

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

MODELO DE FLUJOS SECUNDARIOS DE LODO EN LAS QUEBRADAS SECA Y LAS FLORES, VOLCÁN IMBABURA- CIUDAD DE IBARRA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA GEÓLOGA**

OPCIÓN: ESTUDIO TÉCNICO

CARLA ESTHEFANÍA CASTILLO ROSERO

carla.castillo@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. ELIANA FERNANDA JIMÉNEZ ÁLVARO, MSc

eliana.jimenez@epn.edu.ec

Quito, Junio 2016

DECLARACIÓN

Yo, Carla Esthefanía Castillo Rosero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Carla Esthefanía Castillo Rosero

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado Carla Esthefanía Castillo Rosero bajo mi supervisión.

Ing. Eliana Jiménez MSc
DIRECTORA DEL TRABAJO

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a la Ing. Eliana Jiménez por su paciencia y apoyo en la realización de este trabajo. Así mismo al Ing. Oswaldo Proaño, quien, con mucha paciencia, me compartió un poco de sus conocimientos en área de hidrología. Al Dr. Daniel Andrade por aceptar ser parte del proyecto, ponerse al día en poco tiempo, y brindarme su valioso aporte y las correcciones necesarias para que el proyecto salga adelante. A la Ing. Carolina Bernal por su apoyo y colaboración.

Al Municipio de la Ciudad de Ibarra, principalmente al alcalde, Ing. Álvaro Castillo y a Graciela Galeano, por su acogida en la ciudad y principalmente por la implementación de convenios de colaboración con la Escuela Politécnica Nacional. A las personas de la comunidad La Esperanza, quienes nos recibieron y guiaron, facilitando el trabajo.

A mis profesores de la facultad, a quienes debo mis conocimientos y gusto por esta carrera. A la Ing. Halina Lachowicz quien representa para mí, un ser humano de mucha fortaleza y grandes valores. A los ingenieros Jorge Sevilla, Renán Cornejo y Pablo Duque, quienes nos deleitaban con sus anécdotas y nos llenaban de ilusión.

Al Ing. Tomás Espinoza, profesor y querido amigo, quien me acompañó con su sabiduría, sus anécdotas, sus consejos, su apoyo y su aprecio, que es mutuo. No me alcanzan las palabras para agradecerle su aporte en mi vida.

A los profesores de la Universidad Central, y los estudiantes, compañeros y futuros colegas, que me acompañaron y ayudaron durante el trabajo de campo.

A mis compañeros y amigos con quienes comencé este reto y con quienes, tantas veces, compartí victorias y derrotas a lo largo de la carrera, cada uno tiene un pedazo de mi corazón y mucho agradecimiento por haber sido parte de este viaje. A Sofi por su preocupación y cariño y Guido por su ayuda invaluable para este proyecto y por las incontables veces que me rescato de malos momentos, gracias por la paciencia.

A mis amig@s quienes, fuera de la carrera, han hecho mis días felices. A Moni y Diana. A mis compañeros de trabajo, principalmente a Johanna León, quien supo tener paciencia enseñándome lo necesario para no echarlo a perder y quien además me tuvo paciencia durante este proceso, y a Jonathan Jaramillo, por tu ayuda, que fue muy grande, tu paciencia, tus consejos, tus regañones, tus palabras de aliento, por consentirme tanto y por todas las veces que tu presencia me levanta el ánimo, mi agradecimiento es sincero e infinito, al igual que mi cariño.

Finalmente, pero más importante, a mi familia, mi madre, mi padre y mis hermanos, sepan que todo lo que hago ahora es por y para ustedes, para devolver un poco de lo que me han dado y retribuir todo su esfuerzo.

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hermanos

Y a mis hijos peludos

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	1
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes.....	12
1.2. Problema.....	12
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. Justificación Teórica	14
1.3.2. Justificación Metodológica	15
1.3.3. Justificación Práctica	16
1.4. Hipótesis.....	16
1.5. Objetivos	16
1.5.1. Objetivo General.....	16
1.5.2. Objetivos Específicos	16
2. CAPITULO II: REFERENCIAL TEORICO	18
2.1. Descripción de la zona de estudio	18
2.1.1. Localización.....	18
2.1.2. Acceso.....	19
2.1.3. Clima	19
2.1.4. Hidrografía y Morfología	21
2.1.5. Fauna y vegetación	23
2.1.6. Población y Datos socioeconómicos.....	23
2.1.7. Explotación de minas y canteras	24

2.1.8.	Uso de suelo y cobertura vegetal.....	25
2.1.9.	Tipo de suelo	26
2.1.10.	Amenazas naturales en el Cantón Ibarra	27
2.1.11.	Eventos naturales recientes: Inundación 2011	29
2.1.12.	Estudios previos.....	30
2.2.	Marco Geológico	36
2.2.1.	Geología regional	36
2.2.2.	Geología Local	38
2.3.	Marco Conceptual.....	41
2.3.1.	Amenazas y peligros	41
2.3.2.	Fenómenos de remoción en masa (FRM).....	42
2.3.3.	Flujos de escombros (lahares).....	44
2.3.4.	Tormenta	46
2.3.5.	Cuenca Hidrológica	46
2.3.6.	Precipitación	46
2.3.7.	Tiempo de concentración.....	47
2.3.8.	Hietograma.....	47
2.3.9.	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).....	47
2.3.10.	Distribución temporal de tormentas-Curvas de Huff	48
2.3.11.	Número de curva.....	50
2.3.12.	Hidrograma	52
2.3.13.	Programa HEC-HMS.....	53
2.3.14.	Lahar-Z	55
3.	CAPITULO III: ASPECTOS METODOLÓGICOS	56
3.1.	Descripción litológica y estratigráfica	57
3.2.	Caracterización de depósitos.....	57
3.2.1.	Uso de DRON y Programa Pix4D	58
3.3.	Caracterización de las cuencas hidrográficas	61
3.3.1.	Cálculo de caudal base	61

3.3.2.	Delimitación de las cuencas hidrográficas	61
3.3.3.	Cálculo de la longitud y pendiente del cauce principal	63
3.3.4.	Cálculo del área de la cuenca hidrográfica	64
3.4.	Cálculo del volumen de agua.....	64
3.4.1.	Tiempo de concentración y tiempo de retardo	64
3.4.2.	Cálculo de intensidades.....	67
3.4.3.	Hietogramas: Curvas de Huff.....	68
3.4.4.	Cálculo del número de curva (CN).....	68
3.4.5.	Construcción de hidrogramas y cálculo del volumen de agua con HEC-HMS	74
3.5.	Generación del modelo de flujos de lodo secundarios	75
3.6.	Calibración del modelo de flujos secundarios de lodo.....	77
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	79
4.1.	Descripción litológica y estratigráfica	79
4.2.	Volumen de los depósitos.....	84
4.2.1.	Volumen de material en la quebrada Seca	84
4.2.2.	Volumen de material en la quebrada Las Flores.....	86
4.3.	Características de las cuencas hidrográficas.....	90
4.4.	Volumen de agua	92
4.4.1.	Tiempo de concentración y tiempo de retardo	92
4.4.2.	Intensidades	93
4.4.3.	Precipitación	95
4.4.4.	Valor del número de curva.....	97
4.4.5.	Cálculo del volumen de agua con HEC-HMS.....	101
4.5.	Modelo de flujo de lodos secundario.....	103
4.6.	Modelo de flujos de lodo: Inundación 2011	105
5.	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	107
5.1.	Descripción Litológica.....	109
5.2.	Volumen de los depósitos.....	110

5.3. Volumen de agua	111
5.4. Modelos de flujos de lodo secundarios generados	113
5.5. Comparación de los modelos de flujo de lodo secundarios generados con el evento ocurrido en abril del año 2011	114
6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6.1. Conclusiones	117
6.2. Recomendaciones	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXOS.....	128
Anexo 1. Mapa de ubicación de los principales sectores afectados por durante el evento de inundación del año 2011.....	129
Anexo 2. Mapa de ubicación de las columnas estratigráficas	130
Anexo 3. Columnas estratigráficas de la quebrada Las Flores	131
Anexo 4. Columnas estratigráficas de la quebrada Seca.....	136
Anexo 5. Ortofotos generadas con el programa Pix4D	142
Anexo 6. Hietogramas de distribución de tormentas: método de Huff-mediana-segundo cuartil para cuencas puntuales.	143
Anexo 7. Mapa de clasificación de suelo según su pendiente. Clasificación desde 1 hasta 6. Modificado de GAD San Antonio de Ibarra, 2015.....	145
Anexo 8. Mapa de clasificación de suelo según su drenaje. Clasificación desde 1 hasta 4. Modificado de GAD San Antonio de Ibarra, 2015.....	146

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Explotación de material pétreo cerca de la Comunidad San Cristóbal. (La Hora, febrero 2011).	13
Figura 1. 2 Trabajadores municipales limpiando los escombros que dejó la inundación por el desbordamiento del río-colector Ajaví. (El Comercio, febrero 2011).....	14
Figura 2. 1 Mapa de localización de las quebradas Seca y Las Flores. Ibarra-Imbabura	18
Figura 2. 2 Mapa de isoyetas del cantón Ibarra, modificado del (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).	20

Figura 2. 3 Cuenca hidrográfica de río Mira y subcuencas de los ríos Blanco, Ambi y Tahuando. Modificado del Estudio Hidrológico del río Mira (INAMHI, 2015).	21
Figura 2. 4 Cantera Terraza Quebrada Blanca 2, muestra una excavación de más de 10 m de profundidad (círculo rojo). Imagen tomada con Dron y procesada con Pix4D.	22
Figura 2. 5 Mapa de ubicación de las canteras de explotación de material pétreo en las quebradas Seca y Las Flores. Modificado del catastro minero ARCOM, 2017) ...	24
Figura 2. 6 Mapa de uso y zonificación del suelo. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).	25
Figura 2. 7 Mapa de peligro de deslizamientos. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).	28
Figura 2. 8 Mapa de peligro de inundaciones. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).	28
Figura 2. 9 Aluvión en la Qda. Tanguarín. a) Estado del lugar después del evento. b) Búsqueda de una niña desaparecida en San Antonio. (El Universo, abril 2011)..	29
Figura 2. 10 Izq.: Construcción de canales. Der.: Construcción de microdiques (Fotos tomada por la Gobernación de Imbabura, 2013).	34
Figura 2. 11 Canales para escorrentías aún no están terminados (La Hora, 2017).	34
Figura 2. 12 Curvas IDF para la estación Ibarra-Aeropuerto, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. (INAMHI, 2015)	36
Figura 2. 13 Entorno geológico y geodinámico del Ecuador (Vallejo, 2007).	37
Figura 2. 14 División del Valle Interandino en tres segmentos separados por nudos volcánicos (Villagómez, 2003).	38
Figura 2. 15 Mapa de unidades litológicas del Complejo Volcán Imbabura. (Andrade, 2009)	39
Figura 2. 16 Hietograma de la Qda. Seca.	47
Figura 2. 17 Curvas IDF de la Qda. Seca, para un evento de período de retorno igual a 5 años y una duración de 50 min.	48
Figura 2. 18 Modelos estadísticos para tiempos de distribución para cada tipo de tormenta según el cuartil, en áreas de 129,5 a 1036 km ² (Huff, 1990).	49
Figura 2. 19 Partes de un hidrograma.	53
Figura 3. 1 Esquema metodológico del estudio.	56
Figura 3. 2 Afloramientos en la zona de estudio. Izq. Quebrada Seca. Der. Quebrada Las Flores.	57

Figura 3. 3 Mediciones en campo de los depósitos de material suelto. Izq. Quebrada Seca Der. Quebrada de Las Flores. Los depósitos tienen forma similar a un cono.	58
Figura 3. 4 Sobrevuelos realizados con dron en la Qda. Las Flores. Izq. Equipo sobre el suelo. Der. Vuelo del Dron en alturas mayores a 30 m sobre el suelo.....	59
Figura 3. 5 Ejemplo de cálculo de volumen de un depósito de material suelto en el cauce la quebrada Las Flores, con Pix4D Mapper.....	60
Figura 3. 6 Cálculo del área de la cuenca. Izq. Opciones de la Tabla de Atributos de la capa vectorial de la cuenca. Der. Herramienta <i>Calculate Geometry</i>	64
Figura 3. 7 Generación de CN con HEC-GeoHMS. a) Opción <i>Generate CN Grid</i> y ventana para ingresar datos. b) Ráster generado y columna con valores CN.	73
Figura 3. 8 Detalle de los resultados obtenidos después de realizar las simulaciones con la opción <i>Simulation Run</i>	75
Figura 3. 9 Ejemplo de medición de H inicial, H final y Longitud con Google Earth Pro.	76
Figura 4. 1 Columna estratigráfica del punto 2S3D7.....	81
Figura 4. 2 Columna estratigráfica del punto 2SD4.....	82
Figura 4. 3 Columna estratigráfica del punto SD15.....	82
Figura 4. 4 Columna estratigráfica del punto FI11.....	83
Figura 4. 5 Columna del punto FD13.....	83
Figura 4. 6 Columna estratigráfica en el punto FD6.	84
Figura 4. 7 Depósito al pie del talud en la Qda. Las Flores, compuesta por arena (90%) y bloques (10%)......	87
Figura 4. 8 Localización de las ortofotos tomadas con DRON en tres tramos de la quebrada Las Flores.....	89
Figura 4. 9 Delimitación y ubicación de las cuencas y la red de drenaje de las quebradas Seca y Las Flores.	91
Figura 4. 10 Curvas IDF de la subcuenca alta en la quebrada Las Flores.	94
Figura 4. 11 Curvas IDF de la subcuenca baja de la quebrada Las Flores.	94
Figura 4. 12 Curvas IDF de la quebrada Seca.	95
Figura 4. 13 Clasificación de grupo hidrológico del suelo en el área de estudio en función del drenaje, la pendiente y la textura.	98
Figura 4. 14 Mapa de distribución del número de curva en el área de estudio.	100
Figura 4. 15 Mapa de distribución de flujos de lodos secundarios generados por lluvias intensas asociados a cinco períodos de retorno.	104

Figura 4. 16 Mapa de flujos de lodo generados por las precipitaciones del mes de abril del año 2011, y zonas afectadas.	106
Figura 5. 1 Desgaste de taludes en áreas de canteras. Der. Cantera inactiva – Qda. Seca. Izq. Cantera activa Terraza Quebrada Blanca 2 – Qda. Las Flores.....	108
Figura 5. 2 En a) se muestra un botadero de ladrillos y escombros; b) estructura llamada “peinilla” que ha colapsado por falta de mantenimiento; c) un microdique y una tubería que cruza la quebrada Seca.....	109
Figura 5. 3 Comparación de las áreas afectadas durante la inundación ocurrida en el año 2011, con los modelos de flujos de lodo secundarios generados teóricamente.	115
Figura 5. 4 Comparación de los modelos de flujos de lodo generados a partir de datos teóricos, con el modelo de flujo de lodo ocurrido en abril del año 2011.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Caudales pico, hidrológicos y de escombros, medidos en la confluencia de las quebradas Seca y Las Flores. Tomado del Proyecto de Control de Inundaciones de Ibarra - Subproyecto No.1 (2012).....	33
Tabla 2. 2 Ecuaciones para el cálculo de intensidades (INAMHI, 2015).	36
Tabla 2. 3 Clasificación de la Condición de Humedad Antecedente (Chow, 1964).	51
Tabla 2. 4 Características resumidas de los grupos hidrológicos de suelo (SSDS - USDA, 2017).	51
Tabla 3. 1 Descripción de las herramientas usadas para corregir y procesar el DEM.	62
Tabla 3. 2 Ubicación de los puntos de cierre en cada quebrada (Coordenadas UTM).....	63
Tabla 3. 3 Ecuaciones para el cálculo de intensidades (INAMHI, 2015). Ecuación 15 (a, b y c).....	67
Tabla 3. 4 Distribución de Tormentas Fuertes respecto a la mediana en áreas puntuales. Porcentaje acumulado de precipitación para un tipo de tormenta dado.	68
Tabla 3. 5 Ponderación de suelos en base a al drenaje y la pendiente.....	69

Tabla 3. 6 Clasificación del suelo a partir de valores ponderados (pendiente más drenaje).	70
Tabla 3. 7 Clasificación de suelos y códigos establecidos para el cálculo de número de curva.....	71
Tabla 3. 8 Descripción de las herramientas usadas para calcular el volumen de agua.	74
Tabla 4. 1 Coordenadas UTM de la ubicación de las columnas estratigráficas.	79
Tabla 4. 2 Ubicación y características de los depósitos en la Qda. Seca.....	85
Tabla 4. 3 Ubicación y características de los depósitos de la Qda. Las Flores.....	86
Tabla 4. 4 Características de las ortofotos tomadas con DRON.	88
Tabla 4. 5 Volumen de material suelto determinado en cada quebrada.....	88
Tabla 4. 6 Características básicas de las quebradas obtenidas a partir del procesamiento de un modelo digital de terreno.....	90
Tabla 4. 7 Resultados de tiempo de concentración para cada quebrada.	92
Tabla 4. 8 Intensidades (ltr) para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la subcuenca alta de la quebrada Las Flores.....	93
Tabla 4. 9 Intensidades (ltr) para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la subcuenca baja de la quebrada Las Flores.....	94
Tabla 4. 10 Intensidades para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la quebrada. Seca.	95
Tabla 4. 11 Valores de precipitación discretizados para cada intervalo de duración. quebrada Las Flores, subcuenca baja.	96
Tabla 4. 12 Valores de precipitación discretizados para cada intervalo de duración, para diferentes períodos de retorno en la quebrada Las Flores - subcuenca alta.	96
Tabla 4. 13 Valores de precipitación discretizada para cada intervalo de duración, en diferentes períodos de retorno, en la quebrada Seca.....	97
Tabla 4. 14 Valor de número de curva para los 17 grupos establecidos previamente (código) en función de los cuatro grupos hidrológicos de suelo.	99
Tabla 4. 15 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Seca con el programa HEC-RAS.	101
Tabla 4. 16 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores, subcuenca alta, con el programa HEC-RAS.	102

Tabla 4. 17 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores, subcuenca baja, con el programa HEC-RAS.	102
Tabla 4. 18 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores con el programa HEC-RAS, usando la herramienta <i>Reach</i> , para unificar los datos de las subcuencas.....	103
Tabla 4. 19 Volumen calculado de sólidos añadido al volumen de agua, en los diferentes períodos de retorno.	103
Tabla 4. 20 Volúmenes de agua del evento de inundación de 2011, calculados en función de la precipitación registrada el 4 de abril en la estación Otavalo.....	106

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en las quebradas Seca y Las Flores, que se extienden desde el flanco noreste del Complejo Volcánico Imbabura hasta el sur de la Ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura. El objetivo principal de este proyecto fue generar un modelo de flujos de lodo secundarios causados por lluvias intensas, para delimitar su alcance y área de influencia. Para esto se calculó la parte sólida y la parte líquida que podrían ser integradas al flujo.

