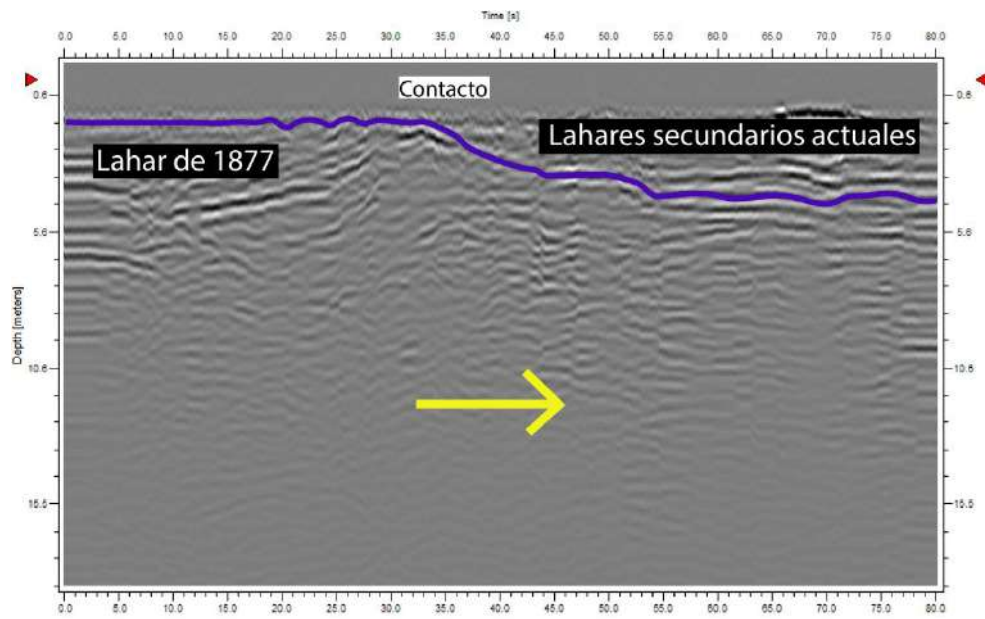
J8



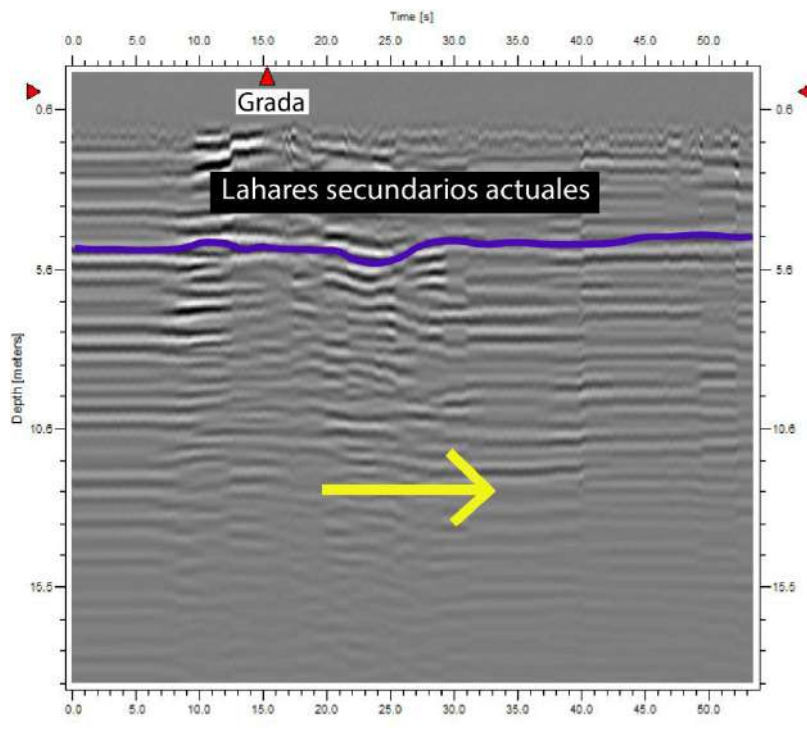
J9



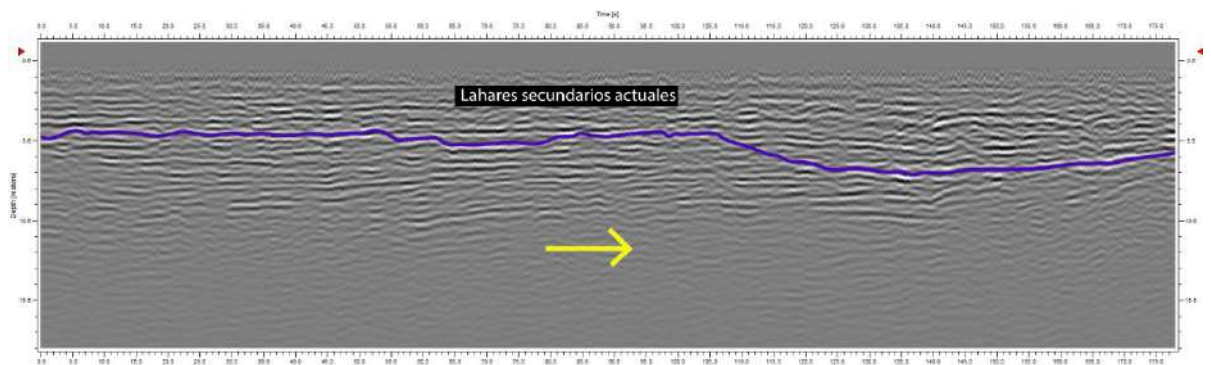
J10



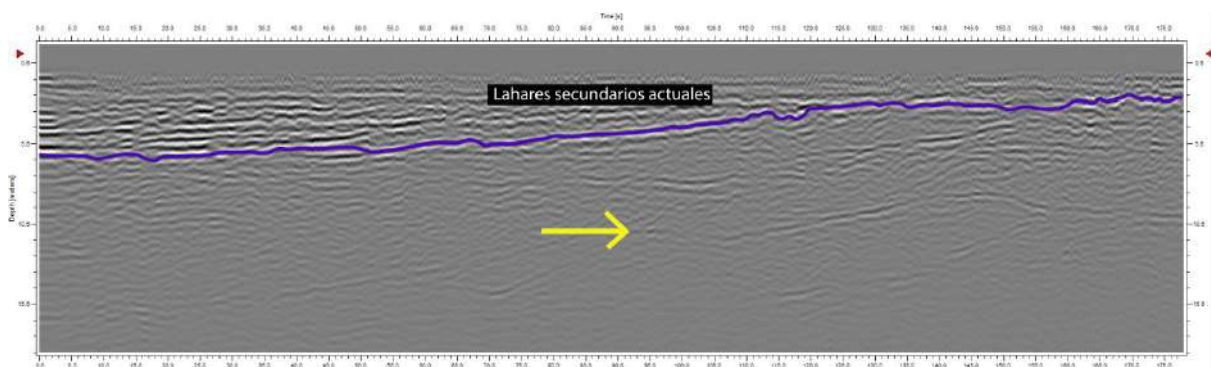
J11



J12

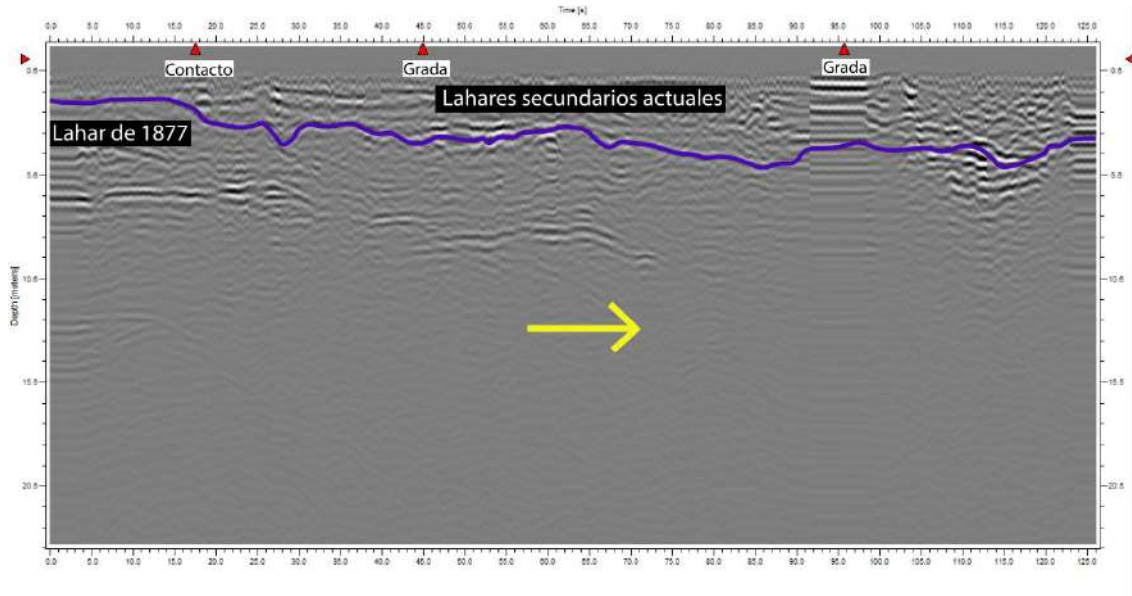


J13

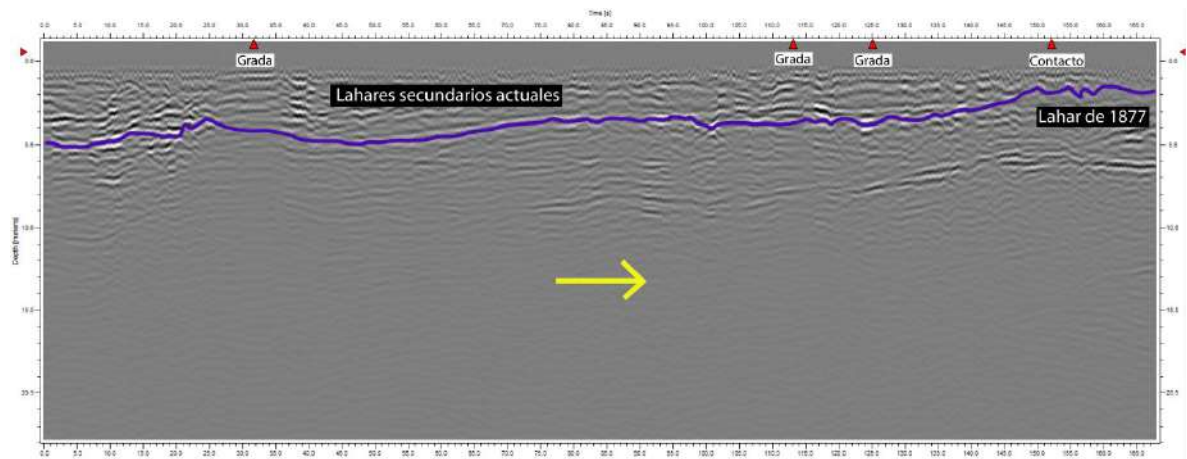


Anexo IV Radargramas obtenidos con el equipo GPR interpretados, Quebrada Pucarumi.