El cálculo de la parte sólida se llevó a cabo mediante trabajo de campo y el uso ortofotos tomadas con DRON y procesadas con el programa Pix4D, con el cual fue posible medir de forma más precisa los depósitos localizados en los cauces de las quebradas. Parte de la metodología del trabajo de campo fue identificar las unidades litológicas y generar columnas estratigráficas de la zona.

Para calcular el volumen de agua se usó el programa HEC-HMS, que permite modelar el comportamiento de las cuencas hidrográficas de las quebradas a partir de modelos escogidos por el usuario. Los datos de entrada del programa son: 1) El tiempo de retardo (en función del tiempo de concentración) el cual se calcula a partir de las características físicas de la cuenca como el área, la longitud de cauce y la pendiente del cauce. 2) El número de curva, que representa la capacidad de infiltración o de escorrentía que tiene el suelo en un área, se calcula con el programa ArcGis y el módulo HEC-GeoRas, combinando datos de uso de suelo, cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y condición de humedad antecedente. 3) La precipitación fue calculada a partir de la intensidad con las ecuaciones del Estudio de Intensidades realizado por INAMHI (2015) y haciendo uso del método de distribución de lluvias de Huff, para cuencas puntuales, con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Posteriormente se utilizó el programa Lahar Z para realizar el modelamiento de los flujos de lodo. El programa entrega un archivo ráster del alcance de cada flujo de lodo, teniendo como inicio el punto de intersección del cono de energía del volcán con la red de drenaje. Los modelos generados fueron comparados con el evento de inundación ocurrido en abril de 2011, para establecer el período de retorno más probable de un evento de lluvia similar al de ese año.

Se concluyó que Lahar Z no fue el programa adecuado para el modelamiento de flujos de lodo bajo ciertos parámetros utilizados en este estudio, y se recomienda el uso de un programa que permita modificar el flujo de lodo durante su recorrido.

ABSTRACT

The present study was developed in the Seca and Las Flores streams, which extend from the northeast flank of the Imbabura Volcanic Complex to the south of the city of Ibarra, Imbabura province. The main objective of this project was to generate a model of secondary mud flows caused by intense rains, to delimit its scope and area of influence. For this, the solid and the liquid volumes that could be integrated into the flow were calculated.

The estimation of the solid part was carried out through field work and the use of orthophotos taken with DRON and processed with the software Pix4D, with which it was possible to perform detailed measurements of the deposits located in the channels of the streams. Part of the methodology of the fieldwork was to identify the lithological units and generate stratigraphic columns for the area.

The water volume calculation was performed with the HEC-HMS program, which models the behavior of the watersheds of the streams from parameters chosen by the user. The input data of the program are: 1) The lag time, a function of the time of concentration, which is calculated based on the physical characteristics of the basin such as the area, the length of the channel and the slope of the channel. 2) The curve number, which represents the infiltration or runoff capacity of the soil in an area, was calculated with the ArcGis software and the HEC-GeoRas module, by combining data of land use, vegetation cover, soil hydrological type and antecedent moisture condition. 3) The precipitation was calculated from the rainfall intensity using equations of the Intensity Study conducted by INAMHI (2015), with return periods of 5, 10, 25, 50 and 100 years, and using the Huff rainfall distribution method, for point rainfalls.

Subsequently, the Lahar Z program was used to carry out the modeling of the mud flows. The program delivers a raster layer with the runout of each mud flow generated, with the beginning of the flow at the intersection of the volcano's energy cone with its drainage network. These models were compared with the flood event that occurred in April 2011, to establish the most likely return period of a rain event like that of that year.

It was concluded that Lahar Z was not the appropriate program for the modeling of mud flows under certain parameters used in this study, and it is recommended to use a program that allows to modify the mud flow during its course.

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Complejo Volcánico Imbabura (CVI) está localizado en el borde oriental del Valle Interandino y se construyó sobre materiales de origen volcánico de edad Mio-Pliocénica. Se trata de un estrato-volcán compuesto, formado por un edificio principal cónico cuya cumbre está a 4621 m.s.n.m. y ha sido definido como volcán potencialmente activo e identificado como un volcán de bajo riesgo ya que su última erupción fue hace aproximadamente 2000 años. El material volcánico, producto de las erupciones, ha quedado depositado sobre el edificio del volcán, el cual, al ser poco consolidado ha sido removido por el desprendimiento de antiguos glaciares, ocurrencia de lluvias intensas y deslizamientos provocados por terremotos. Los principales peligros volcánicos asociados al volcán corresponden a flujos piroclásticos, flujos de lava, flujos de lodo o lahares, caídas de ceniza y avalanchas de escombros (Ruiz, 2003).

El cantón Ibarra, localizado al norte del CVI, es afectado por fenómenos como inundaciones, deslizamientos, sismos y amenazas volcánicas. Las lluvias fuertes arrastran material a través de las quebradas que atraviesan los flancos del volcán provocando flujos de lodo, aluviones, deslizamientos, avalanchas, entre otros movimientos en masa. Todos estos eventos generan impactos en la población, principalmente a las comunidades que se asientan en las faldas del volcán o cerca de las desembocaduras de las quebradas, ya que afectan vías de transporte y de comunicación, alcantarillado, infraestructura como el caso del antiguo Aeropuerto Atahualpa, viviendas y terrenos de cultivos. Esto modifica la calidad de vida de los pobladores.

Con el objetivo de aportar a la gestión del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Ciudad de Ibarra, se realizó una modelación de los flujos de lodo secundarios que bajan por las quebradas Seca y las Flores localizadas en el flanco nororiental del volcán Imbabura, provocados por lluvias intensas. El fin de este estudio es contribuir con la toma de decisiones respecto al uso de suelos y al ordenamiento territorial.

1.2. Problema

Las quebradas Seca y Las Flores nacen en las estribaciones orientales del volcán Imbabura. El agua que baja por las dos quebradas se une en un tramo del colector Ajaví localizado al este del parque Ciudad Blanca, en la intersección de las avenidas

Mariano Acosta y Heleoro Hayala, desde el cual son movilizadas hasta el río Tahuando. Las quebradas atraviesan más de 12 comunidades indígenas, pertenecientes a la parroquia rural La Esperanza, y llegan a la ciudad de Ibarra por la parroquia urbana Caranqui, atravesando principalmente los barrios Caranqui, La Esperanza, El Ejido, 10 de Agosto, entre otros, cuya población se ha asentado en los márgenes y en la desembocadura de este sistema de drenaje.

Ibarra es una ciudad propensa a inundaciones debido a que el agua que baja del volcán Imbabura a través de las quebradas no puede desfoguearse de forma adecuada por falta de sumideros y alcantarillas o debido al taponamiento de estas. Actualmente en el área de drenaje de la quebrada Las Flores se encuentran varias concesiones de canteras de extracción de material pétreo (Figura 1.1) como son: Alondra del Rey, Quebrada Blanca, Terraza Quebrada Blanca, Terraza Quebrada Blanca Dos, entre otras (Figura 2.5), y su actividad genera depósitos de material suelto en el cauce de las quebradas, y aumenta la erosionabilidad y la inestabilidad de las laderas.



Figura 1. 1 Explotación de material pétreo cerca de la Comunidad San Cristóbal. (La Hora, 2011).

Las fuertes lluvias arrastran el material suelto lo que puede producir obstrucción de tuberías y alcantarillado, daños de estructuras y eventualmente puede provocar inundaciones, como ocurrió en el año 2011 (Figura 1.2), cuando se vieron afectados varios sectores por los flujos que llegaron hasta el antiguo aeropuerto de la Ciudad de Ibarra.



Figura 1. 2 Trabajadores municipales limpiando los escombros que dejó la inundación por el desbordamiento del río-colector Ajaví. (El Universo, 2011).

El propósito de este estudio es realizar un modelo de los flujos de lodo secundarios que bajan a través de las quebradas Seca y Las Flores y son generados en períodos de lluvias intensas para conocer el alcance geográfico de los mismos. Este estudio comprende una caracterización geológica de las quebradas, determinación de los volúmenes de material y caracterización de la cuenca hidrológica necesaria para establecer el volumen de agua que será aportado al flujo.

Este estudio permitirá proponer medidas de mejoramiento y mitigación para las áreas afectadas por inundaciones, lo cual será un aporte al GAD de Ibarra para tomar las acciones correctivas necesarias, salvaguardar el bienestar de la población y prevenir daños a la infraestructura. Este proyecto es parte del Convenio Marco de colaboración interinstitucional entre la EPN y el GAD Ibarra que se firmó en el mes de noviembre del año 2016.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Teórica

Históricamente han ocurrido deslizamientos y flujos de lodo asociados a sismos, que representan amenaza para la población e infraestructura asentada alrededor del CVI. La red hidrográfica del Complejo Volcánico Imbabura se caracteriza por el desarrollo de una distribución radial sobre los conos relativamente simétricos de los principales edificios volcánicos. (Ruiz, 2003).

El cantón Ibarra tiene una época lluviosa que inicia en septiembre y continúa hasta marzo e incluso puede durar hasta mayo.

Durante años, en esta temporada, la ciudad se ha visto afectada por inundaciones que son consideradas una amenaza natural y que constituyen un riesgo constante, sobre todo para las poblaciones aledañas a quebradas o acequias que son los espacios por donde el agua baja hasta poder desfoguearse. El represamiento de agua y de material, ya sea natural del cauce o antrópico, provoca desbordamientos o inundaciones que dañan las estructuras vitales para ciertos sectores de la ciudad. En el drenaje de las quebradas anteriormente mencionadas se localizan varias canteras activas en la actualidad y una fábrica de ladrillos, cuyos residuos han sido depositados en las laderas y cauces de las quebradas. También existen depósitos de basura y drenajes sanitarios. Cuando el agua de las quebradas aumenta, ésta arrastra a su paso piedras, palos, plantas, lodo y todo tipo de material existente y, ya que “la peligrosidad asociada a los flujos de lodo está determinada por el volumen de agua disponible, la cantidad y el tamaño del material suelto, el gradiente de terreno, el encajonamiento de los drenajes y la viscosidad del flujo” (Ruiz, 2003), la probabilidad de ocurrencia de un evento desastroso aumenta durante esta época del año.

1.3.2. Justificación Metodológica

Debido a los problemas ocasionados por los flujos secundarios de lodo que bajan por las quebradas, a partir del año 2009 se realizó un Plan de Inundaciones y Escorrentías Pluviales de la Ciudad de Ibarra.

Este plan lo realizó el Municipio de Ibarra en conjunto con EMAPA, mientras la Secretaría de Gestión de Riesgos validó en 2010 la realización de los estudios definitivos para el control de inundaciones. A finales del año 2011, la empresa consultora INGECONSULT entregó los informes técnicos del trabajo elaborado, el cual incluye estudios geotécnicos realizados en cuatro quebradas: Seca, Las Flores, El Laurel y San Clemente. A partir de este estudio se proponen medidas de prevención y se ejecutan obras estructurales a lo largo de los drenajes de las quebradas, las cuales no han recibido el mantenimiento adecuado, principalmente por falta de recursos, lo que ha provocado que se deterioren.

En los años siguientes hasta el presente, la Ciudad de Ibarra continuó sufriendo inconvenientes debido a la falta de medidas de prevención de inundaciones, las que provocan daños en cultivos y estructuras como acequias, sumideros, puentes, tuberías, alcantarillado y vías de transporte (el aeropuerto Atahualpa se vio afectado por la inundación en el año 2011) y generan importantes pérdidas económicas. Por esto es necesario realizar nuevos estudios, de carácter geológico, para obtener mayor

entendimiento de los aspectos y parámetros involucrados durante el proceso de inundación, y es por eso la importancia de realizar el modelo de flujos secundarios de lodos de éstas quebradas.

1.3.3. Justificación Práctica

Tener conocimiento de la geología local, realizar análisis del estado de las laderas y cauces de las quebradas, conocer la existencia y volúmenes de depósitos de material pétreo y de origen antrópico y comprender los factores principales que generan los flujos de lodo secundarios, que bajan por las quebradas Seca y Las Flores, permitirá realizar planes de contingencia ante las inundaciones. Con el presente estudio se podrá evaluar el alcance geográfico de los flujos de lodo y los principales sectores que se verían afectados bajo ciertos parámetros, lo cual ayudará a considerar la gestión de riesgos de una forma preventiva y estratégica garantizando el bienestar y la seguridad de la población, aportando a la planificación del territorio.

1.4. Hipótesis

La modelación de los flujos de lodo secundarios que bajan por las quebradas Seca y Las Flores permitirá analizar el peligro por inundación en función de su alcance geográfico y determinar los daños potenciales en la población e infraestructura. Esta información podrá aportar con elementos técnicos al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Ibarra.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Realizar un modelo de flujos de lodo secundarios en las quebradas Seca y Las Flores localizadas al sur de la ciudad de Ibarra a través de la caracterización geológica, hidrológica y de un modelo de terreno utilizando el programa ArcGis y el módulo LaharZ, para conocer su alcance geográfico y posibles impactos a la población e infraestructura.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización geológica, levantamiento litoestratigráfico, caracterización de flujos secundarios antiguos y caracterización de los depósitos de material.

- Valoración del volumen de material pétreo con levantamiento de campo e interpretación de ortofotos levantadas con dron.
- Recolección e interpretación hidrológica y pluviométrica de las quebradas.
- Integración de la información para realizar un modelo de flujos secundarios de lodo, usando el programa LaharZ.
- Calibrar el modelo generado, realizando una comparación con los impactos generados con el flujo ocurrido en el año 2011.
- Establecer medidas de mitigación y prevención en función del alcance geográfico de los flujos de lodo.

2. CAPITULO II: REFERENCIAL TEORICO

2.1. Descripción de la zona de estudio

2.1.1. Localización

Las quebradas Seca y Las Flores nacen en las estribaciones nororientales del Volcán Taita Imbabura y sus aguas se descargan en el sur de la ciudad de Ibarra, en el lado oriental del parque Ciudad Blanca (anteriormente el espacio fue ocupado por el Aeropuerto de Ibarra) en donde se unen sus cauces para desviar el drenaje hacia el colector Ajaví que posteriormente descarga en el río Tahuando.

Las quebradas atraviesan las parroquias la Esperanza, que es rural, y llegan hasta las parroquias urbanas Caranqui y San Antonio de Ibarra (Figura 2.1).

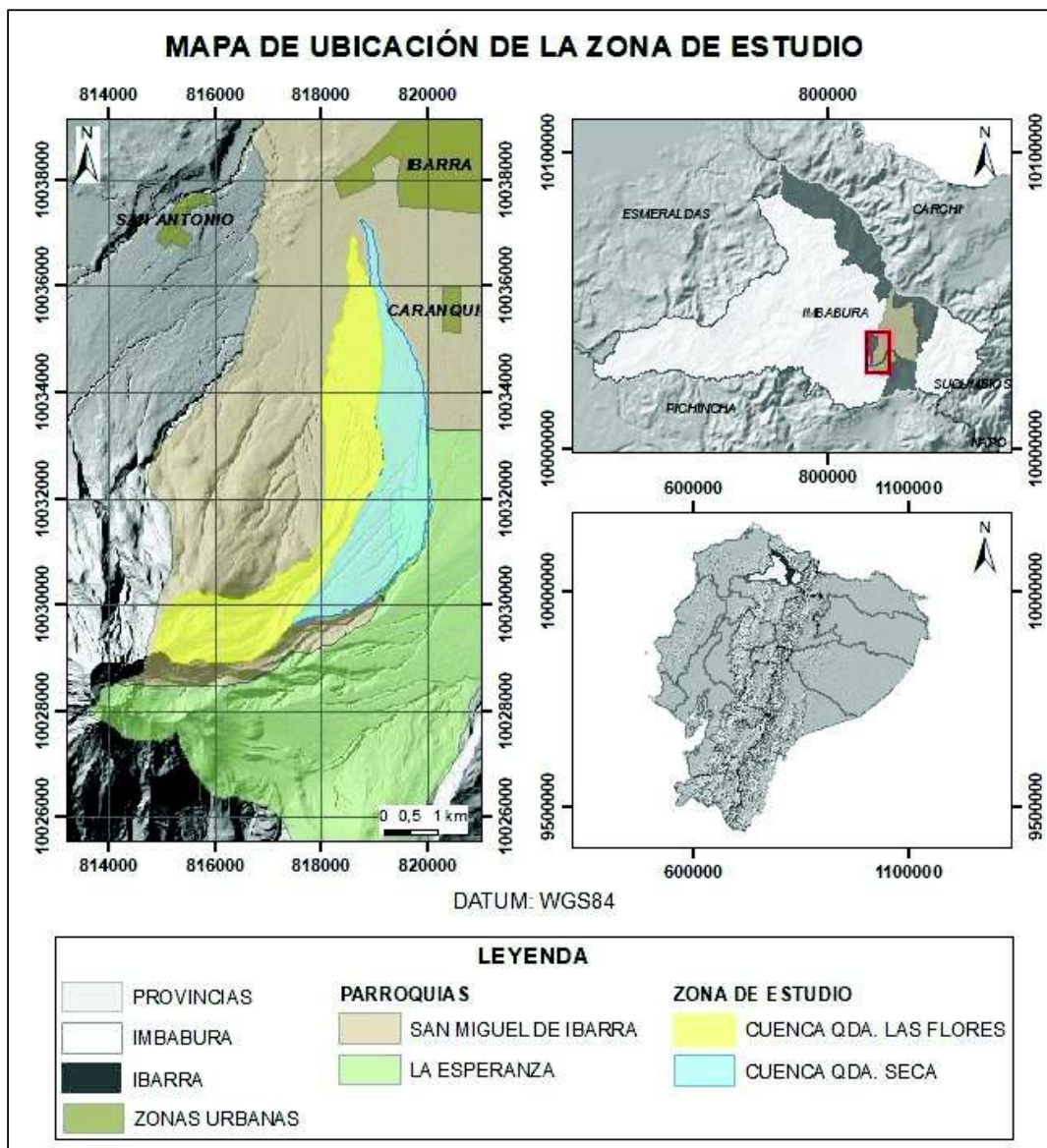


Figura 2. 1 Mapa de localización de las quebradas Seca y Las Flores. Ibarra-Imbabura

2.1.2. Acceso

A través de la vía interoceánica del Ecuador se puede recorrer el trayecto de la vía Panamericana Quito-Ibarra-Tulcán, que permite acercarse al pie del volcán. A partir del parque Ciudad Blanca, que es el lugar donde se unen las quebradas Seca y Las Flores, siguiendo la Av. Camilo Ponce, se sigue las vías secundarias que llevan a la parte alta de las mismas. Por el Barrio 10 de Agosto, siguiendo la vía a las canteras, se recorre la quebrada Las Flores, mientras que para llegar a la quebrada Seca es necesario atravesar por los barrios Yuyucocha y Caranqui, por la vía a San Cristóbal o por la Av. Atahualpa, hasta llegar a la Parroquia la Esperanza. Existen caminos y senderos que permiten llegar hasta la cima del volcán.