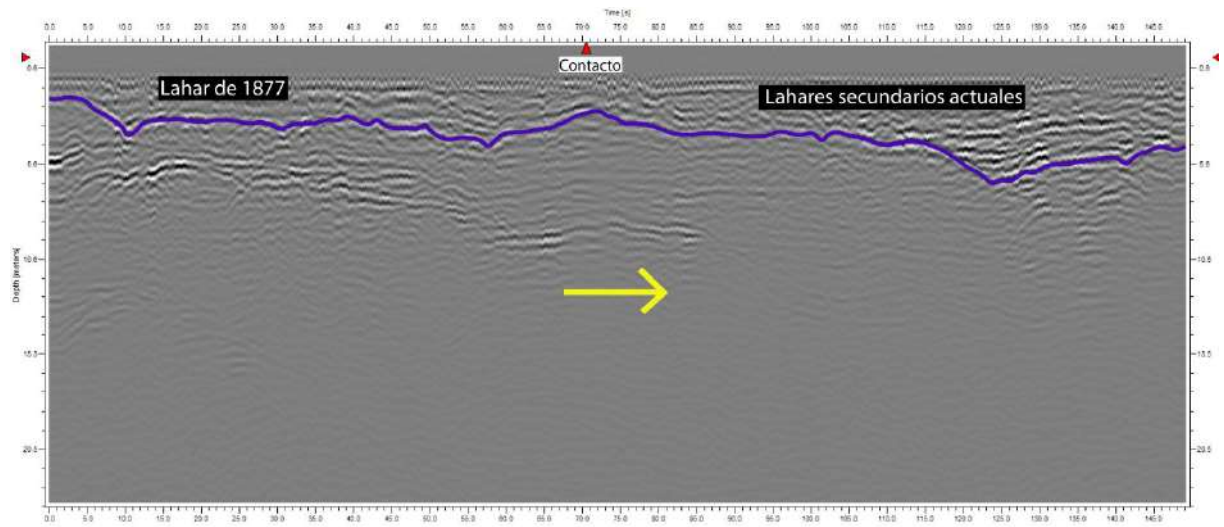
P1



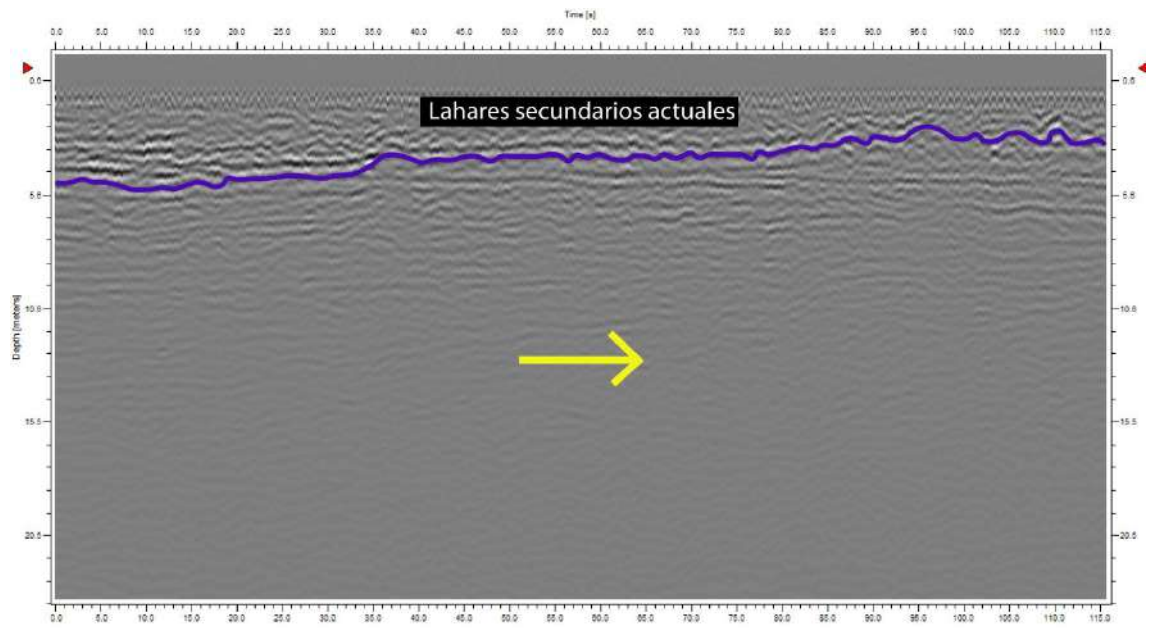
P2



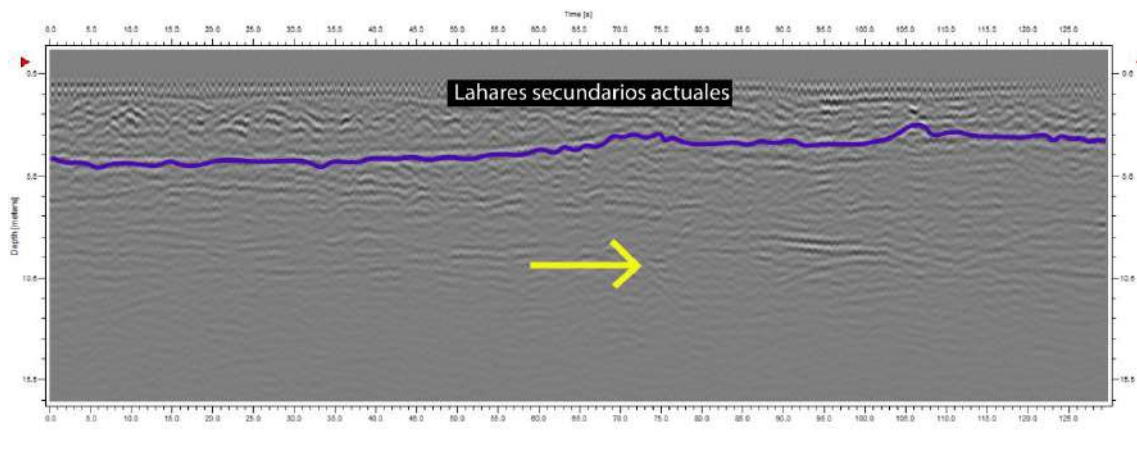
P3



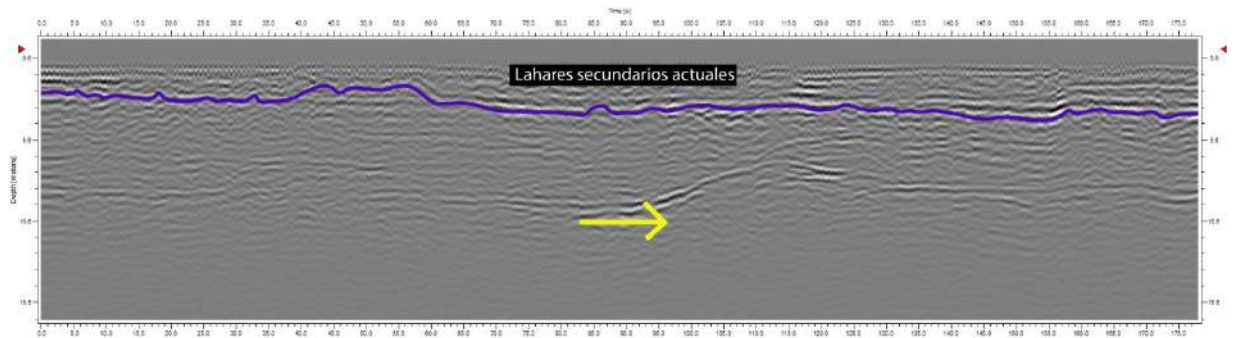
P4



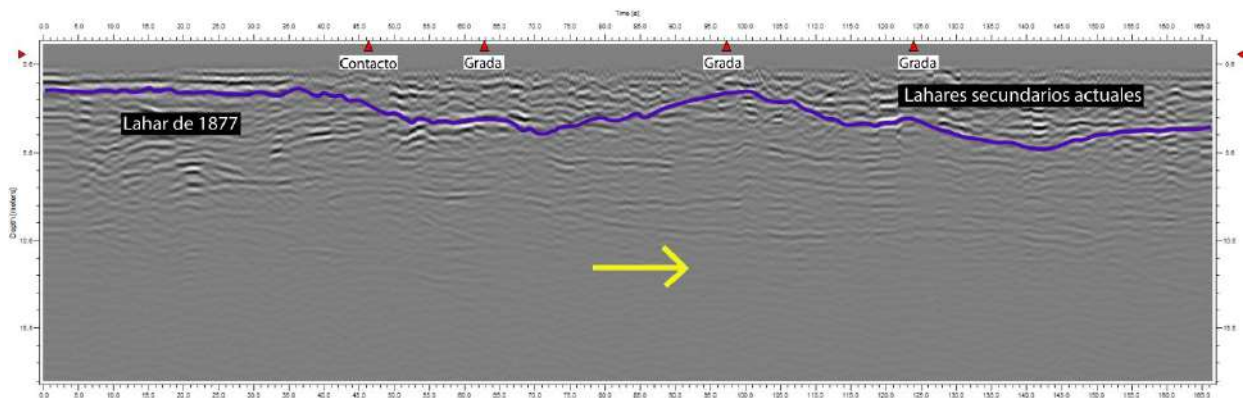
P5



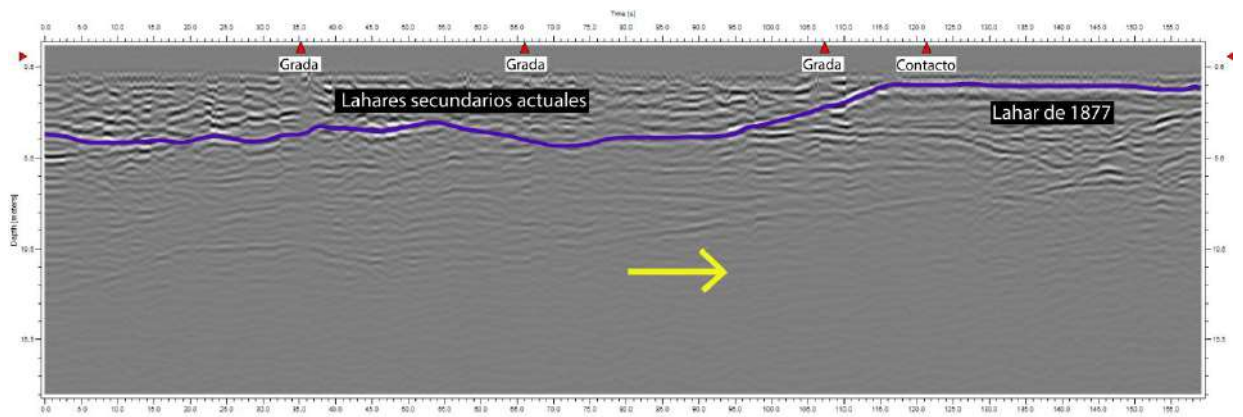
P6



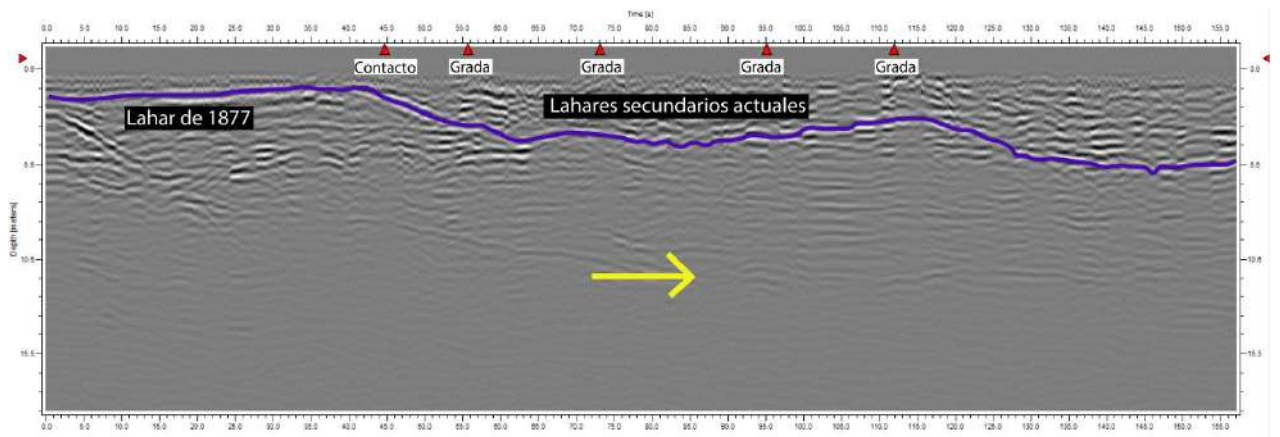
P7



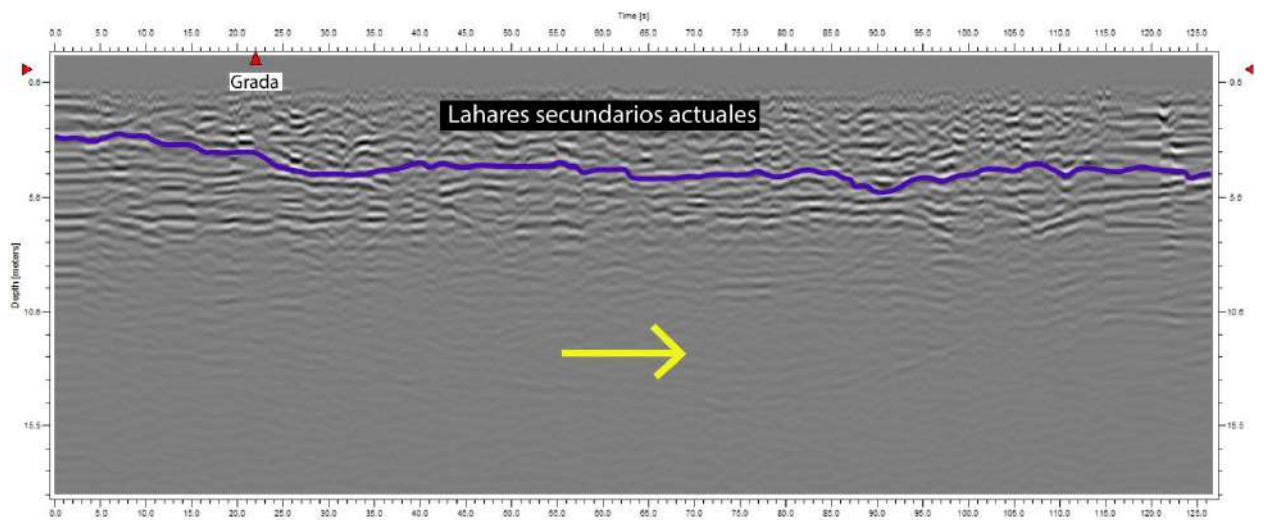
P8



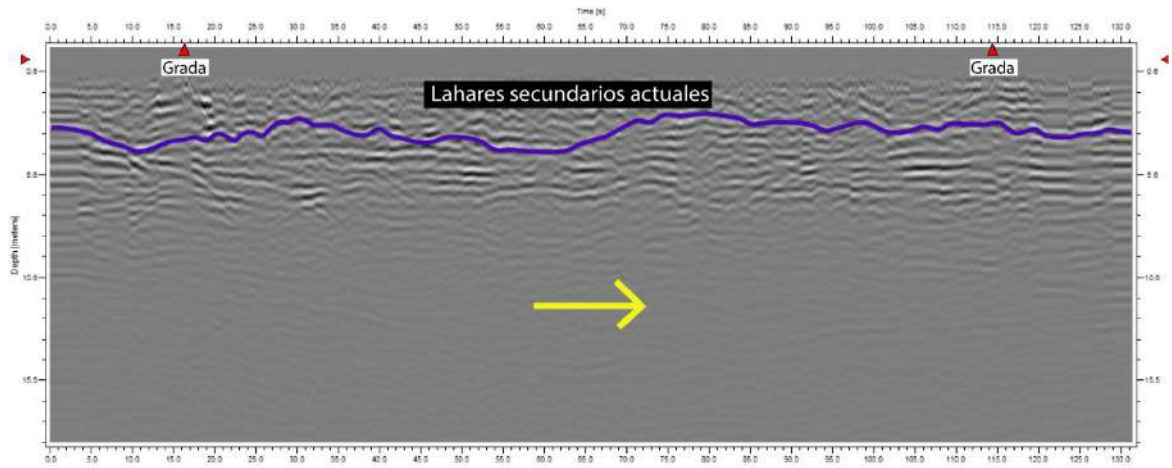
P9



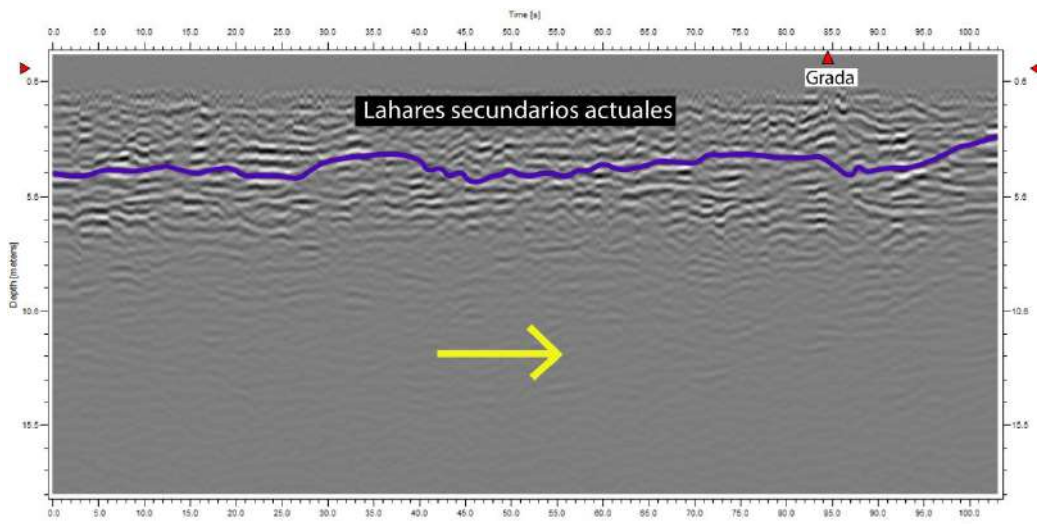
P10



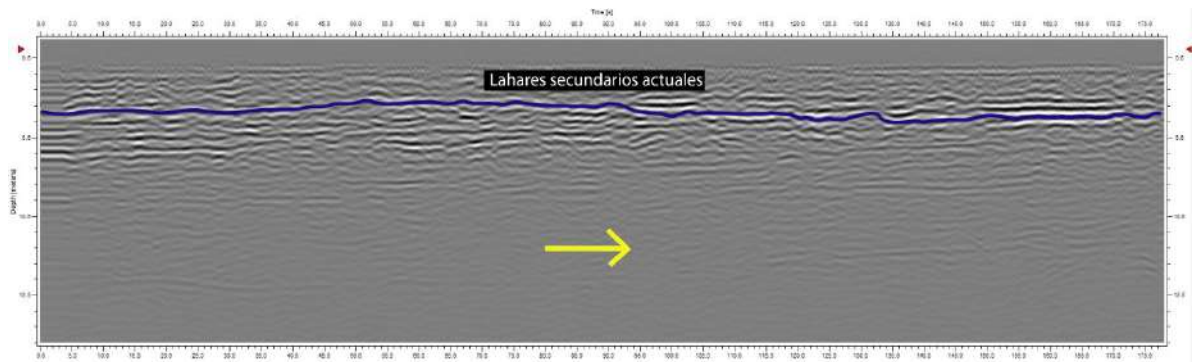
P11



P12



P13



Anexo V *Tabla de coordenadas y espesores en los perfiles de la Q. Jatabamba.*

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J1	1	789931,98	9928476,49	2,08
J1	2	789932,14	9928473,79	2,49
J1	3	789932,29	9928471,09	2,46
J1	4	789932,45	9928468,39	3,34
J1	5	789932,60	9928465,69	4,20
J1	6	789932,76	9928462,99	4,38
J1	7	789932,92	9928460,29	4,43
J1	8	789933,07	9928457,59	4,26
J1	9	789933,23	9928454,89	3,70
J1	10	789933,38	9928452,19	2,84
J1	11	789933,42	9928449,49	2,32
J1	12	789933,27	9928446,79	2,40
J1	13	789933,12	9928444,09	2,13
J1	14	789932,97	9928441,39	1,67
J1	15	789932,82	9928438,69	1,22
J2	1	789918,54	9928436,41	1,80
J2	2	789918,70	9928439,13	2,07
J2	3	789918,85	9928441,86	2,43
J2	4	789919,01	9928444,58	2,82
J2	5	789919,16	9928447,30	2,93
J2	6	789919,32	9928450,03	3,15
J2	7	789919,47	9928452,75	4,08
J2	8	789919,68	9928455,46	4,52
J2	9	789920,40	9928458,09	5,07
J2	10	789921,11	9928460,72	5,01
J2	11	789921,83	9928463,36	4,13
J2	12	789922,55	9928465,99	2,57
J2	13	789923,26	9928468,62	2,72
J2	14	789923,98	9928471,25	2,24