2.1.3. Clima

Los datos de temperatura y precipitación de la ciudad de Ibarra más cercanos a la zona de estudio son procedentes de la antigua estación Ibarra-Aeropuerto (M053), ubicada en el actual parque Ciudad Blanca.

El cantón Ibarra posee una gran variedad de microclimas, definidos por las condiciones orográficas existentes (relieve, altitud, etc.), las masas de aire oceánico y las masas de aire o vientos alisios de la cuenca Amazónica, que van desde cálido húmedo hasta cálido seco. La Ciudad de Ibarra se encuentra en una zona de clima templado debido a su posición altimétrica: 2418 msnm en promedio (Donoso, 2012).

Los vientos promedios en la ciudad de Ibarra son del orden de 7m/s como máximo y de 3.5 m/s, como mínimos.

Según Pierre Pourrout (1983), el clima en la Ciudad de Ibarra se clasifica, en:

- Ecuatorial mesotérmico semihúmedo a húmedo, para alturas entre 1500 m.s.n.m. y 3000 m.s.n.m. y,
- Ecuatorial frío muy húmedo-de alta montaña, sobre los 3000 m.s.n.m.

El cantón Ibarra presenta una temperatura promedio de 18.4 °C con una máxima de 26.2 °C y una mínima de 5.9 °C siendo las parroquias localizadas hacia el sur las que presentan temperaturas más bajas. En las parroquias La Esperanza y San Miguel de Ibarra, relacionadas al área de estudio, el promedio de temperatura máxima es 14°C mientras el promedio de temperatura mínima es de 8°C (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

En su informe de Climas del Ecuador–Fundamentos explicativos, Pierre Pourrut (1983) indica que la precipitación promedio anual de la Ciudad de Ibarra es 634.7mm (durante los años 1964 hasta 1978) con una distribución mensual de lluvia que muestran picos de precipitación durante los meses de abril y octubre (90,0 mm y 90,1 mm respectivamente) y una época de sequía en el mes de agosto (14,0 mm).

El valor actual normal de la precipitación mensual durante el mes de abril es de 98.5 mm con anomalías positivas durante casi todos los años y que en 2018 alcanzó 121,7 mm (INAMHI, 2018). Los picos máximos de precipitación van desde marzo a mayo y de octubre a noviembre, y la época de sequía ocurre entre los meses de julio a septiembre. Los datos de la estación meteorológica indican que la precipitación promedio anual es variable, pero se mantiene dentro del rango entre 500 mm y 1000 mm.

Las precipitaciones en el cantón Ibarra varían de acuerdo con el sector. En la parroquia la Esperanza el rango de precipitaciones es de 750 mm hasta 1250 mm, mientras en San Miguel de Ibarra la precipitación es desde 0 mm hasta 1750 mm (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

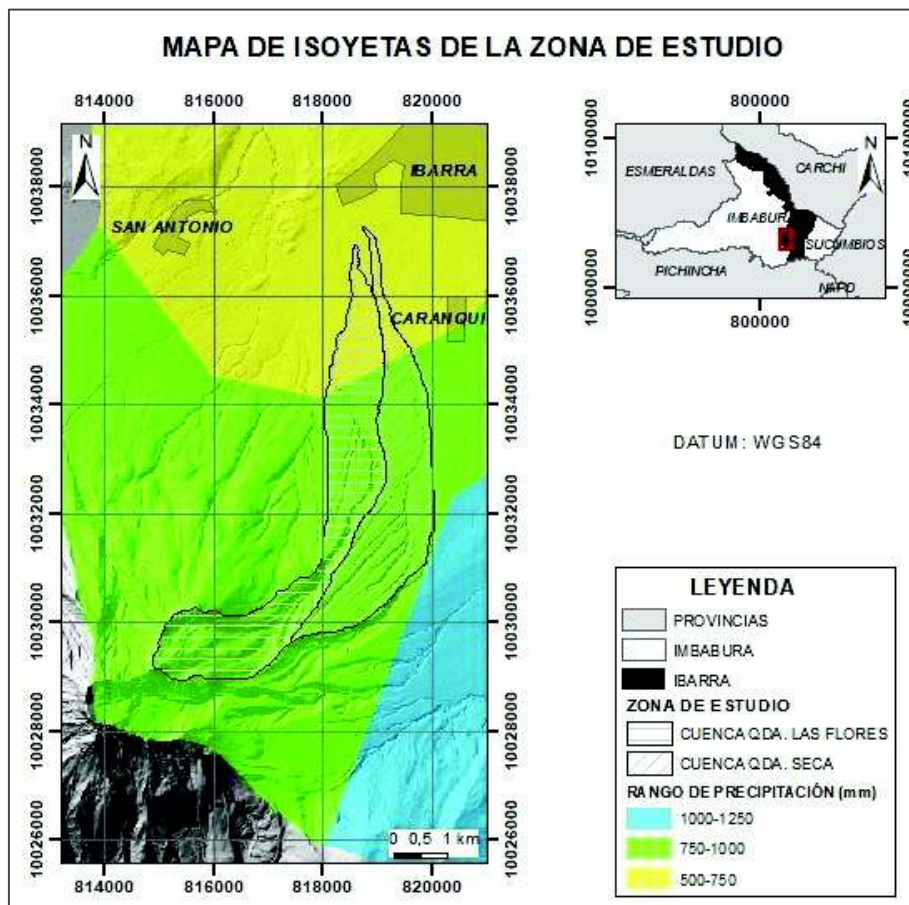


Figura 2. 2 Mapa de isoyetas del cantón Ibarra, modificado del (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

2.1.4. Hidrografía y Morfología

El cantón Ibarra se encuentra en la parte centro-sur de la cuenca del río Mira. En la Ciudad de Ibarra se pueden identificar dos subcuencas que pertenecen a los ríos Ambi y Tahuando (Figura 2.3). La subcuenca del río Tahuando comprende a los ríos de tercer orden Chorlaví y Ajaví, siendo este último el drenaje principal de la ciudad de Ibarra.

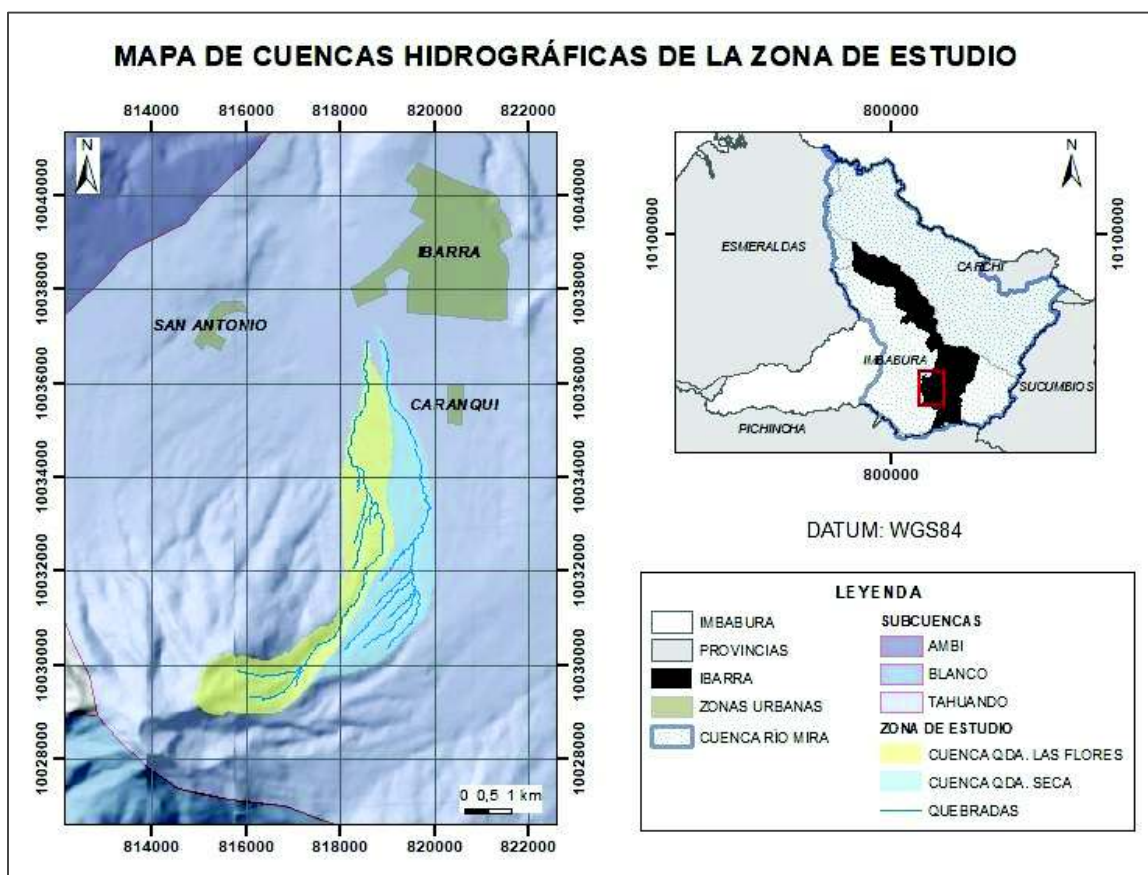


Figura 2. 3 Cuenca hidrográfica de río Mira y subcuencas de los ríos Blanco, Ambi y Tahuando. Modificado del Estudio Hidrológico del río Mira (INAMHI, 2005).

La red hidrográfica del Volcán Imbabura comprende una distribución radial de quebradas que se originan sobre los 4400 m.s.n.m., la repartición de estas quebradas es controlada por estructuras, flujos de lava, domos, depósitos de avalancha y flujos piroclásticos (Ruiz, 2003). Los drenajes de la cara norte del volcán nacen con una distribución radial para posteriormente cambiar a una dirección tangencial, llegando a confluír en el río Chorlaví (Andrade, 2009). Las quebradas Seca y Las Flores nacen en las estribaciones nororientales y en la actualidad su dirección fue modificada para confluír aguas abajo en un tramo del colector Ajaví localizado en las cercanías del parque Ciudad Blanca, esto con el propósito de disminuir el caudal del río Chorlaví.

La quebrada Seca nace en una cota de 2997 metros y tiene cinco ramales principales, de los cuales tres confluyen a una altura de 2650 metros. Aguas abajo cambia su nombre a quebrada Grande. Tiene una pendiente promedio de cauce principal de 9,27%. La quebrada Las Flores se origina a mayor altura, 3865 metros, y tiene varios ramales que se pueden agrupar en dos grupos principales que se unen a alturas de 3200 y 2365 metros, aproximadamente. Tiene una pendiente promedio del cauce principal de 14,68%.

La presencia de canteras, activas e inactivas, modifican la morfología de las quebradas por lo que los cauces presentan valores de ancho variables, que en la quebrada Flores van desde 8 hasta 120 metros, mientras en la quebrada Seca se tiene un ancho de cauce de 3 hasta 90 metros. Así mismo, en los sitios de canteras se observan cambios en la morfología debido a la explotación en terrazas que sirven para estabilizar las laderas y a la presencia de áreas de reforestación. Además se presentan amontonamientos de material y excavaciones a cielo abierto que pueden llegar a medir hasta 10m de profundidad, como es el caso de la concesión Terraza Quebrada Blanca 2 (Figura 2.4).



Figura 2. 4 Cantera Terraza Quebrada Blanca 2, muestra una excavación de más de 10 m de profundidad (círculo rojo). Imagen tomada con Dron y procesada con Pix4D.

2.1.5. Fauna y vegetación

La fauna nativa, constituida principalmente por aves y mamíferos pequeños como palomas, colibríes, lechuzas, mirlos, entre otros, se ha visto desplazada por la presencia de animales domésticos relacionados a la ganadería.

De la misma forma, la vegetación predominantemente arbustiva y de árboles (nativos y no nativos) como eucaliptos, cipreses y lecheros, se ha visto reducida y desplazada por cultivos, principalmente de pasto, maíz, papas, frutas y plantaciones florícolas. La vegetación disminuye con la altura y con las temperaturas bajas, por lo que los bosques se encuentran hasta 3500 m.s.n.m., a mayor altura se encuentran los páramos.

2.1.6. Población y Datos socioeconómicos

Según datos obtenidos mediante el censo poblacional realizado en 2010, la población del cantón Ibarra es de 181.175 habitantes siendo San Miguel de Ibarra la parroquia más poblada con 139.721 habitantes, mientras la parroquia La Esperanza tiene solo 7363 habitantes. Se conoce que las parroquias urbanas muestran un aumento en la tasa de crecimiento poblacional, mientras las rurales muestran un decrecimiento, esto debido a que las personas tienden a migrar hacia áreas urbanas.

En las zonas urbanas las principales actividades económicas se basan en el comercio de productos tanto de la zona como externos o importados. En las zonas rurales las comunidades, como la comuna La Esperanza, se dedican principalmente a la agricultura y la crianza de animales, aunque el turismo comunitario está ganando territorio, siendo un atractivo principalmente para personas extranjeras. Los moradores de estos sectores se organizan para ofrecer el servicio de turismo comunitario, ofreciendo vivienda y comida tradicionales, aprendizaje del idioma nativo (quechua), recorridos guiados por las lagunas y las elevaciones cercanas (Cubilche, Taita Imbabura y Guagua Imbabura principalmente).

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la ciudad de Ibarra (2015) indica que en el área de estudio se pueden reconocer dos actividades principales que son agricultura-ganadería y explotación de material pétreo en canteras. La explotación de materiales pétreos para la construcción es la principal actividad minera que se realiza en el cantón Ibarra y la mayoría de canteras están localizadas en la parroquia Caranqui (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

2.1.7. Explotación de minas y canteras

En el cantón de Ibarra la actividad minera se concentra en la explotación de materiales de construcción o canteras localizados principalmente en cauces de ríos y quebradas. Aunque se trata de una actividad de importante interés económico, también conlleva varios problemas asociados a impactos ambientales y riesgos a la salud. Los principales impactos negativos generados por esta actividad son: niveles altos de partículas en el aire, niveles altos de ruido y vibraciones, destrucción y erosión del suelo, deterioro de la calidad del agua, alteración y destrucción del paisaje y la pérdida de flora y de fauna (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

Dentro de los cauces de las quebradas de la zona de estudio se reconocen al menos 13 canteras inscritas que se presentan como concesiones mineras o minería artesana (ARCOM, 2017), de las cuales dos se encuentran en la quebrada Seca y once en la quebrada Las Flores (Figura 2.5). Los materiales explotados corresponden principalmente a arena, ripio, cascajo, áridos y pétreos.

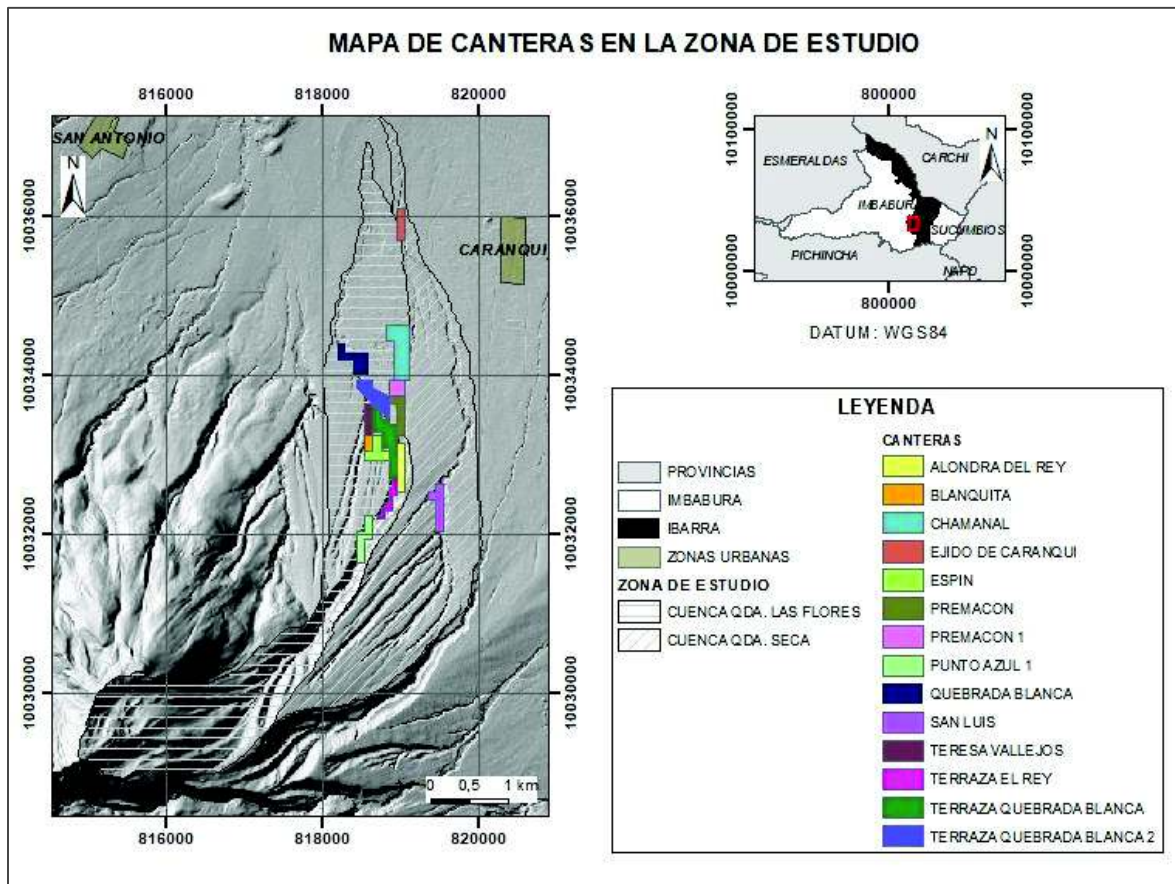


Figura 2. 5 Mapa de ubicación de las canteras de explotación de material pétreo en las quebradas Seca y Las Flores. Modificado del catastro minero ARCOM, (2017)

2.1.8. Uso de suelo y cobertura vegetal.

El uso de suelo en el cantón Ibarra incluye áreas de zonas arqueológicas, bosques protectores, recursos naturales renovables, áreas de protección de humedales, santuarios de vida silvestre, áreas erosionadas o en proceso de erosión, páramos, zonas de riesgos (a deslizamientos), áreas urbanas, etc.