J2	15	789924,70	9928473,88	1,62
J3	1	789906,60	9928467,22	1,98
J3	2	789906,14	9928464,46	3,63
J3	3	789905,69	9928461,70	4,35
J3	4	789905,23	9928458,93	5,45
J3	5	789904,78	9928456,17	4,97
J3	6	789904,81	9928453,39	4,25
J3	7	789904,99	9928450,59	3,96
J3	8	789905,16	9928447,80	3,48
J3	9	789905,33	9928445,00	3,36
J3	10	789905,51	9928442,21	3,27

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J3	11	789905,68	9928439,42	3,09
J3	12	789906,00	9928436,64	2,57
J3	13	789906,54	9928433,90	1,97
J4	1	789716,75	9928388,32	2,45
J4	2	789716,99	9928390,98	3,36
J4	3	789717,24	9928393,64	4,62
J4	4	789717,49	9928396,30	5,82
J4	5	789717,73	9928398,97	6,45
J4	6	789717,98	9928401,63	6,89
J4	7	789718,23	9928404,29	7,59
J4	8	789718,27	9928406,97	7,38
J4	9	789718,29	9928409,64	7,16
J4	10	789718,13	9928412,30	7,02
J4	11	789717,57	9928414,91	6,66
J4	12	789717,01	9928417,53	6,05
J4	13	789716,45	9928420,14	5,66
J5	1	789698,25	9928413,36	5,42
J5	2	789698,96	9928410,66	5,52
J5	3	789699,67	9928407,95	6,61
J5	4	789700,38	9928405,25	7,42
J5	5	789701,12	9928402,55	7,39
J5	6	789702,30	9928400,01	7,26
J5	7	789703,47	9928397,47	7,11
J5	8	789704,65	9928394,93	6,68
J5	9	789705,82	9928392,40	4,11
J5	10	789706,99	9928389,86	2,20
J6	1	789698,37	9928390,53	1,26
J6	2	789696,53	9928392,85	3,12
J6	3	789694,69	9928395,17	5,14
J6	4	789693,10	9928397,67	7,75
J6	5	789691,52	9928400,18	7,73
J6	6	789689,94	9928402,68	7,61
J6	7	789688,36	9928405,18	6,68
J6	8	789686,78	9928407,69	6,12
J6	9	789685,20	9928410,19	6,04
J7	1	789698,84	9928377,57	1,13
J7	2	789696,44	9928378,57	1,45
J7	3	789694,06	9928379,63	1,84