La cobertura vegetal en el cantón Ibarra se clasifica en áreas de cultivos, áreas erosionadas, áreas de arboricultura, bosques, cuerpos de agua, pastos, áreas urbanizadas, páramo y vegetación arbustiva (GAD San Miguel de Ibarra, 2015), cuya distribución se puede ver en la Figura 2.6. El principal uso que se le da al suelo corresponde a la actividad de cultivo. Las parroquias que ocupan mayor área de suelo para el cultivo son Angochagua, La Esperanza, San Antonio, Salinas y las áreas rurales de las parroquias urbanas de Caranqui, San Francisco y Sagrario.

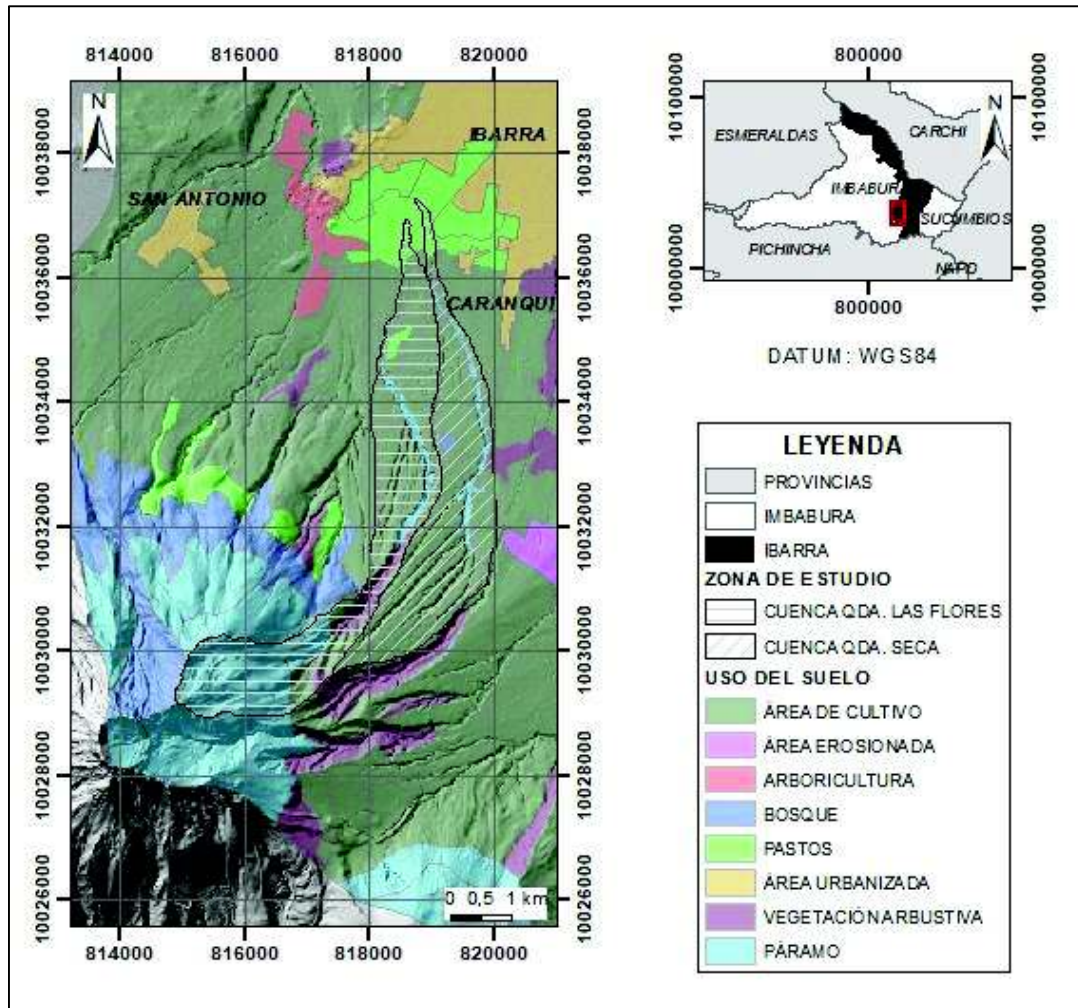


Figura 2. 6 Mapa de cobertura vegetal. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).

2.1.9. Tipo de suelo

Los suelos se clasifican en grupos que comparten características físicas, químicas y biológicas similares, a su vez, estas características dependen del material de origen, la cubierta vegetal, el tiempo de meteorización o edad del suelo, la topografía del lugar, y las actividades antrópicas. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) clasificó a los suelos en órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos, y familias, llegando a formularse 12 órdenes que son Alfisol, Andisol, Aridisol, Entisol, Espodosol, Gelisol, Histosol, Inceptisol, Mollisol, Oxisol, Ultisol y Vertisol (SSS-USDA, 1999). En el cantón Ibarra se pueden encontrar tres órdenes de tipo de suelo, además de los cuerpos de agua (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

- **Inseptisol:** su principal característica es la presencia de horizontes diagnósticos poco desarrollados, es decir, son suelos jóvenes con moderada alteración y conservan algunas semejanzas con el material parental. Son suelos duros y resistentes poco aptos para la agricultura. En el cantón existen 46.082 hectáreas de este suelo, principalmente en las parroquias Lita y la Carolina.
- **Mollisol:** Son suelos profundos con alto contenido de materia orgánica en un epipedón mollico, de coloración generalmente oscura y con alta fertilidad natural que los hace aptos para la actividad agrícola. En el cantón este tipo de suelo asciende a 47.396 hectáreas, lo encontramos en las parroquias La Carolina, Ibarra, Angochagua y La Esperanza.
- **Entisol:** Son suelos poco desarrollados o con desarrollo superficial, sin horizontes definidos, caracterizados por relieves de elevada pendiente; son suelos de origen volcánico reciente. Constituyen el orden de suelo con más representatividad cartográfica en el mundo puesto que aproximadamente un 18,81% de la superficie terrestre emergida. En el cantón Ibarra existen 20.299 hectáreas de este tipo de suelo, en especial en parroquias como La Carolina.

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP) determinó que en el área de estudio existen suelos con texturas que varían desde gruesa a fina en función de la profundidad del estrato, con capacidad de drenaje que se puede definir como buena, moderada o mala, y cuyo contenido de materia orgánica puede ser bajo, muy bajo, medio o alto (MAGAP, 2003).

2.1.10. Amenazas naturales en el Cantón Ibarra

El Ecuador, debido a su contexto geodinámico, características geológicas, geográficas e hidroclimatológicas, es susceptible a varios peligros como inundaciones, erupciones volcánicas y movimientos en masa, los que han causado pérdidas de vidas humanas y de tipo económico y social.

En el cantón Ibarra, entre los años 2011 y 2014, se presentaron una gran cantidad de deslizamientos los cuales provocaron daños como deterioro de la calzada, acumulación de escombros, destrucción de mesas viales, sistemas de distribución de agua y muros, y afectaron gravemente a la red vial del sector rural, principalmente en los sectores como San Jerónimo, La Carolina, Caranqui, El Sagrario, San Antonio, San Francisco, Lita, Angochagua. La ocurrencia de estos eventos es común en invierno y ocurre todos los años (GAD San Miguel de Ibarra, 2015).

Se han identificado ciertas áreas expuestas a amenazas naturales clasificadas en función de las áreas afectadas, el nivel de afectación y el impacto en el ambiente. Las amenazas naturales más recurrentes son las inundaciones (Figura 2.7), los deslizamientos (Figura 2.8), los sismos y las amenazas volcánicas.

- **Inundaciones:** de recurrencia media; provoca crecida en ríos, quebradas y acequias. Lo cual produce taponamiento de alcantarillado y daños materiales importantes por arrastre de materiales.
- **Deslizamientos:** de recurrencia alta; generan graves afectaciones en las redes viales principalmente de los sectores rurales. Las lluvias son los disparadores más comunes y se asocian a inundaciones, contribuyendo al daño de infraestructura y taponamiento de alcantarillas.
- **Sismos:** de recurrencia baja, aunque se debe tomar en cuenta que la ciudad está en zonas con fallas geológicas, lo que puede aumentar el riesgo.
La ciudad de Ibarra fue afectada por el terremoto ocurrido el 16 de agosto de 1868, el cual ha sido considerado como uno de los eventos sísmicos de mayor magnitud en el Ecuador. Este terremoto fue generado en la falla Otavalo y tuvo una magnitud probable de 7,2 (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016).
- **Amenazas volcánicas:** de recurrencia baja, debido a la inactividad que ha presentado el volcán Imbabura. Los eventos que representan amenazas en la actualidad tienen origen secundario, como los flujos de lodo, y se relacionan principalmente con eventos de lluvias intensas.

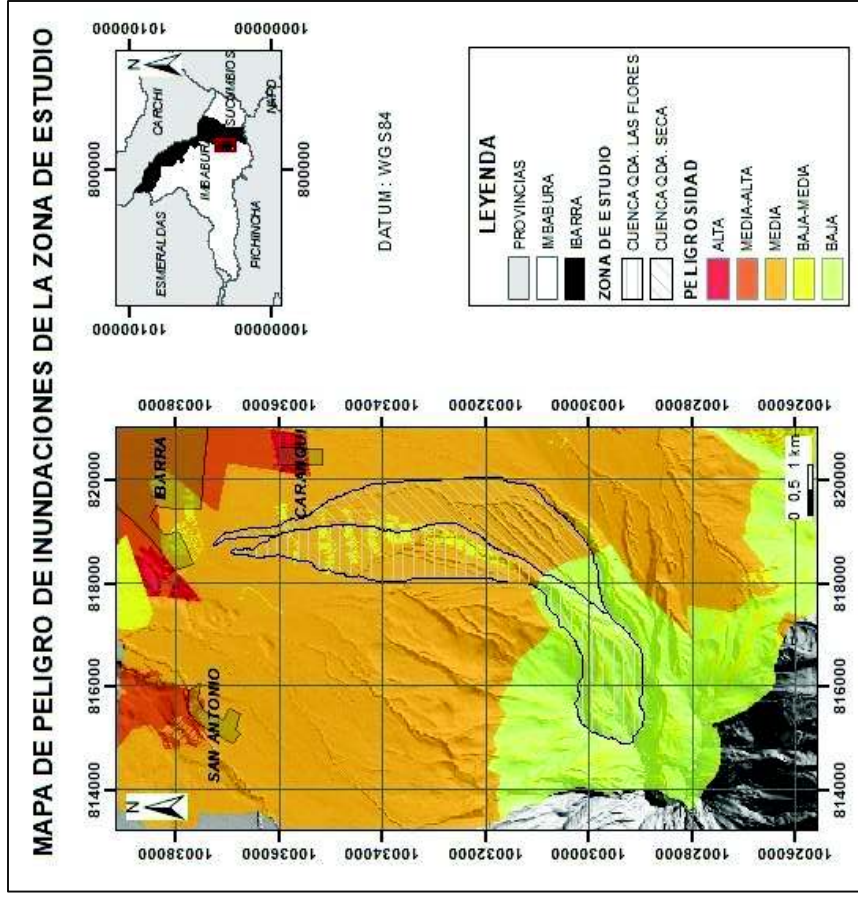


Figura 2. 7 Mapa de peligro de inundaciones. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).

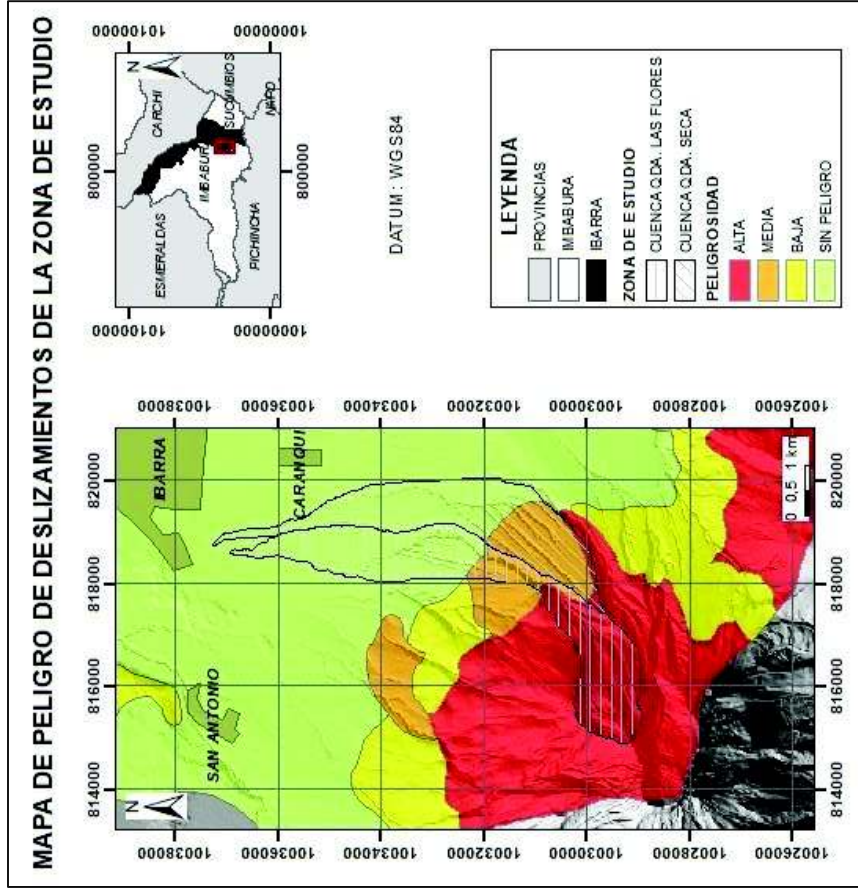


Figura 2. 8 Mapa de peligro de deslizamientos. Modificado de GAD San Miguel de Ibarra (2015).

Peligros asociados al Volcán Imbabura

El volcán Imbabura ha sido catalogado como potencialmente activo, es decir ha tenido actividad al menos una vez durante el Holoceno. Por dataciones y correlaciones estratigráficas se conoce que la actividad ocurrió hasta 2000 años AP (Le Pennec, *et al.*, 2011). Los fenómenos asociados al volcán son: flujos piroclásticos, flujos de lava, lahares, caídas de ceniza y avalanchas de escombros. El volcán no presenta actividad histórica o actual por lo que experimenta actividad secundaria como derrumbes y flujos de lodo debido a lo cual se le atribuye un riesgo de nivel bajo (Ruiz, 2003).

2.1.11. Eventos naturales recientes: Inundación 2011

El boletín meteorológico anual de 2011 presentado por el INAMHI, indica que durante ese año el Océano Pacífico Tropical presentó anomalías negativas en la temperatura de la superficie del mar mientras la atmosfera mostraba anomalías positivas en la presión atmosférica. Este comportamiento acoplado, océano-atmósfera, incidió en el en el clima del Ecuador. Debido a estas anomalías la precipitación acumulada durante este año en la región interandina, zonas norte y centro, tuvo valores mayores a los valores promedio normales, cuyas variaciones oscilaron entre el 2% (En Ángel) y el 110% (Ambato). En Ibarra la situación fue similar, la precipitación fue más intensa que en otros años con una variación de precipitación acumulada entre 25% y 35%. Debido a las fuertes lluvias se produjeron inundaciones, aluviones y flujos de lodo que afectaron a los pobladores (Figura 2.9).



Figura 2. 7 Aluvión en la Qda. Tanguarín. a) Estado del lugar después del evento. b) Búsqueda de una niña desaparecida en San Antonio. (El Universo, abril 2011).

Durante el mes de febrero se registraron lluvias intensas que provocaron crecidas en la acequia que cruza el sector del parque Chile y la ciudadela El Jardín.

El agua arrastraba material pétreo por lo cual muchos pobladores culparon directamente a la explotación de este tipo de material en canteras. Este evento ocasionó daños a vehículos, infraestructura y dejó secuelas económicas, debido a que las nubes de polvo provocadas del lodo seco que quedó no permitían la afluencia de gente al lugar, afectando así a los negocios del sector, según indica el diario El Norte-Diario Nacional Independiente (2011).

Los primeros días de abril del mismo año nuevamente se presentaron fuertes lluvias. En el barrio Tanguarín, por ejemplo, se registraron 35,7 mm de precipitación en menos de 12 horas (El Universo, 2011). Durante estos meses se produjeron varios eventos de desastres como un aluvión debido a un colapso en la quebrada Seca, que produjo un flujo de lodo, piedras, ramas, etc., afectando principalmente a las parroquias San Antonio y la Esperanza. El COE (Comité de Operaciones Emergentes) manifestó a los habitantes de la comunidad La Esperanza que la fuerte corriente que afectó el lugar fue producto de un represamiento de agua de lluvia y material pétreo en las quebradas principales que nacen del cerro Imbabura. Los sectores más afectados por estos eventos fueron los barrios 10 de Agosto, San Clemente, Naranjito, El Manzanal, San Cristóbal, 19 de Enero y 20 de Octubre y sectores de Tanguarín y La Compañía, pertenecientes a la parroquia San Antonio de Ibarra (Anexo 1). La creciente llegó hasta el colector Ajaví por lo que éste colapsó y los escombros se desbordaron. Además, el descenso de palos, lodos y piedras por la quebrada casi provoca el colapso del puente de Ejido de Caranqui, el cual se movió un metro de su lugar y se dañó severamente; personas del sector indicaron que se trata de una estructura estratégica para el paso del transporte vehicular. Algunos moradores se tomaron y bloquearon el puente que conduce a las canteras pidiendo el cierre de estas y alegando que se trata de una problemática muy vulnerable. Adicionalmente se registraron viviendas inundadas, perjuicios en la tubería principal del agua potable, privación de servicios básicos, la Plaza Municipal Rumipamba quedó destruida, aproximadamente de 300 a 400 hectáreas de cultivos fueron afectados, el aeropuerto Atahualpa de Ibarra inundado y pérdida de vidas humanas (El Universo, 2011).