J7	4	789691,69	9928380,71	2,31
J7	5	789689,33	9928381,79	2,69
J7	6	789686,96	9928382,87	3,09
J7	7	789684,59	9928383,95	3,66
J7	8	789682,25	9928385,08	3,92

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J7	9	789680,00	9928386,39	4,45
J7	10	789677,75	9928387,70	5,38
J7	11	789675,50	9928389,00	5,47
J7	12	789673,25	9928390,31	5,20
J7	13	789670,93	9928391,48	5,02
J7	14	789668,53	9928392,49	4,37
J7	15	789666,13	9928393,49	4,03
J7	16	789663,73	9928394,50	4,00
J7	17	789661,33	9928395,51	3,98
J7	18	789658,93	9928396,51	4,28
J7	19	789656,53	9928397,52	4,22
J8	1	789594,30	9928261,55	1,84
J8	2	789596,87	9928261,02	2,59
J8	3	789599,44	9928260,49	3,47
J8	4	789602,03	9928260,05	3,70
J8	5	789604,63	9928259,63	4,06
J8	6	789607,22	9928259,22	4,21
J8	7	789609,81	9928258,81	4,25
J8	8	789612,41	9928258,40	3,97
J8	9	789615,00	9928257,99	3,94
J8	10	789617,60	9928257,57	3,95
J8	11	789620,19	9928257,16	3,97
J8	12	789622,79	9928256,75	3,79
J8	13	789625,38	9928256,34	3,71
J8	14	789627,97	9928255,93	3,51
J9	1	789623,62	9928242,95	5,48
J9	2	789621,06	9928242,34	5,58
J9	3	789618,50	9928241,73	5,39
J9	4	789615,95	9928241,12	5,30
J9	5	789613,39	9928240,51	5,82
J9	6	789610,83	9928240,41	5,79
J9	7	789608,26	9928240,96	5,81
J9	8	789605,69	9928241,51	6,01
J9	9	789603,13	9928242,10	5,99
J9	10	789600,71	9928243,14	6,07
J9	11	789598,30	9928244,17	6,46
J9	12	789595,88	9928245,21	5,72
J9	13	789593,47	9928246,25	3,33
J9	14	789591,05	9928247,29	2,00
J10	1	789586,61	9928233,78	1,58
J10	2	789589,26	9928233,82	2,17
J10	3	789591,91	9928233,82	2,90
J10	4	789594,52	9928233,37	3,31