2.1.12. Estudios previos

Estudio Geo-volcanológico del Complejo Volcánico Imbabura (CVI)

Como proyecto previo al título de Ingeniero Geólogo de la EPN se realizó, en el período 2002-2003, el mapeo del CVI a escala 1:25000, levantamiento estratigráfico y muestreo petrográfico, a partir de lo cual se realizaron y analizaron 70 láminas delgadas, 75 análisis químicos y 6 dataciones.

Este estudio permitió identificar dos edificios volcánicos que están separados por el colapso parcial del primero; además se analizaron los peligros asociados al complejo y los fenómenos que podrían ocurrir en caso de reactivación del volcán (Ruiz, 2003).

Evolución Estructural de Complejo Volcánico Imbabura (Ecuador)

El estudio *The influence of active tectonics on the Structural Development and Flank Collapse of Ecuadorian Arc Volcanoes*, realizado por Andrade (2009), tuvo como objetivo establecer un marco de trabajo metodológico y conceptual de las interacciones volcano-tectónicas de sistemas compuestos por el edificio volcánico y el basamento en el cual se desarrollan, y aplicarlos al Arco Volcánico Ecuatoriano. El cuarto capítulo "*Structural evolution of the Imbabura Volcanic Complex (Ecuador)*" estudia los efectos que la tectónica activa tuvo y tiene sobre el desarrollo del estratovolcán Imbabura, el cual está atravesado por el sistema de fallas Cauca-Patía-San Isidro y muestra efectos de este fallamiento en su morfología. Para esto se llevó a cabo trabajo de campo que permitió mapear las principales unidades volcánicas, establecer una estratigrafía y cronología relativa del desarrollo estructural del edificio y buscar y medir evidencia de fallamiento en el volcán. Además, se realizaron análisis de fotografías aéreas y DEMs, análisis de láminas delgadas y análisis químicos.

Estudios geotécnicos

La Ciudad de Ibarra, por su morfología y climatología es propensa a la ocurrencia de inundaciones y flujos de lodo que causan daños a la infraestructura y al bienestar de la población. Por este motivo en el año 1995 se realizó, a cargo de INAM-HIDROSERVICE, el "ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y DISEÑOS DEFINITIVOS DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO MIXTO PARA LA CIUDAD DE IBARRA" en el cual se llevaron a cabo estudios geológicos, geotécnicos, hidrológicos, hidráulicos, poblacionales, de consumo de agua, entre otros, a partir de los cuales se propusieron y llevaron a cabo medidas de mitigación y remediación. Además, dicho estudio fue la base para la realización de un nuevo proyecto realizado durante los años 2012 y 2013 por INGECONSULT Cía. Ltda. llamado "DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO Y TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA LA CIUDAD DE IBARRA" que incluye el "PROYECTO PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES DE LA CIUDAD DE IBARRA". Este proyecto tuvo como objetivo la "Realización de los diseños, presupuestos y especificaciones de equipos, materiales y técnicas constructivas que garanticen, durante el periodo de diseño seleccionado y posteriormente, el control, mitigación y operación de un sistema de obras y acciones que impidan que los flujos de lodos y escombros, que se producen a través de los

cauces de las quebradas y convergen hacia la ciudad de Ibarra desde las estribaciones del Volcán Imbabura, ocasionen daños severos hacia las personas, viviendas, infraestructura pública e impidan el desarrollo de las normales actividades de desarrollo de la ciudad”.

Se realizaron estudios geotécnicos, sísmicos, hidráulicos y de impacto ambiental, así como diseños de las estructuras que posteriormente fueron construidas como parte de las medidas de mitigación de daños y para la reducción de riesgo de inundaciones.

En base al estudio realizado por INGECONSULT en el 2012, en el año 2013 se llevó a cabo el “ANÁLISIS DE FLUJO EN EL CANAL AJAVÍ, DRENAJE PRINCIPAL DE LA CIUDAD DE IBARRA” como proyecto previo al título de Ingeniero Civil, con el cual se pudo diagnosticar el funcionamiento hidráulico del colector Ajaví y se plantearon soluciones, recomendaciones o modificaciones que mejoren su funcionamiento para los diferentes regímenes de flujo. En este estudio se analizó el flujo y caudales de escurrimiento que bajan por las quebradas Seca y Las Flores, así como el efecto de estos sobre el colector Ajaví. La confluencia de las quebradas Seca y Las Flores representó solo un tramo de los cinco existentes. Para generar los hietogramas se realizó el cálculo del tiempo de concentración de las cuencas que dio como resultado 90 min (para el tramo completo), este valor se usó como tiempo de duración de la precipitación, la cual se distribuyó según el modelo de Huff para el segundo cuartil al 30%. El número de curva en la quebrada Seca dio como resultado 74 y en la quebrada Flores fue de 72, para una condición de humedad de suelo normal (II). Se utilizó el programa HEC-HMS para simular el evento durante 24 horas. El caudal máximo de ese tramo para un período de retorno de 10 años fue de 3,1 m³/s (Checa, 2013).

Proyecto para el Control de Inundaciones de la Ciudad de Ibarra

Con el objetivo de acabar con el problema de las inundaciones que se registraban cada año durante la temporada invernal se buscó direccionar los flujos a cauces naturales más amplios que no permitan la acumulación en las derivaciones existentes, con lo cual se atenuaría las inundaciones en la ciudad.

En las primeras semanas de diciembre de 2012 se inició el proyecto con labores en la quebrada Tanguarín, siendo éste un proceso que incluye varias etapas:

- Sub-proyecto No.1: Canal de drenaje hacia el colector Ajaví.
- Sub-proyecto No.2: Microdiques de gaviones para el control de erosión en cauces y estabilización de taludes en quebradas.

- Sub-proyecto No.3: Obras de control, derivación en la Qda. Las Flores y trasvase hacia la Qda. El Laurel.
- Sub-proyecto No.4: Obras de control, derivación en la Qda. Seca y trasvase hacia la Qda. San Clemente.

En el informe del Sub-proyecto 1 se incluyen análisis de caudales de diseño, mecánica de suelo y dos alternativas de implantación del trazado de rectificación del cauce natural de drenaje hacia el colector Ajaví, el cual es alimentado por las quebradas Seca y Las Flores. Los caudales de diseño de flujo de lodo y de escombros se calcularon con un período de retorno de 100 años y su análisis tuvo por objetivo determinar el volumen de sedimentos que acompañan al agua durante la ocurrencia de un flujo de lodos, y para esto se tomaron en cuenta tres mecanismos de generación y transporte de sedimentos: erosión y transporte de sedimentos finos, transporte de sedimentos en los lechos del cauce de las quebradas y la generación de flujos de lodo y escombros. Los resultados de los caudales obtenidos se muestran en la tabla 2.1, que muestra el caudal pico hidrológico, que ha sido multiplicado por un factor de lodos, y el caudal pico de escombros resultante, para períodos de retorno igual a 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 2. 1 Caudales pico, hidrológicos y de escombros, medidos en la confluencia de las quebradas Seca y Las Flores. Tomado del Proyecto de Control de Inundaciones de Ibarra - Subproyecto No.1 (2012).

Período de Retorno (años)	Caudal Pico hidrológico m³/s	Factor de lodos "a"	Caudal pico de escombros m³/s
2	1.1	4.72	5.19
5	1.96	3.74	7.34
10	2.86	3.53	10.09
25	4.07	3.25	13.24
50	5.14	2.96	15.22
100	8.53	2.96	25.27

Para este proyecto se debían construir canales de drenajes que desvíen el agua hacia el colector Ajaví, además de casi 140 microdiques o muros de gaviones y vías de acceso para el mantenimiento de los mismos (Figura 2.10).



Figura 2. 8 Izq.: Construcción de canales. Der.: Construcción de microdiques (Fotos tomada por la Gobernación de Imbabura, 2013).

Aunque se preveía que el proyecto termine en el año 2013, en mayo del 2017 se denunció que aún no estaba terminado (Figura 2.11), por ejemplo, no se cumplió con la totalidad de la construcción de los microdiques, además, los diques que sí fueron construidos se han deteriorado debido al paso de los flujos (La Hora, 2017).



Figura 2. 9 Canales para escorrentías aún no están terminados (La Hora, 2017).

Estudio de intensidades: INAMHI 2015

El equipo técnico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología se vio en la necesidad de actualizar el Estudio de Lluvias Intensas, elaborado en 2011, para lo cual integró información relacionada al cálculo y trazado de curvas de intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones con sus respectivas ecuaciones. Adicionalmente se generaron mapas temáticos de intensidades utilizando el método de Cressman para la espacialización de la información en lugares donde no se cuenta con datos de precipitación (INAMHI, 2015).

Para la realización de este estudio se utilizaron datos de 72 estaciones pluviográficas y 219 estaciones pluviométricas, con series de registros mayores a ocho años, los cuales fueron procesados por medio de programas especializados como SAFARHY e HYDRACCESS (desarrollados por el IRD) y el modelo HidroEsta (de la Facultad de

Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica). Se usó la metodología de correlación lineal múltiple para la determinación de precipitaciones máximas obtenidas a partir de fajas pluviográficas, para el cálculo y trazado de curvas de intensidad, duración y frecuencia. Para la construcción de curvas IDF se usó un modelo de ecuaciones que se definen en función de la intensidad máxima en 24 horas.

Para la obtención de la intensidad máxima se escoge la máxima precipitación observada en cada año hidrológico, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$i = \frac{P}{t}$$

Ecuación 1

Dónde:

I= intensidad (mm/h)

P= precipitación (mm)

T= duración (horas)

La obtención de las ecuaciones IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) se llevó a cabo aplicando un logaritmo a cada valor de intensidad máxima con los que se realizaron las curvas IDF, en las cuales cada quiebre representa una ecuación tipo o ecuación general:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n}$$

Ecuación 2

Dónde:

I= intensidad (mm/h)

T=período de retorno (años)

t= tiempo de duración (minutos)

K, m, n= constantes de ajustes propias de cada estación

Se tienen como resultados fórmulas para el cálculo de intensidades para cada estación estudiada. La estación Ibarra-Aeropuerto, de código M0053, es la más cercana a la zona de estudio, localizándose en X=822594, Y=10036524 (coordenadas UTM) a una altitud de 2214 m.s.n.m. Para el análisis de esta estación se usó una serie de datos de 43 años, recopilados desde 1955 hasta 2010, de lo cual se obtuvo como resultados las ecuaciones expresadas en la Tabla 2.2 con las respectivas curvas IDF (Figura 2.12).

Tabla 2. 2 Ecuaciones para el cálculo de intensidades (INAMHI, 2015).

ESTACIÓN IBARRA-AEROPUERTO -M0053			
Intervalo de tiempo (min)	Ecuaciones	R	R ²
5 - 30	$i = 163,981 * T^{0.1746} * t^{-0,5490}$	0,9945	0,9891
30 - 120	$i = 235,822 * T^{0.1642} * t^{-0,6361}$	0,9956	0,9913
120 - 1440	$i = 629,210 * T^{0.2196} * t^{-0,8701}$	0,9967	0,9935

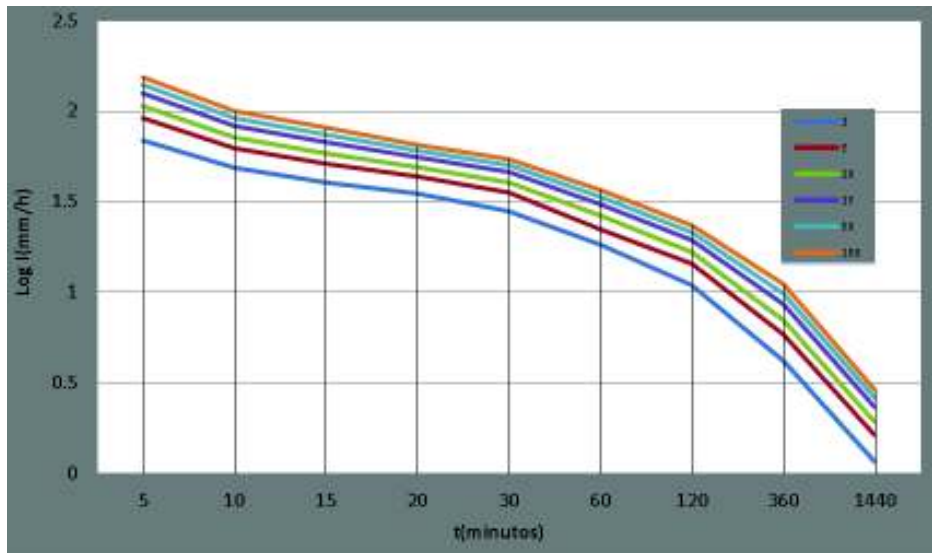


Figura 2. 10 Curvas IDF para la estación Ibarra-Aeropuerto, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. (INAMHI, 2015)

2.2. Marco Geológico

2.2.1. Geología regional

La geodinámica del Ecuador se relaciona directamente con la subducción de la Placa Nazca bajo la Placa Sudamericana que ocurre a una velocidad de 57-70 mm por año (Spikings *et al.*, 2001). La Placa Nazca, junto a la Placa Cocos, nace a partir de la fragmentación de la Placa Farallón que ocurrió hace aproximadamente 23 Ma. Tiene una estructura compleja que incluye a la Cordillera de Carnegie, con un espesor de 2km y 400km de ancho, que es considerada una acumulación de material volcánico producto de la actividad del Punto Caliente Galápagos y de la Dorsal Cocos Nazca, la cual se subduce desde hace 4-5 Ma, cuando llegó a la fosa (Collot *et al.*, 2009).

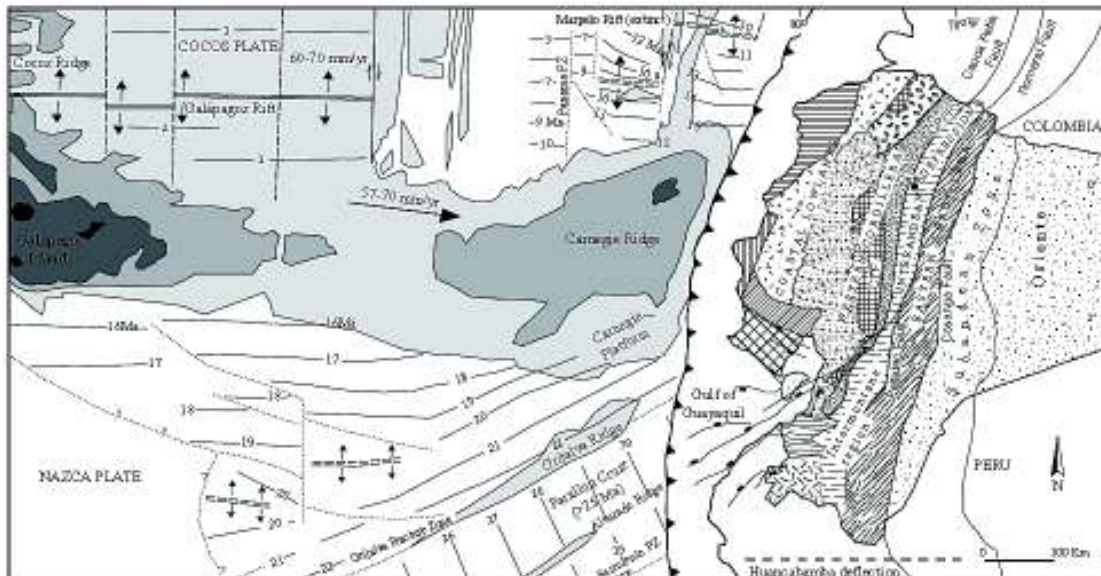


Figura 2. 11 Entorno geológico y geodinámico del Ecuador (Vallejo, 2007).

Los Andes ecuatorianos se reconocen como una cadena montañosa que se formó sobre una zona de subducción y cuenta con dos cordilleras que están separadas por una depresión.

Cordillera Occidental

Se compone de un basamento oceánico, que corresponde a bloques alóctonos acrecionados contra la Placa Sudamericana durante el Cretácico tardío hasta el Eoceno (Jaillard *et al.*, 1995). Desplazamiento a lo largo de fallas transcurrentes orientadas N-S han dado lugar a un complejo conjunto de unidades tectono-estratigráficas que asocian sucesiones volcano-sedimentarias de litologías similares, pero de diferentes edades (Vallejo, 2007).

Cordillera Real

Constituye un cinturón alargado formado por terrenos metamórficos de naturaleza autóctona y alóctona de edad Paleozoico a Mesozoico, con orientación NNE-SSO, que han sido controlados estructuralmente por fallas o suturas regionales (Aspden & Litherland 1992), y que, según PRODEMINCA (citado en Duque, 2000), han sido intruídos por extensos granitoides tipo I.

Se conocen cuatro divisiones litotectónicas agrupadas por sus afinidades litológicas y estructurales que, de oeste a este, son: Guamote, Alao, Loja y Salado, y están limitadas por sistemas de fallas regionales que son, en el mismo sentido: Peltetec, Baños, Llanganates y Cosanga-Méndez (Litherland *et al.*, 1994).

Depresión Interandina o Valle Interandino

Es la depresión morfológica que se encuentra ubicada entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real. Tiene aproximadamente 25 km de ancho y 300 km de largo, con una dirección N-S o NNE-SSW y cuyos límites son fallas reactivadas. Se formó en un régimen transpresivo de “*Restraining bend*” en el Mioceno tardío-Plioceno, desde el norte hacia el sur. Durante su desarrollo se formaron varias subcuencas en las cuales se depositaron productos de abanicos aluviales, sedimentos fluviales, facies lacustres y volcánicos contemporáneos (Winkler *et al.*, 2005).

El Valle Interandino se encuentra dividido en tres segmentos por la presencia de dos nudos volcánicos (Figura 2.14) los cuales marcan cambios en su orientación: el Segmento Otavalo-Chota o IAV Norte, el Segmento Quito-Guayabamba o IAV-Central y el Segmento Latacunga-Riobamba o IAV Sur. (Villagómez, 2003). Así mismo, De sur a norte se pueden encontrar las subcuencas Alausí-Riobamba, Ambato-Latacunga, Quito-San Antonio-Guayabamba y Chota.

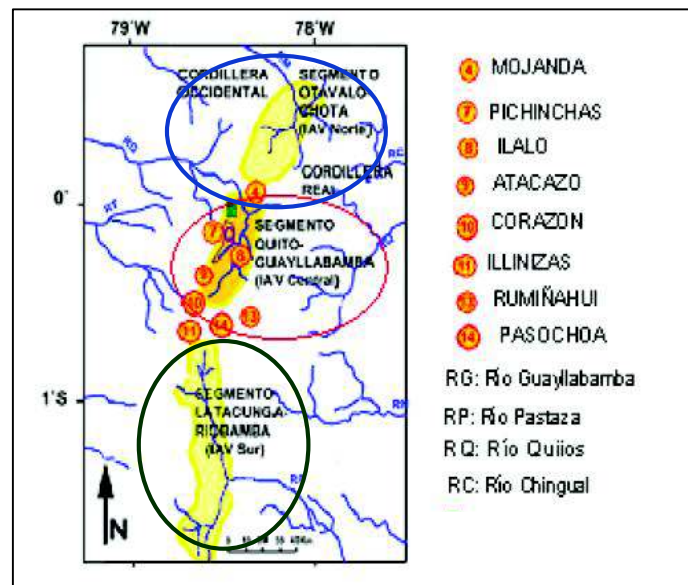


Figura 2. 12 División del Valle Interandino en tres segmentos separados por nudos volcánicos (Villagómez, 2003).

2.2.2. Geología Local

Las unidades del área de estudio corresponden a formaciones del Complejo Volcánico Imbabura. El volcán Imbabura se localiza en el Valle Interandino, y tiene un sustrato conformado por sucesiones volcanosedimentarias que rellenaron el valle antes de la construcción del edificio mismo del volcán, y corresponden a depósitos volcanoclásticos de la Formación Angochagua de edad Pliocénica, depósitos

derivados de volcanes Pleistocénicos (Huanguillaro, Mojanda, Cusin, Cubilche y Cotacachi) y depósitos del Pleistoceno medio a tardío de la Formación Cangahua (Andrade, 2009).

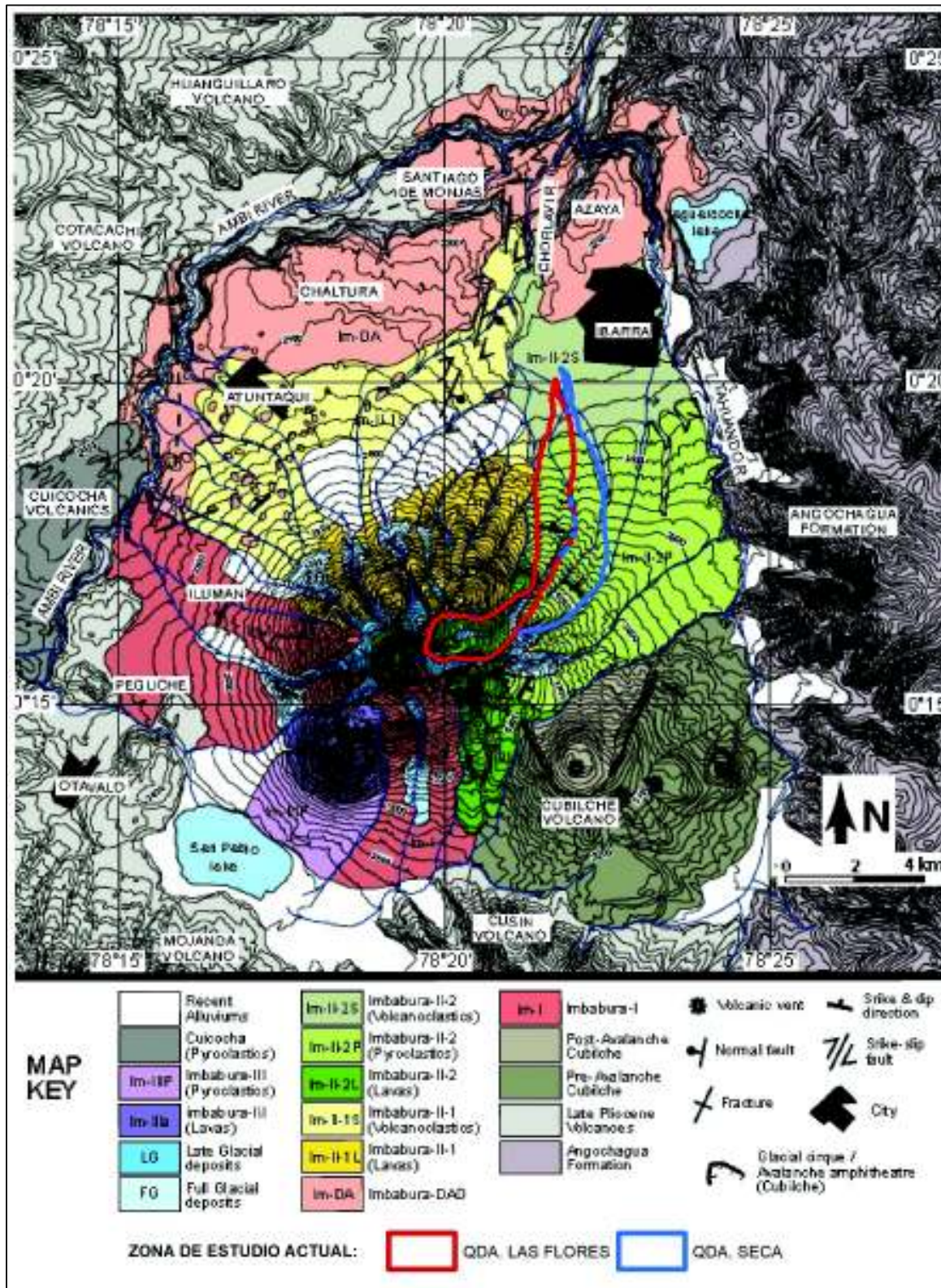


Figura 2. 13 Mapa de unidades litológicas del Complejo Volcán Imbabura. Modificado de Andrade, 2009.

Sobre las unidades mencionadas se encuentran las unidades estratigráficas (Figura 2.15) que conforman el edificio del Complejo Volcánico Imbabura que serán descritas a continuación.

Imbabura I: conformado por paquetes de lavas masivas porfiríticas de composición andesítica, de color gris claro, rojizo o negro compuestas por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, óxidos y anfíbol, en una matriz de plagioclasa, óxidos, clinopiroxeno y vidrio volcánico.

Imbabura DAD: es una brecha clastosoportada compuesta de bloques andesíticos angulosos de la unidad Imbabura I. La unidad tiene una forma de abanico dirigido hacia el norte, la cual se produjo posiblemente por la inestabilidad gravitacional del edificio o por control tectónico.

Imbabura II: corresponde a flujos de lava y flujos bloque y cenizas de composición andesítica de color gris claro o rosado, que han tenido mayor diferenciación. Se divide en dos sub-unidades basados en criterios geoquímicos, geográficos y por el tipo de depósito.

- **Imbabura II-1:** se compone por depósitos de flujos de lava y de aluviones. Los flujos de lava están localizados sobre 2800 m.s.n.m., en los flancos norte y noreste del edificio volcánico. Las secuencias de aluviales en cambio se localizan bajo 2800 m.s.n.m.; en la zona del río Chorlaví, estos depósitos contienen clastos (bloques redondeados, lavas masivas o bombas vesiculados) de andesitas anfíbolíticas con ceniza volcánica, lo cual sugiere actividad explosiva o relacionada a colapsos de domos.
- **Imbabura II-2:** subunidad localizada en el flanco este del edificio volcánico, se compone de flujos de lava, flujos de bloque y ceniza y depósitos de aluviones. Las lavas se encuentran sobre 3200 m.s.n.m., y fueron emitidas de ventos laterales ubicados sobre 3800 m.s.n.m. La secuencia de bloques y ceniza se encuentra bajo 3200 m.s.n.m. en el flanco noreste del volcán. Este depósito consiste en secuencias decamétricas que contienen bloques subredondeados con estructura de “corteza de pan” de composición andesítica (vesiculada o masiva afanítica). El tamaño y distribución de este depósito sugiere la presencia de un importante centro de emisión que estuvo en la parte alta del flanco noreste del volcán. Por último, bajo los 2400 m.s.n.m. se encuentra una secuencia de depósitos aluviales, producto del retrabajamiento del flujo de bloques y ceniza. Este depósito tiene mejor sorteo y contiene mayor cantidad de clastos redondeados de tamaño decimétrico a centimétrico, con zonas enriquecidas en ceniza.

Depósitos glaciares: representados principalmente por morrenas laterales y terminales, fácilmente reconocibles por su morfología, se encuentran desde 4200 hasta 3000 m.s.n.m. Dos grupos de morrenas se han diferenciado según el tamaño y la altitud a la cual fueron encontradas. El primer grupo se encuentra entre 3400 y 2900 m.s.n.m., en los flancos medio y bajo del volcán, a la salida de los canales glaciares. El segundo grupo de morrenas se observan en los flancos medio y alto, dentro de los canales profundos con forma de “U” y a veces en valles menos desarrollados, en altitudes entre 3500 hasta 4000 m.s.n.m. Éstas morrenas fueron formadas por una segunda generación de glaciares.

Imbabura III (Huarmi Imbabura): Corresponde a un grupo de domos de lavas (más de cinco domos que forma un alineamiento de dirección NNE-SSW) que fueron emplazados en la parte media del flanco sur del volcán, bajo una altura de 4000 m.s.n.m., los cuales son denominados Huarmi Imbabura. Esta unidad no muestra evidencia de erosión o de depósitos glaciares. Petrográficamente los domos se componen de andesitas de textura afanítica que contiene anfíbol, plagioclasa y clinopiroxeno. La extrusión del Huarmi Imbabura representa el último evento de actividad volcánica.

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Amenazas y peligros

Las amenazas se definen, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009), como el fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales o económicos, o daños ambientales. Las amenazas naturales son los procesos o fenómenos naturales que tienen lugar en la biósfera que pueden resultar en un evento perjudicial. Éstas se clasifican en: amenazas hidrometeorológicas, que se refieren a fenómenos de origen oceanográfico, hidrológico o atmosférico. Amenazas geológicas, las cuales se refieren a fenómenos naturales terrestres internos como terremotos, actividad volcánica y procesos geofísicos afines. Y las amenazas biológicas, que son procesos orgánicos que ocurren debido a la exposición a microorganismos patógenos, toxinas o sustancias bioactivas y que pueden causar la muerte, lesiones o disfunciones sociales o económicas.

2.3.2. Fenómenos de remoción en masa (FRM)

También conocidos como movimientos en masa o movimientos de terreno, son movimientos de rocas, suelos o detritos que responden a una gran diversidad de procesos geodinámicos externos, geológicos, hidrometeorológicos, químicos o mecánicos, los cuales pueden estar influenciados por la actividad antrópica, y que logran desestabilizar las laderas o taludes, modificando el relieve del terreno. Cruden (1991) indica que el término “movimientos en masa” incluye todos aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras, por efecto de la gravedad, aunque también participan otros factores que pueden ser condicionantes (litología, uso de suelo, pendiente del terreno o presencia de FRM) o detonantes (precipitaciones o sismos).

En el Ecuador la clasificación de FRM más utilizada es la de Varnes (1978) en la que se presentan todas las variaciones de movimientos de laderas que incluyen: caídas, volcamientos, deslizamientos, propagaciones y flujos, y se estudia a las avalanchas de hielo y nieve como factor desencadenante; además se divide al tipo de material en dos clases: roca y suelos. Para esta clasificación se emplean criterios como el tipo de movimiento, el tipo o mecanismo de movimiento y el tipo de material. En el informe de GEMMA (2007) se presentan los movimientos en masa se clasifican de la siguiente forma:

- **Caída de rocas o de suelo:** cuando uno o varios bloques se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de la superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable; el movimiento es rápido a extremadamente rápido (velocidad mayor a 5×10 mm/s. No es un movimiento masivo ni del tipo flujo.
- **Volcamiento:** si ocurre rotación de uno o varios bloques de roca o de suelo, alrededor de un punto (pivote) de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad o por la presión que ejercen los fluidos en las grietas. El volcamiento puede ser en bloque, flexural o flexural de macizo rocoso.
- **Deslizamiento:** movimiento ladero abajo de una masa de suelo o de roca cuyo desplazamiento ocurre a lo largo de una superficie de falla o de una delgada zona donde ocurra una deformación cortante. Estos movimientos pueden ser traslacionales, si ocurren a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada o en cuña, movimientos rotacionales en cambio se mueven a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava, y los deslizamientos compuestos, cuya superficie de ruptura se desarrolla a lo largo de planos de plegamiento o

por la intersección de varias discontinuidades planares o por la combinación de superficies de ruptura y planos de debilidad de la roca.

- **Propagación lateral:** desplazamiento ocurre por deformación interna (expansión) del material. Se pueden distinguir dos tipos de propagación. En el primer tipo el movimiento afecta a todo el material sin distinguir la zona basal de cizalla. El segundo tipo de propagación ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.
- **Flujo:** este tipo de movimiento presenta un comportamiento semejante al de un fluido, y puede ser rápido o lento, saturado o seco. Hungr (2001) clasificó a los flujos en función del tipo y propiedades del material, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características. Es importante determinar correctamente el tipo de flujo ya que el potencial destructivo es característico de cada uno.

El flujo es seco cuando ocurre un movimiento de detritos sin que éste contenga agua. Los flujos de arena son procesos fundamentales en la migración de dunas de arena, los flujos secos de talud son importantes en la formación de conos de talud, los flujos de limo pueden ser desencadenados por el fallamiento de escarpes empinados o barrancos de material limoso.

Los flujos de detritos contienen agua además de los sedimentos. Pueden ser rápidos a extremadamente rápidos y tienen un índice de plasticidad menor al 5%. Estos flujos transcurren principalmente confinados a lo largo de canales o cauces con pendientes altas. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad en los segmentos del cauce. Los flujos de detritos denominados **lahares** ocurren en los volcanes, ya sea durante las erupciones o en el período entre estas, y movilizan depósitos de material volcánico no consolidado.

Otro tipo de flujo son las **crecidas de detritos**, que son flujos rápidos de una crecida de agua que transporta gran cantidad de carga a lo largo del canal. Para diferenciarse de un flujo de detritos se toma en cuenta el caudal pico observado o potencial.

Los **flujos de lodo** son flujos canalizados que tiene un movimiento muy rápido a extremadamente rápido y que tienen un contenido de agua significativamente mayor al del material fuente, con una plasticidad mayor al 5%. Estos flujos contienen mayor fracción arcillosa que los flujos de detritos e incorporan agua superficial durante el movimiento.

Los **flujos de tierra** se desarrollan con velocidades moderadas (generalmente lentos a extremadamente lentos), con movimientos intermitentes de suelo arcilloso plástico.

El término **deslizamiento por flujo** o por licuación, introducido por Casagrande (1936), define a deslizamientos que en fases posteriores a su iniciación se comportan como un flujo. Ocurre en taludes con pendientes moderadas e involucra un exceso de presión de poros o licuación del material. Principalmente ocurre en arenas o limos saturados no compactados o arcillas.

Las **avalanchas de detritos** son flujos no canalizados de detritos saturados a parcialmente saturados, poco profundos, que pueden ser rápidos a extremadamente rápidos. Presentan una menor saturación que los flujos de detritos y tienen un desarrollo más rápido a la rotura. Las **avalanchas de roca** son flujos extremadamente rápidos de roca fracturada; son poco frecuentes pero muy peligrosas (Hungry *et al.*, 2001).

2.3.3. Flujos de escombros (lahares)

Los lahares son flujos rápidos originados en las laderas de los volcanes. Están constituidos por una mezcla de agua y material rocoso, que es impulsada principalmente por la gravedad y viaja a través de las quebradas, siendo canalizados y concentrados dependientemente del relieve del área. Son procesos naturales que se convierten en amenazas cuando su paso afecta al bienestar de las personas y causa daños estructurales (Schilling, 2014).

Debido a su velocidad, y dependiendo de su volumen, pueden arrastrar materiales de diferentes tamaños aumentando a su vez su volumen y por tanto su capacidad de destrucción. El proceso de incorporación de sedimentos y escombros al flujo durante su descenso se denomina *bulking*. Además ocurren otros procesos como erosión del cauce, segregación de partículas, dilución, *debulking*, y procesos de selección (Vallance & Iverson, 2015).

Tipos de flujos generados

Los lahares primarios son aquellos que están directamente relacionados a la actividad eruptiva, por derretimiento de glaciares por contacto con material incandescente o por ruptura de lagos cratéricos. Los lahares secundarios están indirectamente relacionados a una erupción volcánica o tienen ocurrencia después de la misma. Se producen por lluvias, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña.

Los flujos de lodo secundarios suelen ocurrir con mayor frecuencia que los primarios y generalmente son de menor magnitud, siendo limitados por la intensidad y duración de la lluvia, la acumulación de agua y el material disponible que puede ser removido. El volumen de los lahares secundarios está en el rango de $10^3 - 10^6 \text{ m}^3$ y sus caudales en el orden de $10^2 - 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Lahares secundarios ocurridos en el volcán Tungurahua tuvieron caudales promedio de $10 - 30 \text{ m}^3/\text{s}$, llegando a tener caudales pico de hasta $300 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que el rango de volúmenes varió entre las decenas y los miles de m^3 . Los lahares primarios son menos comunes, pero tiene magnitudes mayores de volumen ($0,1 \text{ km}^3$) y de distancia recorrida (Mothes & Vallance, 2015). Lahares de este tipo ocurridos en el volcán Cotopaxi tienen caudales pico estimados de entre 1000 y $30000 \text{ m}^3/\text{s}$. Eventos puntuales desencadenantes de estos fenómenos incluyen: aumento de la escorrentía superficial que ocasiona erosión o la elevada presión subsuperficial que hay en los depósitos saturados y que producen deslizamientos superficiales.

Comportamiento del flujo

Los lahares se componen de una fase sólida y una fase líquida, su densidad está relacionada con la cantidad de partículas en suspensión, es por eso que, si existe mayor cantidad de partículas en suspensión, la densidad del flujo aumenta. En cambio, la viscosidad está relacionada con la cantidad de espacios intersticiales entre el agua y el material sólido. Los flujos se mueven con menor turbulencia que el agua y tienen mayor capacidad de erosión y de transporte. El flujo pierde energía debido a la fricción interna y a la fricción entre el fluido y el contorno. La velocidad del flujo forma un perfil vertical en el cual las velocidades aumentan hacia la superficie debido a que la fricción basal en el cauce retarda su desplazamiento (Vallance, 2005).