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J10	5	789597,13	9928232,91	3,55
J10	6	789599,74	9928232,46	3,52
J10	7	789602,35	9928232,00	3,75
J10	8	789604,97	9928231,54	4,32
J10	9	789607,58	9928231,09	4,21
J10	10	789610,20	9928230,88	4,40
J10	11	789612,84	9928231,11	4,31
J10	12	789615,48	9928231,34	4,40
J10	13	789618,12	9928231,57	4,56
J10	14	789620,71	9928232,02	4,29
J10	15	789623,19	9928232,98	4,27
J10	16	789625,66	9928233,94	4,47
J11	1	789625,66	9928233,94	4,91
J11	2	789627,73	9928230,49	4,60
J12	1	789602,15	9928232,37	5,37
J12	2	789602,41	9928234,90	5,40
J12	3	789602,68	9928237,42	4,96
J12	4	789602,95	9928239,95	5,08
J12	5	789603,21	9928242,48	5,10
J12	6	789603,48	9928245,00	5,08
J12	7	789603,74	9928247,53	5,23
J12	8	789604,01	9928250,05	5,31
J12	9	789604,28	9928252,58	5,13
J12	10	789604,54	9928255,11	5,10
J12	11	789604,81	9928257,63	5,28
J12	12	789605,08	9928260,16	5,17
J12	13	789605,34	9928262,69	5,23
J12	14	789605,61	9928265,21	5,16
J12	15	789605,87	9928267,74	5,23
J12	16	789606,18	9928270,26	5,26
J12	17	789606,67	9928272,75	5,17
J12	18	789607,16	9928275,24	5,25
J12	19	789607,64	9928277,74	5,16
J12	20	789608,13	9928280,23	4,96
J12	21	789608,62	9928282,72	4,96
J12	22	789609,10	9928285,21	5,46
J12	23	789609,59	9928287,71	5,47
J12	24	789610,07	9928290,20	5,44
J12	25	789610,56	9928292,69	5,79
J12	26	789611,05	9928295,19	5,85
J12	27	789611,53	9928297,68	5,88
J12	28	789612,02	9928300,17	5,79
J12	29	789612,70	9928302,61	5,71

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J12	30	789613,66	9928304,96	5,80
J12	31	789614,62	9928307,31	5,67
J12	32	789615,58	9928309,66	5,34
J12	33	789616,54	9928312,02	5,16
J12	34	789617,49	9928314,37	5,29
J12	35	789618,45	9928316,72	5,31
J12	36	789619,41	9928319,07	5,20
J12	37	789620,37	9928321,43	5,10
J12	38	789621,33	9928323,78	5,10
J12	39	789622,29	9928326,13	5,22
J12	40	789623,24	9928328,48	5,17
J12	41	789624,50	9928330,68	5,14
J12	42	789625,83	9928332,85	5,16
J12	43	789627,17	9928335,01	6,00
J12	44	789628,50	9928337,17	6,36
J12	45	789629,84	9928339,33	6,72
J12	46	789631,17	9928341,49	6,92
J12	47	789632,51	9928343,65	7,08
J12	48	789633,84	9928345,81	7,41
J12	49	789635,17	9928347,97	7,35
J12	50	789636,51	9928350,14	7,40
J12	51	789637,84	9928352,30	7,54
J12	52	789639,18	9928354,46	7,54
J12	53	789640,45	9928356,66	7,70
J12	54	789641,72	9928358,85	7,58
J12	55	789643,00	9928361,05	7,63
J12	56	789644,27	9928363,25	7,44
J12	57	789645,54	9928365,45	7,41
J12	58	789646,82	9928367,64	7,40
J12	59	789648,09	9928369,84	7,40
J12	60	789649,37	9928372,04	7,35
J12	61	789650,64	9928374,24	7,26
J12	62	789651,91	9928376,43	7,11
J12	63	789653,19	9928378,63	7,02
J12	64	789654,61	9928380,73	7,01
J12	65	789656,18	9928382,73	6,95
J12	66	789657,74	9928384,73	6,72
J12	67	789659,30	9928386,73	6,57
J12	68	789660,87	9928388,73	6,44
J13	1	789715,82	9928396,03	6,27
J13	2	789718,35	9928396,49	6,39
J13	3	789720,88	9928396,94	6,39
J13	4	789723,41	9928397,39	6,54

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J13	5	789725,93	9928397,85	6,29
J13	6	789728,43	9928398,41	6,56
J13	7	789730,86	9928399,23	6,41
J13	8	789733,30	9928400,06	6,36
J13	9	789735,73	9928400,88	6,32
J13	10	789738,16	9928401,70	6,13
J13	11	789740,59	9928402,53	6,12
J13	12	789743,03	9928403,35	6,12
J13	13	789745,46	9928404,17	5,94
J13	14	789747,94	9928404,80	5,91
J13	15	789750,48	9928405,21	5,88
J13	16	789753,01	9928405,61	5,86
J13	17	789755,55	9928406,02	6,06
J13	18	789758,08	9928406,43	5,97
J13	19	789760,62	9928406,84	5,71
J13	20	789763,15	9928407,24	5,55
J13	21	789765,69	9928407,64	5,55
J13	22	789768,25	9928407,80	5,64
J13	23	789770,81	9928407,97	5,64
J13	24	789773,38	9928408,13	5,49
J13	25	789775,94	9928408,30	5,32
J13	26	789778,50	9928408,46	5,19
J13	27	789781,06	9928408,62	5,07
J13	28	789783,63	9928408,79	5,02
J13	29	789786,19	9928408,95	4,96
J13	30	789788,75	9928409,12	4,82
J13	31	789791,28	9928409,54	4,60
J13	32	789793,82	9928409,97	4,48
J13	33	789796,35	9928410,41	4,39
J13	34	789798,88	9928410,84	4,13
J13	35	789801,41	9928411,27	3,86
J13	36	789803,94	9928411,70	4,03
J13	37	789806,47	9928412,13	4,09
J13	38	789809,00	9928412,57	3,44
J13	39	789811,53	9928413,00	3,32
J13	40	789814,07	9928413,43	3,15
J13	41	789816,60	9928413,86	3,21
J13	42	789819,13	9928414,30	3,18
J13	43	789821,65	9928414,75	3,20
J13	44	789824,11	9928415,50	3,17
J13	45	789826,57	9928416,24	3,26
J13	46	789829,02	9928416,99	3,24
J13	47	789831,48	9928417,74	3,48

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
J13	48	789833,94	9928418,49	3,35
J13	49	789836,39	9928419,23	3,47
J13	50	789838,72	9928420,31	3,08
J13	51	789841,01	9928421,48	3,12
J13	52	789843,30	9928422,64	2,90
J13	53	789845,59	9928423,80	2,70
J13	54	789847,88	9928424,96	2,93
J13	55	789850,17	9928426,12	2,76
J0	1	789586,12	9928234,19	0,00
J0	2	789590,69	9928247,45	0,00
J0	3	789594,23	9928259,62	0,00
J0	4	789593,04	9928272,78	0,00
J0	5	789595,38	9928284,55	0,00
J0	6	789597,17	9928296,30	0,00
J0	7	789599,71	9928308,41	0,00
J0	8	789601,26	9928319,76	0,00
J0	9	789604,43	9928332,81	0,00
J0	10	789607,88	9928344,88	0,00
J0	11	789612,88	9928355,87	0,00
J0	12	789619,95	9928366,39	0,00
J0	13	789627,53	9928376,79	0,00
J0	14	789635,66	9928386,51	0,00
J0	15	789646,14	9928392,27	0,00
J0	16	789655,94	9928399,29	0,00
J0	17	789665,91	9928406,39	0,00
J0	18	789676,78	9928410,64	0,00
J0	19	789688,17	9928413,02	0,00
J0	20	789700,67	9928414,89	0,00
J0	21	789711,98	9928420,76	0,00
J0	22	789723,41	9928424,33	0,00
J0	23	789735,88	9928421,79	0,00
J0	24	789747,98	9928424,49	0,00
J0	25	789760,16	9928426,83	0,00
J0	26	789772,47	9928430,37	0,00
J0	27	789784,45	9928433,78	0,00
J0	28	789796,36	9928436,64	0,00
J0	29	789808,86	9928440,45	0,00
J0	30	789820,01	9928444,34	0,00
J0	31	789831,28	9928450,09	0,00
J0	32	789844,18	9928451,36	0,00
J0	33	789855,73	9928455,05	0,00
J0	34	789867,68	9928457,04	0,00
J0	35	789880,30	9928458,15	0,00

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
JO	36	789885,82	9928466,68	0,00
JO	37	789899,35	9928468,43	0,00
JO	38	789911,89	9928471,52	0,00
JO	39	789921,77	9928477,28	0,00
JO	40	789931,68	9928476,84	0,00
JO	41	789932,71	9928438,15	0,00
JO	42	789921,72	9928436,56	0,00
JO	43	789909,69	9928433,94	0,00
JO	44	789898,07	9928429,26	0,00
JO	45	789885,96	9928426,79	0,00
JO	46	789874,29	9928422,90	0,00
JO	47	789862,47	9928418,86	0,00
JO	48	789852,31	9928412,35	0,00
JO	49	789840,56	9928407,27	0,00
JO	50	789828,10	9928404,33	0,00
JO	51	789816,98	9928400,20	0,00
JO	52	789806,27	9928394,49	0,00
JO	53	789793,73	9928392,50	0,00
JO	54	789781,66	9928391,31	0,00
JO	55	789769,20	9928388,14	0,00
JO	56	789756,26	9928386,63	0,00
JO	57	789743,88	9928388,14	0,00
JO	58	789730,78	9928388,61	0,00
JO	59	789719,35	9928387,90	0,00
JO	60	789708,32	9928388,77	0,00
JO	61	789702,60	9928377,66	0,00
JO	62	789699,51	9928365,52	0,00
JO	63	789696,73	9928353,88	0,00
JO	64	789689,67	9928343,48	0,00
JO	65	789678,79	9928335,54	0,00
JO	66	789670,22	9928326,65	0,00
JO	67	789662,52	9928316,97	0,00
JO	68	789652,76	9928310,07	0,00
JO	69	789643,95	9928301,41	0,00
JO	70	789638,63	9928289,90	0,00
JO	71	789635,37	9928277,52	0,00
JO	72	789632,60	9928266,17	0,00
JO	73	789629,58	9928254,74	0,00
JO	74	789628,31	9928241,49	0,00
JO	75	789628,07	9928230,49	0,00