La capacidad de erosión de los flujos es mayor en tramos de mayor pendiente, en aquellos sustratos que se encuentran saturados en agua y cuando los sedimentos del cauce tienen menor consolidación (Vallance & Iverson, 2015). Si el flujo es hiperconcentrado, es decir que tiene entre 40% y 60% de agua, la turbulencia es mayor lo que provoca mayor agitación y erosión.

Según Vallance (2000), en los lahares las partículas se segregan por su tamaño y por su densidad la cual se determina por la fracción de sólidos, la proporción de partículas gruesas y la proporción de partículas finas en suspensión. En un flujo con partículas de tamaño homogéneo, las partículas de menor densidad migran hacia la superficie donde las velocidades son mayores, por lo que tienden a irse hacia adelante o hacia los márgenes del flujo. Si existe mezcla de tamaños y una mayor fracción de sólidos,

se favorece el proceso de percolación por el cual las partículas más finas bajan a través de los espacios formados por las partículas más grandes por la influencia de fuerzas gravitacionales. Cuando las partículas finas migran hacia abajo, desplazan a las más grandes hacia arriba y éstas migran hacia el frente y hacia los márgenes del flujo, porque la velocidad en la superficie del flujo es mayor que en el fondo, por lo que ocurre gradación inversa y acumulación de partículas grandes en el perímetro del flujo. A este proceso se le conoce como tamizado cinético.

2.3.4. Tormenta

Conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aun días y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región.

Tormenta de diseño

Es un patrón definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico mediante hietogramas de diseño, mapas de isoyetas o un valor de profundidad de precipitación en un punto. Estos patrones se basan en información histórica de precipitaciones en un sitio o se pueden construir en base a características de precipitaciones en regiones adyacentes (Chow *et al.*, 1994)

2.3.5. Cuenca Hidrológica

Es considerada la unidad básica de estudio de la hidrología. Se puede definir como cuenca superficial a una zona de la superficie terrestre en la cual las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida, además de que se asocia con cuencas subterráneas o acuíferos. Se denomina cuenca cerrada o endorreica si el punto de salida se ubica dentro de los límites de la cuenca (lago), y cuenca exorreica o abierta si su punto de salida está fuera de los límites de la cuenca y descarga en el mar (Aparicio, 1992).

2.3.6. Precipitación

Se refiere al proceso de caída de agua a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo, etc. Si parte de esta precipitación circula sobre o debajo de una superficie terrestre y llega hasta una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca, se denomina escurrimiento, mientras que, si el agua penetra en el suelo, a

través de la superficie de la tierra, y queda retenida o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado, esto se llama infiltración (Bateman, 2007).

2.3.7. Tiempo de concentración

Se define comúnmente como el tiempo que tarda una gota de un evento de precipitación en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta su desagüe. Chow *et al.*, (1994), definen el tiempo de concentración como el tiempo de tránsito de un flujo que ocurre después del inicio de una precipitación en el cual toda la cuenca comienza a contribuir con dicho flujo. Similar es la definición de Llamas (1993), quien lo define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario, es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. El tiempo de concentración es una variable propia para cada sitio y depende de las características geomorfológicas de la cuenca y de la precipitación.

2.3.8. Hietograma

Es un gráfico que representa mediante barras o bloques la precipitación o intensidad de precipitación en función del tiempo (Chow *et al.*, 1994). En el eje de las ordenadas se representa la precipitación en mm o la intensidad en mm/hora o en mm/min dependiendo de la duración del evento; en el eje de las abscisas se representa el tiempo que puede ser en horas o en minutos (Figura 2.16).

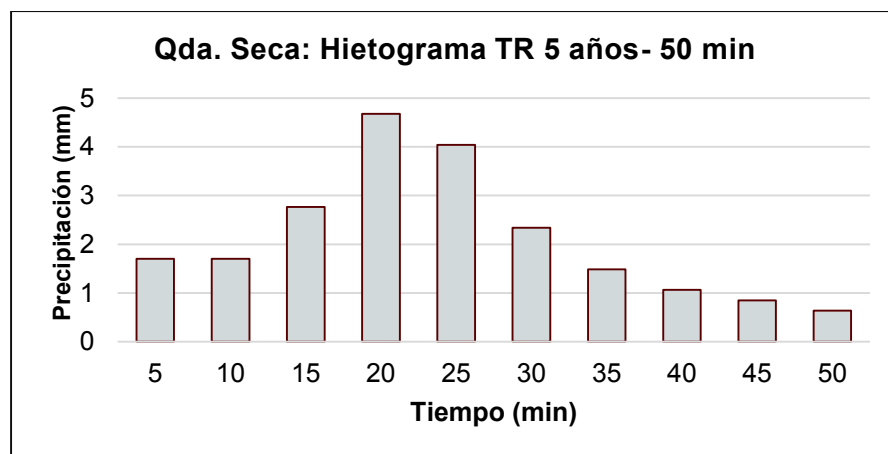


Figura 2. 14 Hietograma de la Qda. Seca.

2.3.9. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Son la representación gráfica de técnicas estadísticas que relacionan las variables de tal forma que manifiestan la relación entre la intensidad de lluvia (mm/horas o mm/min), que ocupa el eje de las ordenadas, con su duración representada en el eje

de las abscisas, y se asocia a una frecuencia o período de retorno, obteniendo así curvas diferentes para períodos de retorno diferentes. Témez (1978) las describe como curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en diferentes intervalos de duración y que corresponden a una misma frecuencia o período de retorno. La Figura 2.17 muestra la relación entre la intensidad y el tiempo de duración de un evento de precipitación que ocurre en la quebrada Seca, en períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Se observa que los eventos tienen mayor intensidad durante los primeros 10 minutos, y a partir del minuto 25 o 30 la pendiente de la curva se estabiliza hasta llegar ser casi constante al final del evento.

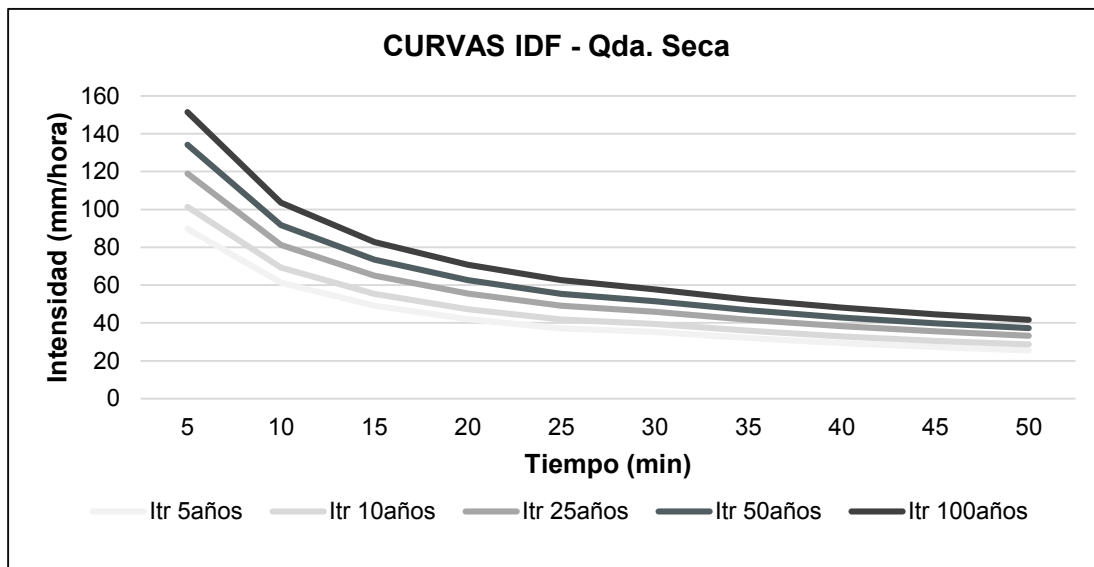


Figura 2. 15 Curvas IDF de la Qda.Seca, para un evento de período de retorno igual a 5 años y una duración de 50 min.

2.3.10. Distribución temporal de tormentas-Curvas de Huff

La distribución de una tormenta se refiere a la cantidad de lluvia que cae en incrementos sucesivos de tiempo, tomando en cuenta que una mayor porción de esta lluvia ocurre en una pequeña parte del total del tiempo en el que ocurre la tormenta.

Huff & Vogel (1976) decidieron clasificar las tormentas en cuatro grupos de probabilidad dependiendo de si la mayor porción de lluvia ocurría en el primer, segundo, tercero o cuarto cuartil del período de un evento de precipitación. Para esto realizó el estudio de una serie de datos de 11 años tomados desde 1955 hasta 1966 en áreas puntuales hasta áreas de 1036 km², del este central de Illinois.

Los modelos estadísticos son curvas suaves que reflejan el promedio de distribución de precipitación con el tiempo, en valores de porcentaje acumulado (Figura 2.18).

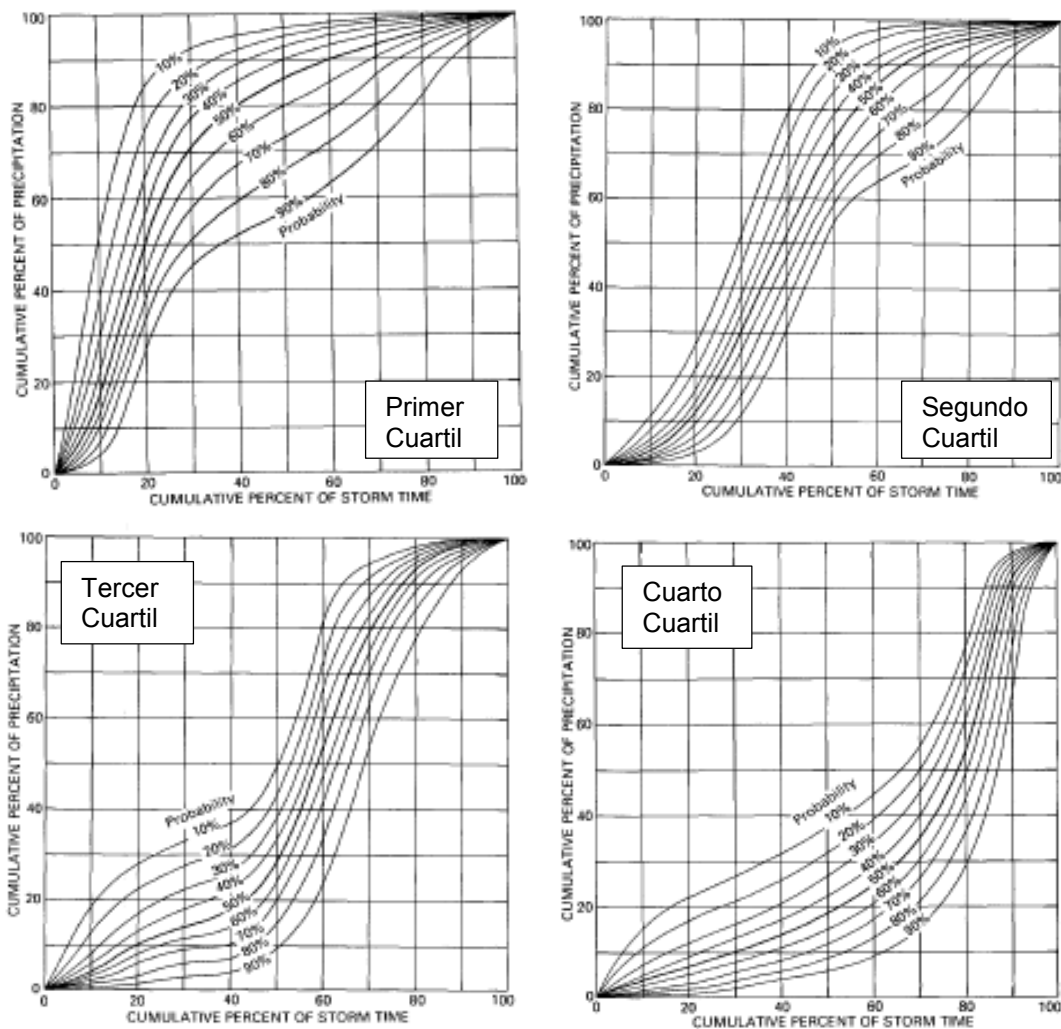


Figura 2. 16 Modelos estadísticos para tiempos de distribución para cada tipo de tormenta según el cuartil, en áreas de 129,5 a 1036 km² (Huff, 1990).

Estadísticamente las curvas correspondientes al primer y segundo cuartil son más suaves y corresponden a tormentas de corta duración y de ocurrencia más frecuente, mientras que las tormentas más largas y fuertes dominan el cuarto cuartil, siendo menos frecuentes. Tormentas del cuarto cuartil ocurren con duraciones mayores a 24 horas, las de primer y segundo cuartil tienen duraciones de menos de 12 horas y las del tercer cuartil tienen duraciones entre 12,1 y 24 horas (Huff, 1990).

Las curvas de distribución para precipitaciones puntuales, es decir, las que ocurren en cuencas de área menor a 12,95 km² se obtuvieron de promediar las relaciones puntuales del estudio realizado en el centro de Illinois (Huff, 1990) y las obtenidas por el estudio realizado en Chicago por Huff & Vogel (1976). Los modelos muestran probabilidades de ocurrencia acumuladas con incrementos de 10% en la duración de la tormenta, desde 10 hasta 90%, cada uno ilustra el porcentaje de la lluvia total para dichos incrementos.

El modelo del 50% representa un patrón de lluvia acumulada que debe ser excedido por la mitad de las tormentas. Estas curvas proveen una medida de la variabilidad interna de la tormenta.

2.3.11. Número de curva

El método del número de curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés), es usado para transformar la precipitación total a precipitación efectiva en función de la lluvia acumulada, la cobertura de suelo, el uso de suelo y las condiciones de humedad.

Se trata de un número adimensional que puede tener valores entre uno y cien dependiendo del escurrimiento o la infiltración, por lo tanto, el uno indica que la totalidad de la lluvia se infiltró, mientras el cien indica que toda la lluvia escurrió. La ecuación del número de curva se escribe en función de S que es el máximo potencial de retención (NRCS, 2004):

$$CN = \frac{1000}{10 + S}$$

Ecuación 3

Donde:

CN = número de curva

S = máximo potencial de retención en pulgadas.

El máximo potencial de retención (S) es un parámetro que relaciona la precipitación (P), la escorrentía (Q) y un valor de abstracción inicial (I_a), datos medidos en pulgadas:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P > I_a$$
$$Q = 0 \quad P \leq I_a$$

Ecuación 4

La abstracción inicial (I_a) se refiere a la retención de agua en el suelo o infiltración que ocurre durante el inicio de una tormenta. Para asociar la variabilidad de infiltración que presenta un suelo se asocia el parámetro de condición de humedad antecedente (AMC) que representa dicha variabilidad (Rallison & Miller, 1982), además de parámetros como el uso de suelo, cobertura vegetal. Los parámetros necesarios para desarrollar el método se describen a continuación.

Condiciones de Humedad Antecedente

Es la humedad del suelo antes del inicio de una tormenta. Para usar el método del número de curva se aplican las condiciones normales de humedad de suelos (Condición II en la Tabla 2.3). Para las otras dos condiciones se establecen relaciones para facilitar el uso del método. En la condición I el suelo se considera seco, pero no ha llegado al punto de marchitamiento, la condición II indica humedad normal y está asociado a crecidas anuales o promedio, y la condición III, asociada a crecidas máximas o caudales grandes, indica un suelo muy húmedo y casi saturado. Se clasifica en función de la precipitación acumulada.

Tabla 2. 3 Clasificación de la Condición de Humedad Antecedente (Chow, 1964).

Condición de Humedad Antecedente	Precipitación acumulada de 5 días (mm)	
	Estación inactiva (seca)	Estación activa
I Condiciones secas	< 12,7	< 35,6
II Condiciones normales	12,7-27,9	35,6-53.3
III Condiciones húmedas	> 27,9	> 53.3

Grupos hidrológicos de suelo

Es un conjunto de suelos de comportamiento similar frente a la precipitación y a la escorrentía. Para este método se clasifica el suelo en cuatro tipos, A, B, C y D, en función del potencial de escurrimiento, el nivel de profundidad y la textura. El grupo A son suelos profundos, de texturas gruesas con bajo potencial de escurrimiento; el grupo B consiste en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje, moderada capacidad de infiltración y texturas finas a moderadamente gruesas; el grupo C tiene escasa capacidad de infiltración, de textura moderadamente fina a fina; y el grupo D consiste en suelos muy arcillosos y muy baja capacidad de infiltración (SSDS – USDA, 2017) (Tabla 2.4).

Tabla 2. 4 Características resumidas de los grupos hidrológicos de suelo (SSDS - USDA, 2017).

Grupo	Clase textural	Tasa de Infiltración (mm/hora)	Prof. Efectiva del suelo cm/denominación	Drenaje de los suelos	Mov. Del agua en el suelo
A	Arenoso	12	160	Muy exc. drenados	Muy rápido
	Arenoso Franco	11	145	Excesivamente drenados	
	Franco Arenoso	10	130	Algo exc. drenados	Rápido

B	Franco	9	115	Profundos		
	Franco Limoso	8	100	Mod. Profundos	Mod. Bien drenados	Moderado
	Limoso	7	85		Bien drenados	Óptimo
C	Franco Arcillo Arenoso	6	70	Superficial	Mod. drenados	Moderado
	Franco Arcillo Limoso	5	55		Imperfect. drenados	Lento
	Arcillo Arenoso	4	40	Muy superficial		
D	Arcillo Limoso	3	25	Ext. Superficial	Escasamente drenados	Muy lento
	Arcilloso	2	10		Muy esc. drenados	
			1	0		

Cobertura vegetal y uso actual de suelo.

La cobertura vegetal puede ser definida como “la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos” (Martínez *et al.*, 2006). Además, cumple funciones de gran importancia como la captación y almacenamiento de energía, refugio de la fauna, agente antierosivo del suelo, medio regulador del clima local, fuente de materia prima. El uso del suelo se refiere a los productos o beneficios que se obtienen en función de las actividades e intervenciones que las personas realizan. Se denomina uso actual a las acciones que se dan en el presente, mientras, uso potencial es el uso que se le podría dar al suelo para no perjudicar su uso sustentable dependiendo de sus características naturales.