Anexo VI *Tabla de coordenadas y espesores en los perfiles de la Q. Pucarumi.*

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P1	1	789212,59	9930095,43	2,49
P1	2	789210,60	9930097,02	3,18
P1	3	789208,61	9930098,60	3,32
P1	4	789206,63	9930100,19	3,48
P1	5	789204,64	9930101,77	3,66
P1	6	789202,65	9930103,36	3,26
P1	7	789200,67	9930104,94	3,18
P1	8	789198,68	9930106,52	3,56
P1	9	789196,69	9930108,11	3,69
P1	10	789194,59	9930109,53	4,10
P1	11	789192,41	9930110,82	3,76
P1	12	789190,22	9930112,11	3,97
P1	13	789188,03	9930113,41	3,91
P1	14	789185,84	9930114,70	3,65
P1	15	789183,65	9930115,99	3,53
P1	16	789181,46	9930117,28	3,32
P1	17	789179,28	9930118,58	3,89
P1	18	789177,09	9930119,87	4,06
P1	19	789174,83	9930121,04	4,13
P1	20	789172,55	9930122,15	4,46
P1	21	789170,26	9930123,26	4,66
P1	22	789167,97	9930124,37	4,73
P1	23	789165,69	9930125,48	4,97
P1	24	789163,40	9930126,59	5,22
P1	25	789161,11	9930127,70	5,01
P1	26	789158,83	9930128,81	4,34
P1	27	789156,54	9930129,92	4,21
P1	28	789154,25	9930131,03	4,19
P1	29	789151,97	9930132,14	4,42
P1	30	789149,68	9930133,25	4,34
P1	31	789147,41	9930134,38	4,46
P1	32	789145,14	9930135,53	4,24
P1	33	789142,87	9930136,67	4,99
P1	34	789140,60	9930137,81	5,10
P1	35	789138,33	9930138,96	4,54
P1	36	789136,06	9930140,10	3,98
P1	37	789133,79	9930141,25	3,89
P2	1	789119,41	9930114,03	5,49
P2	2	789121,55	9930112,55	5,75
P2	3	789123,68	9930111,07	5,43
P2	4	789125,83	9930109,60	4,95

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P2	5	789127,98	9930108,14	5,10
P2	6	789130,14	9930106,69	4,09
P2	7	789132,29	9930105,23	4,72
P2	8	789134,44	9930103,78	4,81
P2	9	789136,60	9930102,32	5,36
P2	10	789138,75	9930100,87	5,40
P2	11	789140,91	9930099,42	5,46
P2	12	789143,06	9930097,96	5,36
P2	13	789145,22	9930096,51	5,19
P2	14	789147,37	9930095,05	4,93
P2	15	789149,53	9930093,60	4,57
P2	16	789152,01	9930092,93	4,31
P2	17	789154,56	9930092,44	4,22
P2	18	789157,11	9930091,95	4,27
P2	19	789159,66	9930091,46	4,09
P2	20	789162,22	9930090,96	4,13
P2	21	789164,77	9930090,47	4,22
P2	22	789167,33	9930090,04	4,30
P2	23	789169,91	9930089,68	4,35
P2	24	789172,48	9930089,32	4,33
P2	25	789175,06	9930088,95	4,13
P2	26	789177,63	9930088,59	4,24
P2	27	789180,20	9930088,22	3,94
P2	28	789182,78	9930087,86	4,10
P2	29	789185,35	9930087,50	3,62
P2	30	789187,81	9930086,65	3,32
P2	31	789190,24	9930085,74	2,65
P2	32	789192,68	9930084,84	2,50
P2	33	789195,11	9930083,93	2,26
P2	34	789197,55	9930083,02	2,14
P2	35	789199,98	9930082,11	2,44
P3	1	789175,91	9930042,95	2,94
P3	2	789173,54	9930043,96	3,03
P3	3	789171,17	9930044,97	3,48
P3	4	789168,80	9930045,98	3,54
P3	5	789166,42	9930047,00	3,80
P3	6	789164,05	9930048,01	4,07
P3	7	789161,68	9930049,02	4,01
P3	8	789159,31	9930050,03	4,03
P3	9	789156,94	9930051,04	4,12
P3	10	789154,56	9930052,05	4,16
P3	11	789152,18	9930053,04	3,92

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P3	12	789149,73	9930053,84	4,09
P3	13	789147,28	9930054,64	4,16
P3	14	789144,83	9930055,44	3,95
P3	15	789142,37	9930056,23	4,19
P3	16	789139,92	9930057,03	4,48
P3	17	789137,47	9930057,83	4,56
P3	18	789135,02	9930058,63	4,42
P3	19	789132,51	9930059,10	4,68
P3	20	789129,93	9930059,21	5,22
P3	21	789127,35	9930059,32	5,90
P3	22	789124,78	9930059,43	6,59
P3	23	789122,20	9930059,55	6,47
P3	24	789119,62	9930059,66	6,07
P3	25	789117,05	9930059,77	5,67
P3	26	789114,47	9930059,89	5,61
P3	27	789111,90	9930060,00	5,42
P3	28	789109,42	9930060,58	5,30
P3	29	789107,01	9930061,50	5,58
P3	30	789104,60	9930062,42	4,96
P3	31	789102,19	9930063,34	4,75
P3	32	789099,78	9930064,26	4,71
P4	1	789089,66	9930080,31	5,04
P4	2	789090,38	9930077,73	5,39
P4	3	789091,10	9930075,14	5,24
P4	4	789091,82	9930072,55	4,75
P4	5	789092,54	9930069,97	4,12
P4	6	789093,57	9930067,53	4,00
P4	7	789095,10	9930065,32	3,89
P4	8	789096,63	9930063,11	4,06
P4	9	789098,15	9930060,91	3,95
P4	10	789099,68	9930058,70	3,73
P4	11	789101,21	9930056,49	3,20
P4	12	789102,74	9930054,29	2,73
P4	13	789104,27	9930052,08	2,87
P4	14	789105,79	9930049,87	3,21
P5	1	789108,44	9930052,85	4,69
P5	2	789110,07	9930054,80	4,94
P5	3	789111,70	9930056,75	5,17
P5	4	789113,33	9930058,70	4,99
P5	5	789114,96	9930060,65	5,13
P5	6	789116,59	9930062,60	4,99
P5	7	789118,26	9930064,51	5,05

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P5	8	789120,00	9930066,36	4,85
P5	9	789121,74	9930068,22	4,90
P5	10	789123,48	9930070,07	4,90
P5	11	789125,22	9930071,92	4,91
P5	12	789126,96	9930073,78	4,94
P5	13	789128,70	9930075,63	4,94
P5	14	789130,44	9930077,48	4,75
P5	15	789132,18	9930079,33	4,70
P5	16	789133,92	9930081,19	4,79
P5	17	789135,66	9930083,04	4,76
P5	18	789137,40	9930084,89	4,63
P5	19	789139,10	9930086,78	4,58
P5	20	789140,57	9930088,85	4,36
P5	21	789142,03	9930090,92	4,22
P5	22	789143,50	9930093,00	4,12
P5	23	789144,97	9930095,07	3,66
P5	24	789146,44	9930097,15	3,66
P5	25	789147,90	9930099,22	3,88
P5	26	789149,37	9930101,30	4,04
P5	27	789150,84	9930103,37	4,03
P5	28	789152,31	9930105,45	4,04
P5	29	789153,77	9930107,52	3,95
P5	30	789155,24	9930109,60	3,91
P5	31	789156,71	9930111,67	4,10
P5	32	789157,69	9930114,02	4,06
P5	33	789158,67	9930116,36	4,00
P5	34	789159,65	9930118,71	3,62
P5	35	789160,62	9930121,05	3,14
P5	36	789161,60	9930123,40	3,51
P5	37	789162,58	9930125,74	3,63
P5	38	789163,55	9930128,09	3,71
P5	39	789164,49	9930130,45	3,74
P5	40	789165,10	9930132,92	3,77
P5	41	789165,71	9930135,38	3,80
P5	42	789166,32	9930137,85	3,89
P6	1	789101,42	9929992,12	2,71
P6	2	789102,86	9929994,22	2,68
P6	3	789104,31	9929996,32	2,62
P6	4	789105,75	9929998,43	2,85
P6	5	789107,20	9930000,53	2,90
P6	6	789108,64	9930002,63	3,03
P6	7	789110,09	9930004,73	2,93

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P6	8	789111,53	9930006,84	3,20
P6	9	789112,98	9930008,94	3,18
P6	10	789114,43	9930011,04	3,09
P6	11	789115,87	9930013,14	3,14
P6	12	789117,32	9930015,25	3,11
P6	13	789118,76	9930017,35	3,26
P6	14	789120,17	9930019,48	3,15
P6	15	789121,56	9930021,62	2,65
P6	16	789122,95	9930023,76	2,29
P6	17	789124,34	9930025,90	2,64
P6	18	789125,72	9930028,04	2,43
P6	19	789127,11	9930030,18	2,50
P6	20	789128,50	9930032,33	2,31
P6	21	789129,89	9930034,47	2,61
P6	22	789131,29	9930036,60	3,21
P6	23	789132,87	9930038,60	3,33
P6	24	789134,58	9930040,77	3,42
P6	25	789136,03	9930042,60	3,74
P6	26	789137,62	9930044,61	3,85
P6	27	789139,20	9930046,61	3,86
P6	28	789140,78	9930048,61	3,91
P6	29	789142,37	9930050,61	4,00
P6	30	789143,95	9930052,61	3,89
P6	31	789145,53	9930054,61	3,65
P6	32	789147,12	9930056,61	3,92
P6	33	789148,70	9930058,61	3,80
P6	34	789150,31	9930060,60	3,79
P6	35	789151,99	9930062,51	3,65
P6	36	789153,67	9930064,43	3,50
P6	37	789155,36	9930066,35	3,64
P6	38	789157,04	9930068,27	3,71
P6	39	789158,72	9930070,18	3,57
P6	40	789160,41	9930072,10	3,48
P6	41	789162,09	9930074,02	3,45
P6	42	789163,50	9930076,13	3,74
P6	43	789164,75	9930078,35	3,68
P6	44	789166,01	9930080,58	3,53
P6	45	789167,26	9930082,80	3,79
P6	46	789168,51	9930085,02	3,67
P6	47	789169,76	9930087,25	3,82
P6	48	789171,01	9930089,47	3,88
P6	49	789172,26	9930091,70	3,92

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P6	50	789173,47	9930093,94	4,16
P6	51	789174,63	9930096,21	4,31
P6	52	789175,80	9930098,48	4,22
P6	53	789176,97	9930100,75	4,27
P6	54	789178,13	9930103,02	4,41
P6	55	789179,30	9930105,29	4,18
P6	56	789180,46	9930107,56	3,97
P6	57	789181,63	9930109,84	3,73
P6	58	789182,68	9930112,15	3,91
P6	59	789183,63	9930114,52	3,98
P6	60	789184,58	9930116,89	3,92
P6	61	789185,52	9930119,26	4,16
P6	62	789186,47	9930121,63	3,98
P7	1	789006,25	9929749,56	2,90
P7	2	789003,88	9929750,52	3,48
P7	3	789001,52	9929751,48	3,91
P7	4	788999,15	9929752,44	3,77
P7	5	788996,78	9929753,40	3,73
P7	6	788994,42	9929754,36	4,25
P7	7	788992,05	9929755,32	4,15
P7	8	788989,68	9929756,28	3,67
P7	9	788987,22	9929756,96	3,64
P7	10	788984,76	9929757,64	3,23
P7	11	788982,30	9929758,32	2,65
P7	12	788979,84	9929759,00	2,25
P7	13	788977,38	9929759,68	2,29
P7	14	788974,91	9929760,36	2,70
P7	15	788972,45	9929761,04	3,51
P7	16	788969,99	9929761,72	4,03
P7	17	788967,53	9929762,40	3,89
P7	18	788965,07	9929763,08	3,77
P7	19	788962,60	9929763,76	4,42
P7	20	788960,07	9929764,10	4,87
P7	21	788957,54	9929764,43	5,07
P7	22	788955,01	9929764,76	5,39
P7	23	788952,48	9929765,09	4,86
P7	24	788949,94	9929765,42	4,51
P7	25	788947,41	9929765,76	4,33
P7	26	788944,88	9929766,09	4,28
P7	27	788942,35	9929766,42	4,15
P8	1	788945,94	9929755,36	4,30
P8	2	788948,54	9929754,74	4,72

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P8	3	788951,13	9929754,12	4,76
P8	4	788953,72	9929753,49	4,67
P8	5	788956,31	9929752,87	4,48
P8	6	788958,90	9929752,25	4,69
P8	7	788961,49	9929751,62	4,36
P8	8	788964,08	9929751,00	3,92
P8	9	788966,67	9929750,38	4,07
P8	10	788969,26	9929749,75	3,92
P8	11	788971,85	9929749,13	3,76
P8	12	788974,41	9929748,39	4,19
P8	13	788976,94	9929747,56	4,63
P8	14	788979,47	9929746,73	4,94
P8	15	788982,01	9929745,90	4,60
P8	16	788984,54	9929745,07	4,48
P8	17	788987,07	9929744,24	4,46
P8	18	788989,60	9929743,41	4,39
P8	19	788992,13	9929742,58	3,76
P8	20	788994,67	9929741,74	3,20
P8	21	788997,20	9929740,91	2,54
P8	22	788999,73	9929740,08	1,68
P8	23	789002,26	9929739,25	1,62
P9	1	788991,56	9929723,50	2,11
P9	2	788989,19	9929724,66	2,94
P9	3	788986,76	9929725,69	3,54
P9	4	788984,33	9929726,72	4,03
P9	5	788981,91	9929727,75	4,22
P9	6	788979,48	9929728,78	3,95
P9	7	788977,05	9929729,81	4,16
P9	8	788974,62	9929730,84	4,51
P9	9	788972,19	9929731,86	4,49
P9	10	788969,72	9929732,80	4,33
P9	11	788967,24	9929733,69	4,18
P9	12	788964,75	9929734,57	3,69
P9	13	788962,26	9929735,45	3,72
P9	14	788959,78	9929736,33	3,32
P9	15	788957,29	9929737,22	3,23
P9	16	788954,80	9929738,10	3,83
P9	17	788952,32	9929738,98	4,52
P9	18	788949,83	9929739,86	5,35
P9	19	788947,34	9929740,75	5,52
P9	20	788944,86	9929741,63	5,68
P9	21	788942,37	9929742,51	5,80

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P9	22	788939,88	9929743,39	5,65
P9	23	788937,40	9929744,27	5,40
P10	1	788909,44	9929639,61	2,94
P10	2	788911,82	9929638,71	3,18
P10	3	788914,21	9929637,81	2,94
P10	4	788916,59	9929636,90	3,32
P10	5	788918,97	9929636,00	3,63
P10	6	788921,35	9929635,10	3,65
P10	7	788923,74	9929634,19	4,42
P10	8	788926,12	9929633,29	4,60
P10	9	788928,50	9929632,39	4,55
P10	10	788930,89	9929631,48	4,18
P10	11	788933,27	9929630,58	4,25
P10	12	788935,65	9929629,68	4,25
P10	13	788938,04	9929628,77	4,27
P10	14	788940,41	9929627,86	4,25
P10	15	788942,70	9929626,73	4,42
P10	16	788944,99	9929625,61	4,81
P10	17	788947,27	9929624,48	4,72
P10	18	788949,56	9929623,35	4,63
P10	19	788951,85	9929622,23	4,69
P10	20	788954,13	9929621,10	4,43
P10	21	788956,42	9929619,98	4,81
P10	22	788958,71	9929618,85	5,37
P10	23	788960,99	9929617,73	4,78
P10	24	788963,28	9929616,60	4,66
P10	25	788965,57	9929615,47	4,42
P10	26	788967,85	9929614,35	4,28
P10	27	788970,14	9929613,22	4,34
P10	28	788972,43	9929612,10	4,42
P10	29	788974,71	9929610,97	4,43
P10	30	788977,00	9929609,84	4,58
P11	1	788974,12	9929596,41	3,33
P11	2	788971,58	9929596,86	3,51
P11	3	788969,05	9929597,31	4,13
P11	4	788966,52	9929597,76	4,40
P11	5	788963,99	9929598,21	3,95
P11	6	788961,46	9929598,66	3,74
P11	7	788958,93	9929599,12	3,59
P11	8	788956,40	9929599,59	3,11
P11	9	788954,05	9929600,64	3,14
P11	10	788951,71	9929601,69	3,48

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P11	11	788949,36	9929602,74	3,44
P11	12	788947,01	9929603,79	3,95
P11	13	788944,66	9929604,84	3,86
P11	14	788942,32	9929605,89	3,91
P11	15	788939,97	9929606,94	4,42
P11	16	788937,62	9929607,99	4,51
P11	17	788935,27	9929609,03	4,30
P11	18	788932,92	9929610,08	3,77
P11	19	788930,58	9929611,13	3,00
P11	20	788928,16	9929612,01	2,72
P11	21	788925,70	9929612,72	2,67
P11	22	788923,23	9929613,44	2,87
P11	23	788920,76	9929614,16	3,09
P11	24	788918,29	9929614,88	3,11
P11	25	788915,82	9929615,60	3,41
P11	26	788913,35	9929616,32	3,15
P11	27	788910,88	9929617,03	3,57
P11	28	788908,41	9929617,75	3,39
P11	29	788905,94	9929618,47	3,18
P11	30	788903,47	9929619,19	3,11
P11	31	788901,00	9929619,91	3,44
P11	32	788898,53	9929620,63	3,82
P11	33	788896,07	9929621,35	3,60
P11	34	788893,60	9929622,06	3,54
P12	1	788889,84	9929607,18	4,57
P12	2	788892,35	9929606,69	4,69
P12	3	788894,85	9929606,21	4,45
P12	4	788897,35	9929605,72	4,44
P12	5	788899,85	9929605,23	4,38
P12	6	788902,36	9929604,75	4,53
P12	7	788904,86	9929604,26	4,45
P12	8	788907,36	9929603,77	4,69
P12	9	788909,86	9929603,28	4,80
P12	10	788912,36	9929602,79	4,10
P12	11	788914,86	9929602,30	3,86
P12	12	788917,36	9929601,81	3,76
P12	13	788919,86	9929599,32	3,97
P12	14	788921,36	9929598,83	4,69
P12	15	788923,86	9929597,34	4,95
P12	16	788926,36	9929596,85	4,51
P12	17	788928,86	9929595,36	4,60
P12	18	788931,36	9929594,87	4,65

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P12	19	788933,51	9929593,71	4,21
P12	20	788935,85	9929592,70	4,39
P12	21	788938,20	9929591,70	4,07
P12	22	788940,54	9929590,69	4,15
P12	23	788942,88	9929589,68	3,80
P12	24	788945,22	9929588,67	3,79
P12	25	788947,56	9929587,67	3,89
P12	26	788949,90	9929586,66	3,89
P12	27	788952,24	9929585,65	4,60
P12	28	788954,59	9929584,64	4,47
P12	29	788956,93	9929583,63	4,38
P12	30	788959,27	9929582,63	3,94
P12	31	788961,61	9929581,62	3,36
P12	32	788963,95	9929580,61	2,99
P13	1	788929,49	9929611,62	4,00
P13	2	788930,69	9929613,84	4,12
P13	3	788931,90	9929616,06	4,13
P13	4	788933,10	9929618,28	4,03
P13	5	788934,30	9929620,49	3,94
P13	6	788935,51	9929622,71	3,95
P13	7	788936,71	9929624,93	3,94
P13	8	788937,91	9929627,15	3,92
P13	9	788939,12	9929629,37	4,06
P13	10	788940,32	9929631,58	4,04
P13	11	788941,53	9929633,80	3,95
P13	12	788942,73	9929636,02	3,91
P13	13	788943,93	9929638,24	4,00
P13	14	788944,76	9929640,59	4,06
P13	15	788945,30	9929643,06	4,03
P13	16	788945,83	9929645,53	3,94
P13	17	788946,37	9929647,99	3,88
P13	18	788946,90	9929650,46	3,88
P13	19	788947,44	9929652,93	3,83
P13	20	788947,97	9929655,39	3,69
P13	21	788948,50	9929657,86	3,66
P13	22	788949,04	9929660,33	3,48
P13	23	788949,57	9929662,79	3,45
P13	24	788950,11	9929665,26	3,30
P13	25	788950,64	9929667,73	3,47
P13	26	788951,17	9929670,19	3,50
P13	27	788951,71	9929672,66	3,44
P13	28	788952,24	9929675,13	3,38

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P13	29	788952,72	9929677,60	3,38
P13	30	788953,14	9929680,09	3,50
P13	31	788953,56	9929682,58	3,36
P13	32	788953,98	9929685,07	3,45
P13	33	788954,39	9929687,56	3,48
P13	34	788954,81	9929690,05	3,50
P13	35	788955,23	9929692,54	3,39
P13	36	788955,65	9929695,03	3,54
P13	37	788956,06	9929697,51	3,59
P13	38	788956,48	9929700,00	3,62
P13	39	788956,90	9929702,49	3,65
P13	40	788957,32	9929704,98	3,69
P13	41	788957,73	9929707,47	3,50
P13	42	788958,15	9929709,96	3,56
P13	43	788958,57	9929712,45	3,89
P13	44	788958,98	9929714,94	4,07
P13	45	788959,40	9929717,43	4,18
P13	46	788959,82	9929719,91	4,19
P13	47	788960,24	9929722,40	4,01
P13	48	788960,71	9929724,88	4,07
P13	49	788961,71	9929727,19	4,09
P13	50	788962,71	9929729,51	4,13
P13	51	788963,71	9929731,83	4,15
P13	52	788964,71	9929734,14	4,13
P13	53	788965,71	9929736,46	4,09
P13	54	788966,71	9929738,78	4,19
P13	55	788967,71	9929741,09	4,37
P13	56	788968,72	9929743,41	4,54
P13	57	788969,72	9929745,73	4,45
P13	58	788970,72	9929748,04	4,45
P13	59	788971,72	9929750,36	4,24
P13	60	788972,72	9929752,68	4,12
P13	61	788973,72	9929754,99	4,61
P13	62	788974,72	9929757,31	4,64
P13	63	788975,72	9929759,63	4,57
P13	64	788976,72	9929761,94	4,57
P13	65	788977,75	9929764,25	4,48
P13	66	788978,85	9929766,52	4,49
P13	67	788979,96	9929768,79	4,42
P13	68	788981,06	9929771,06	4,25
P13	69	788982,17	9929773,33	4,28
P13	70	788983,27	9929775,60	4,43

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P13	71	788984,38	9929777,86	4,33
P13	72	788985,48	9929780,13	4,30
P13	73	788986,59	9929782,40	4,31
P13	74	788987,69	9929784,67	4,37
P13	75	788988,79	9929786,94	4,30
P13	76	788989,90	9929789,21	4,39
P13	77	788991,00	9929791,48	4,21
P13	78	788992,11	9929793,75	4,21
P13	79	788993,21	9929796,02	4,34
P13	80	788994,32	9929798,29	4,10
P0	1	789132,48	9930141,85	0,00
P0	2	789124,34	9930132,11	0,00
P0	3	789117,35	9930121,95	0,00
P0	4	789110,47	9930111,58	0,00
P0	5	789105,07	9930100,58	0,00
P0	6	789096,71	9930091,47	0,00
P0	7	789089,30	9930081,74	0,00
P0	8	789082,64	9930072,42	0,00
P0	9	789076,39	9930061,95	0,00
P0	10	789071,63	9930050,20	0,00
P0	11	789065,92	9930039,51	0,00
P0	12	789058,30	9930030,09	0,00
P0	13	789049,83	9930020,04	0,00
P0	14	789047,50	9930009,66	0,00
P0	15	789042,10	9929997,71	0,00
P0	16	789033,64	9929989,24	0,00
P0	17	789027,39	9929977,91	0,00
P0	18	789023,90	9929964,90	0,00
P0	19	789019,45	9929954,53	0,00
P0	20	789012,87	9929944,18	0,00
P0	21	789010,64	9929932,64	0,00
P0	22	789007,89	9929919,73	0,00
P0	23	788996,44	9929909,86	0,00
P0	24	788991,67	9929899,17	0,00
P0	25	788987,55	9929888,06	0,00
P0	26	788981,83	9929877,48	0,00
P0	27	788976,43	9929865,31	0,00
P0	28	788972,73	9929852,71	0,00
P0	29	788967,01	9929842,24	0,00
P0	30	788961,72	9929829,85	0,00
P0	31	788956,96	9929819,06	0,00
P0	32	788950,50	9929808,26	0,00

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P0	33	788944,58	9929797,26	0,00
P0	34	788940,87	9929785,72	0,00
P0	35	788938,12	9929775,03	0,00
P0	36	788934,52	9929763,60	0,00
P0	37	788933,57	9929750,69	0,00
P0	38	788928,49	9929739,37	0,00
P0	39	788930,92	9929728,47	0,00
P0	40	788926,06	9929716,40	0,00
P0	41	788919,49	9929705,29	0,00
P0	42	788916,32	9929691,53	0,00
P0	43	788911,35	9929681,16	0,00
P0	44	788909,33	9929668,03	0,00
P0	45	788904,04	9929655,44	0,00
P0	46	788901,93	9929642,11	0,00
P0	47	788897,06	9929630,99	0,00
P0	48	788889,01	9929620,94	0,00
P0	49	788884,04	9929608,34	0,00
P0	50	788966,91	9929579,24	0,00
P0	51	788972,83	9929590,78	0,00
P0	52	788978,44	9929601,36	0,00
P0	53	788983,42	9929612,79	0,00
P0	54	788987,97	9929625,38	0,00
P0	55	788990,19	9929637,13	0,00
P0	56	788992,20	9929649,41	0,00
P0	57	788993,90	9929661,90	0,00
P0	58	788994,74	9929675,44	0,00
P0	59	788995,80	9929687,72	0,00
P0	60	788998,13	9929700,84	0,00
P0	61	789003,21	9929713,12	0,00
P0	62	789007,87	9929724,76	0,00
P0	63	789014,43	9929736,30	0,00
P0	64	789017,92	9929748,04	0,00
P0	65	789024,27	9929760,32	0,00
P0	66	789028,71	9929771,65	0,00
P0	67	789032,10	9929784,24	0,00
P0	68	789036,86	9929796,30	0,00
P0	69	789039,51	9929808,05	0,00
P0	70	789043,11	9929818,74	0,00
P0	71	789047,87	9929829,54	0,00
P0	72	789052,21	9929842,24	0,00
P0	73	789054,54	9929855,25	0,00
P0	74	789058,67	9929867,00	0,00

Numero_linea	Numero_punto	x	y	espesor
P0	75	789063,32	9929880,02	0,00
P0	76	789070,94	9929890,81	0,00
P0	77	789076,98	9929902,77	0,00
P0	78	789082,90	9929914,10	0,00
P0	79	789088,93	9929924,89	0,00
P0	80	789094,65	9929936,00	0,00
P0	81	789101,74	9929947,86	0,00
P0	82	789109,25	9929958,76	0,00
P0	83	789117,09	9929969,02	0,00
P0	84	789126,93	9929977,17	0,00
P0	85	789137,30	9929985,96	0,00
P0	86	789145,34	9929995,80	0,00
P0	87	789153,70	9930006,28	0,00
P0	88	789163,65	9930017,18	0,00
P0	89	789172,86	9930027,13	0,00
P0	90	789182,17	9930037,39	0,00
P0	91	789191,80	9930045,65	0,00
P0	92	789193,18	9930060,36	0,00
P0	93	789197,63	9930074,12	0,00
P0	94	789205,03	9930086,08	0,00
P0	95	789214,35	9930095,39	0,00

Anexo VII *Tabla de áreas de los lahares cartografiados en la misma fecha para gráfica de dispersión.*

Fecha	Área Jatabamba (m2)	Área Pucarumi (m2)
2018-07-12	2039,19	0,00
2018-07-26	7741,49	0,00
2018-10-30	10258,12	621,76
2018-11-16	12799,54	907,78
2018-11-29	4835,41	0,00
2018-12-13	762,03	0,00
2019-02-06	27847,05	2477,68
2019-04-18	20716,00	0,00

Anexo VIII *Cartografía de lahares secundarios mediante ortofotografías tomadas con drone para las Quebradas Jatabamba y Pucarumi.*