2.3.12. Hidrograma

Se define como la expresión gráfica de la variación del caudal en un lugar dado de la corriente, llamada sección de control o de aforo, en función del tiempo, lo cual ocurre debido a las características topográficas, fisiográficas y climatológicas que tiene una cuenca. El hidrograma típico de una tormenta aislada consta de un segmento ascendente, un segmento de cresta o pico (que se origina por la actividad de una tormenta) y un segmento descendente o de recesión.

El área bajo la curva del hidrograma representa el volumen de agua que ha pasado por un punto de la cuenca en un intervalo de tiempo (Chow *et al.*, 1994)

En un hidrograma anual (caudal vs. Tiempo en un año) el volumen total del flujo indica la capacidad total de la cuenca. En un río con flujo continuo o perenne la mayor parte de la capacidad de la cuenca proviene del flujo base o no muestra importantes variaciones en la curva del hidrograma. Por el contrario, si el río es efímero, es decir con largos períodos de sequía, la mayor parte de la lluvia se convierte en escorrentía directa y la infiltración es nula o muy baja por lo que la capacidad de la cuenca proviene de la escorrentía directa en tormentas grandes y el hidrograma muestra picos de escorrentía directa.

La Figura 2.19 muestra un hidrograma con sus partes, en el cual t_o es tiempo de inicio de un escurrimiento directo, t_p es el tiempo entre el inicio del escurrimiento directo y el caudal máximo o pico y t_b es el tiempo base y es el lapso durante el cual ocurre el escurrimiento directo.

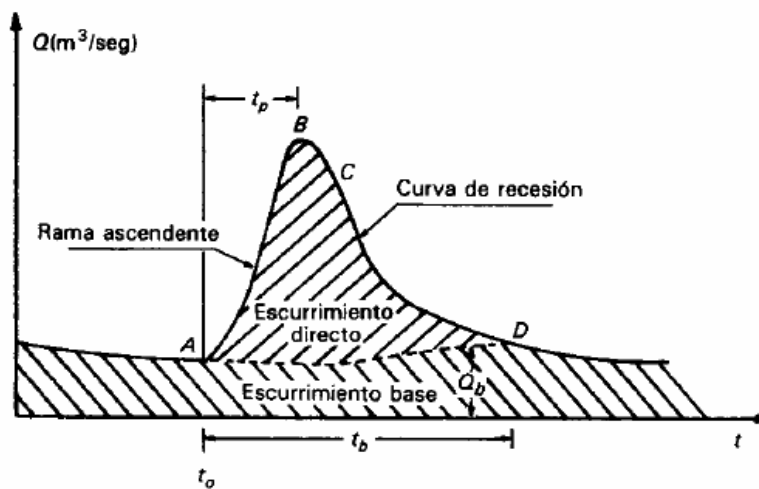


Figura 2. 17 Partes de un hidrograma

2.3.13. Programa HEC-HMS

Llamado así por sus siglas en inglés, *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*, surge como una actualización y mejora de programa HEC-1. Es un modelo de acceso libre y gratuito desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE. UU. Ha sido diseñado para simular procesos y respuestas hidrológicas que ocurren en una cuenca y que incluyen análisis de precipitación, infiltración, evapotranspiración, derretimiento de nieve, humedad del suelo, entre otros.

Cabe destacar que este programa tiene la posibilidad de relacionarse con el sistema de información geográfica ArcGis, lo que facilita labores de procesamiento de datos (U. S. Army Corps of Engineers, 2000). Algunos de los procesos que identifica el programa son:

- Pérdida de cantidad de precipitación: la parte de la lluvia que será retenida por la existencia de vegetación (*Canopy*), la parte de la lluvia que se queda infiltrada en la superficie del suelo (*Surface storage*), la parte de la lluvia que se infiltra (*Loss*), siendo este último el de uso común.
- Cálculo de la escorrentía directa (*Transform*): identifica la cantidad de lluvia que directamente pasa de ser precipitación a ser escorrentía tomando en cuenta los procesos de pérdida anteriormente descritos.
- Cálculo de la escorrentía indirecta (*Baseflow*): identifica la cantidad de agua que aporta un caudal base constante en un río o quebrada.
- Evolución de flujo a través de un cauce (*Routing*): considera cómo afecta al flujo de agua o escorrentía el atravesar por un cauce de condiciones específicas.

La información se debe ingresar en los diferentes componentes que el programa posee.

- Modelo de Cuenca: en este componente se establecen los elementos de la cuenca, que pueden ser *Sub-basin* (permite ingresar las condiciones generales de comportamiento de la cuenca), *Reach* (representación del tránsito de un caudal a través de un cauce), *Synk* (representa el punto de cierre de la cuenca). El modelo de la cuenca es una representación de su funcionamiento por lo que cada uno de los elementos debe estar conectado a otro o al punto de cierre, esto se realiza mediante la opción *Downstream* que representa la unión de cada elemento desde la parte alta de la cuenca hasta el punto de cierre.
- Modelo meteorológico: permite ingresar a la simulación la información de precipitación, comúnmente correspondiente a datos de pluviómetros o estaciones meteorológicas.
- Especificaciones de control: sirve para establecer los límites de la simulación (fecha y hora de inicio y fin del evento).
- Ejecución y resultados: en caso de haber errores en los datos la simulación se detendrá indicando el error existente, si los datos fueron ingresados correctamente el programa muestra resultados para cada uno de los elementos lo que permite visualizar la influencia de cada uno en los resultados finales. Los resultados son gráficos (hidrograma) tablas de datos (volúmenes de pérdida, acumulación, entre otros) y cuadros de resumen con la información generada.

2.3.14. Lahar-Z

Lahar Z es un programa libre diseñado por *United States Geological Survey* para modelar lahares y delimitar, mediante ecuaciones empíricas, áreas de posibles inundaciones por lahares. Lahar Z funciona como un módulo de ArcGis de versiones 10.0 o superiores. Para usar el programa es necesario contar con un DEM del área de estudio con tamaño de celda apropiado, ya que un tamaño de celda muy alto dará resultados con menor precisión (Schilling, 2014). Las herramientas son usadas son:

- *Create Surface Hydrology Rasters*: crea un ráster de la red de drenaje, la dirección del flujo y la acumulación del flujo, identificando las celdas que tienen valores mayores o iguales al valor umbral que ha sido establecido manualmente. Además, mientras corre, esta herramienta puede identificar y eliminar “sumideros” (píxeles sin información) mejorando la calidad del DEM y creando un nuevo DEM mejorado el cual se deberá usar por las otras herramientas.
- *Generate New Stream Network*: esta herramienta permite crear un nuevo ráster de red de drenaje, con un valor umbral diferente al anterior.
- *Hazard Zone Proximal*: crea un archivo de capa vectorial que muestra la extensión de la zona de peligro proximal, intersecando un cono de energía con la topografía. Además, crea una capa vectorial de puntos que representan los lugares donde el cono H/L se interseca con la red de drenaje creada.
- *Lahar Distal Zones*: calcula áreas de potencial inundación para cada drenaje en función de volumen de material (agua y escombros) cuyos datos deben estar en un archivo de extensión “txt”. El archivo debe contener entre uno y siete valores separados por coma y en una sola línea para que pueda ser leído por el programa. Esta herramienta tiene opciones del tipo de flujo que incluye lahar, flujo de escombros y avalancha de rocas.
- *Lahar Distal Zones with Conf Levels*: crea una capa ráster con las potenciales áreas de inundación en función de un volumen dado mostrando un rango de posibles resultados basados en un nivel de confianza dado por el usuario. En este caso se ingresa un archivo de texto que contiene un solo valor de volumen, otro archivo que contenga los datos de localización que indiquen donde comenzará la simulación.
- *Merge Rasters by Volume*: combina las áreas de diferentes drenajes que contienen el mismo volumen.
- *Raster to Shapefile*: se usa para convertir el ráster en una capa vectorial de polígonos (*shapefile*).

3. CAPITULO III: ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para generar los modelos de flujos de lodo secundarios en las quebradas Seca y Las Flores se realizó trabajo de campo y trabajo de gabinete. Durante el trabajo de campo se recorrieron las quebradas para realizar el levantamiento geológico y así obtener una descripción estratigráfica y litológica de la zona de estudio. Además, se tomaron datos técnicos como mediciones del ancho del cauce, mediciones del caudal y mediciones de depósitos de material suelto, con lo cual se pudo obtener una caracterización de los depósitos de material sólido, datos que permitieron cuantificar el componente sólido del flujo de lodo. Debido a la presencia de canteras en la quebrada Las Flores, se decidió usar un DRON, del Laboratorio de Investigación de Sistemas no Tripulados de la EPN, para tomar imágenes de alta resolución del área, las cuales fueron procesadas con Pix4D, esto con el fin de obtener valores de volumen de sólidos con mayor precisión.

Para calcular ciertas características de las cuencas y sus drenajes (pendiente, área y longitud) se procesó un DEM de 3 m de resolución, obtenido a través de la GAD San Miguel de Ibarra, con el programa ArcGis, versión 10.2.2. El cálculo del volumen hídrico se realizó mediante análisis hidrológico y pluviométrico de las subcuencas de las quebradas. Para esto se recopiló información que posteriormente fue procesada con el programa libre HEC-HMS. Para modelar los flujos de lodo se usaron las herramientas del módulo Lahar Z, que se adapta a versiones de ArcGis 10.0 o superiores.

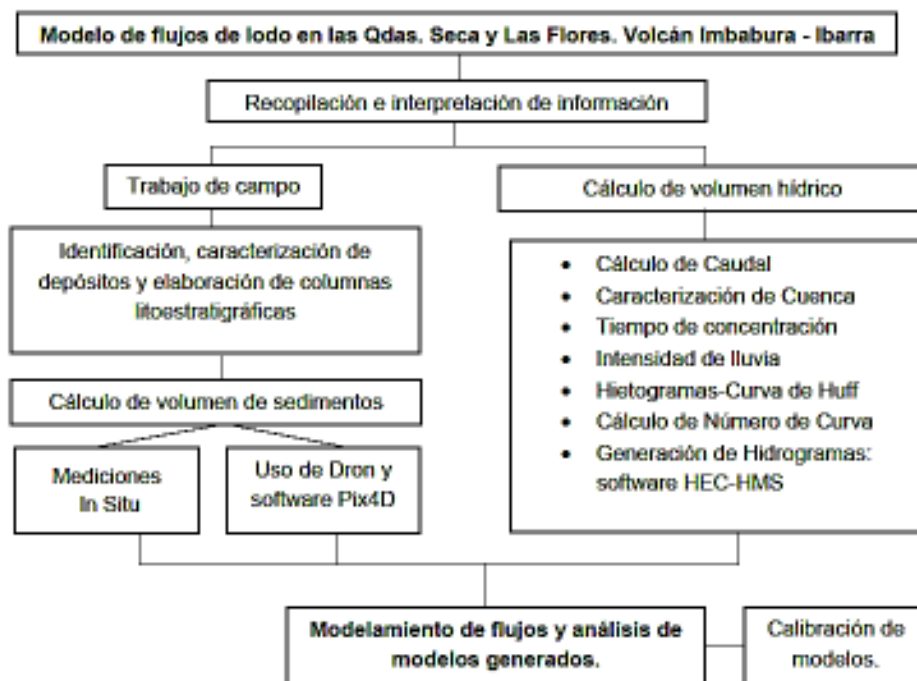


Figura 3. 1 Esquema metodológico del estudio.

3.1. Descripción litológica y estratigráfica

El levantamiento geológico, necesario para realizar el reconocimiento de las principales unidades litológicas dentro del área de estudio, se realizó a partir del análisis de la información geológica recopilada, así como del trabajo de campo que incluye varios recorridos por los lechos de las quebradas. Se describieron las unidades litológicas identificando el tipo de roca, tamaño de los clastos, variación del tamaño de los clastos (granocreciente o granodecreciente y el sorteo que puede ser bueno, regular o malo), forma de los clastos, tipo de matriz, relación de la matriz con los clastos (clastosoportado o matrizsoportado), los espesores de cada capa y su variación en las quebradas (Figura 3.2).

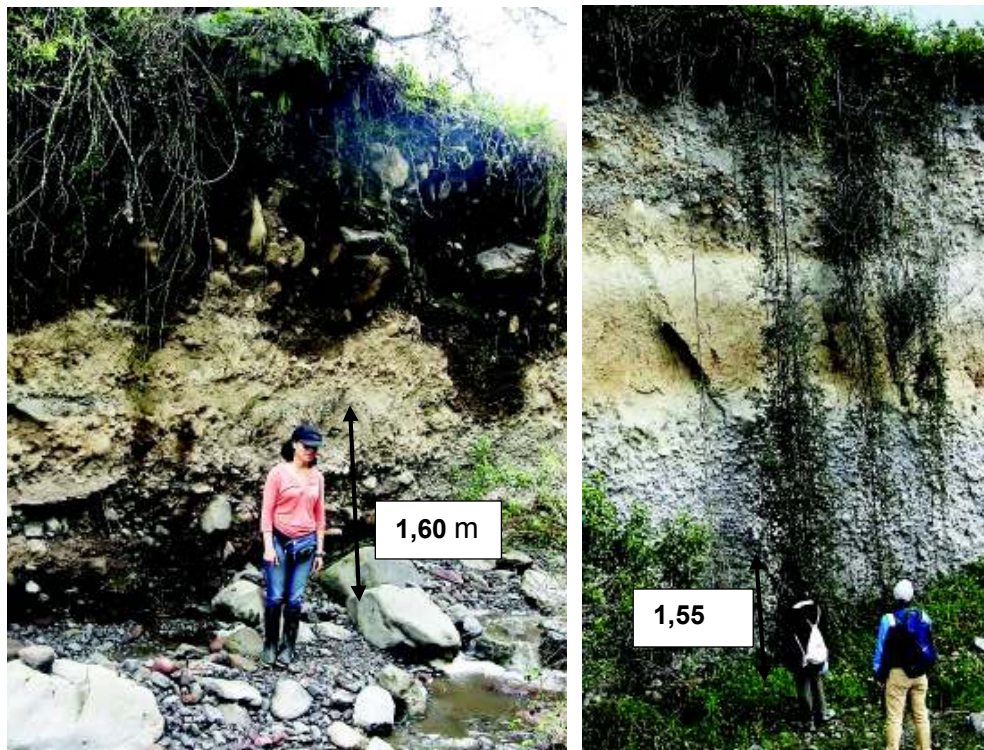


Figura 3. 2 Afloramientos en la zona de estudio. Izq. Quebrada Seca. Der. Quebrada Las Flores

3.2. Caracterización de depósitos

El material suelto que puede ser aportado a los flujos de lodo se calculó en base a datos y mediciones tomadas en campo y, de forma indirecta, a través de mediciones realizadas con el Programa Pix4D, posterior al procesamiento de fotografías levantadas con DRON.

Durante el trabajo de campo también se caracterizaron los depósitos según el material del que están formados, el nivel de compactación y la antigüedad relativa en función de la vegetación que puede haber en ellos.

En campo se realizaron mediciones con el uso de flexómetros y brújulas, del ancho, largo y espesor de los depósitos, para posteriormente realizar los cálculos correspondientes usando fórmulas de volúmenes de cuerpos geométricos con formas similares a los depósitos encontrados.

La forma mas característica de los depósitos corresponde a un cono cortado en dos partes por un plano vertical. Por esto la fórmula usada fue la siguiente:

$$V = \frac{\pi r^2 h}{3} \quad r = \frac{a + \left(\frac{b}{2}\right)}{2}$$

Ecuación 5

Donde

V=volumen del depósito (m³)

r= radio promedio del depósito (m)

a=ancho (m)

b=largo (m)

h=altura del depósito (m)



Figura 3. 3 Mediciones en campo de los depósitos de material suelto. Izq. Quebrada Seca Der. Quebrada de Las Flores. Los depósitos tienen forma similar a un cono.

3.2.1. Uso de DRON y Programa Pix4D

En la quebrada Las Flores, por la presencia de canteras, se realizaron mediciones de forma indirecta a través de levantamiento de ortofotos con DRON debido a que los depósitos son de mayor tamaño y por la poca accesibilidad a los sitios de canteras.

Se realizaron tres sobrevuelos con un DRON perteneciente al Laboratorio de Investigación de Sistemas Aéreos No Tripulados de la EPN, sobre tres tramos de la

quebrada Las Flores con la finalidad de obtener fotografías de alta resolución para su posterior procesamiento (Figura 3.4)

El DRON debe volar en alturas mayores a 30 m sobre el nivel del suelo, mientras la cámara toma fotografías de alta resolución a una velocidad de tres imágenes por segundo, con un solapamiento mayor al 80% entre ellas, lo cual es de vital importancia para poder realizar el procesamiento con el programa Pix4D Mapper. Con ayuda de este programa se obtiene un modelo digital de terreno y una ortofoto de alta resolución de cada tramo sobrevolado.



Figura 3. 4 Sobrevuelos realizados con dron en la Qda. Las Flores. Izq. Equipo sobre el suelo. Der. Vuelo del Dron en alturas mayores a 30 m sobre el suelo.

Pix4D Mapper es un programa que encuentra automáticamente cientos de puntos en común entre las imágenes, cada uno de estos puntos se llama *keypoint*, cuando se encuentran puntos en dos imágenes diferentes y continuas se denominan *matched keypoints*. El programa tiene la capacidad de integrar las fotografías tomadas para crear ortomosaicos que pueden o no estar georeferenciados, modelos del terreno en tres dimensiones y nubes de puntos. Además, es posible realizar mediciones de longitudes, áreas y volúmenes; se puede editar y evaluar los datos usando el editor de mosaicos y RayCloud y otra ventaja de su uso es que los archivos son fácilmente exportables a ArcGis.

A partir de las imágenes procesadas obtenemos tres ortofotos y modelos digitales de terreno con los cuales fue posible medir el ancho de cauce, con la opción *Polyline*, y los volúmenes de los depósitos de material suelto se midieron con la opción *Volumes* del menú *View* de la barra de menús. Para esto, se marcan puntos o vértices alrededor de los depósitos, los cuales delimitan el objeto del cual se quiere conocer el volumen. A mayor densidad de puntos, mayor será la precisión del cálculo. El programa se encarga de proyectar los puntos marcados hacia una base generando un

objeto tridimensional, para esto existen diferentes opciones de proyección en función de la profundidad a la que el punto creado será proyectado, en este caso se trabajó con la opción “Alinear con el punto más bajo”. Estos polígonos pueden ser posteriormente exportados a formato de capa vectorial.

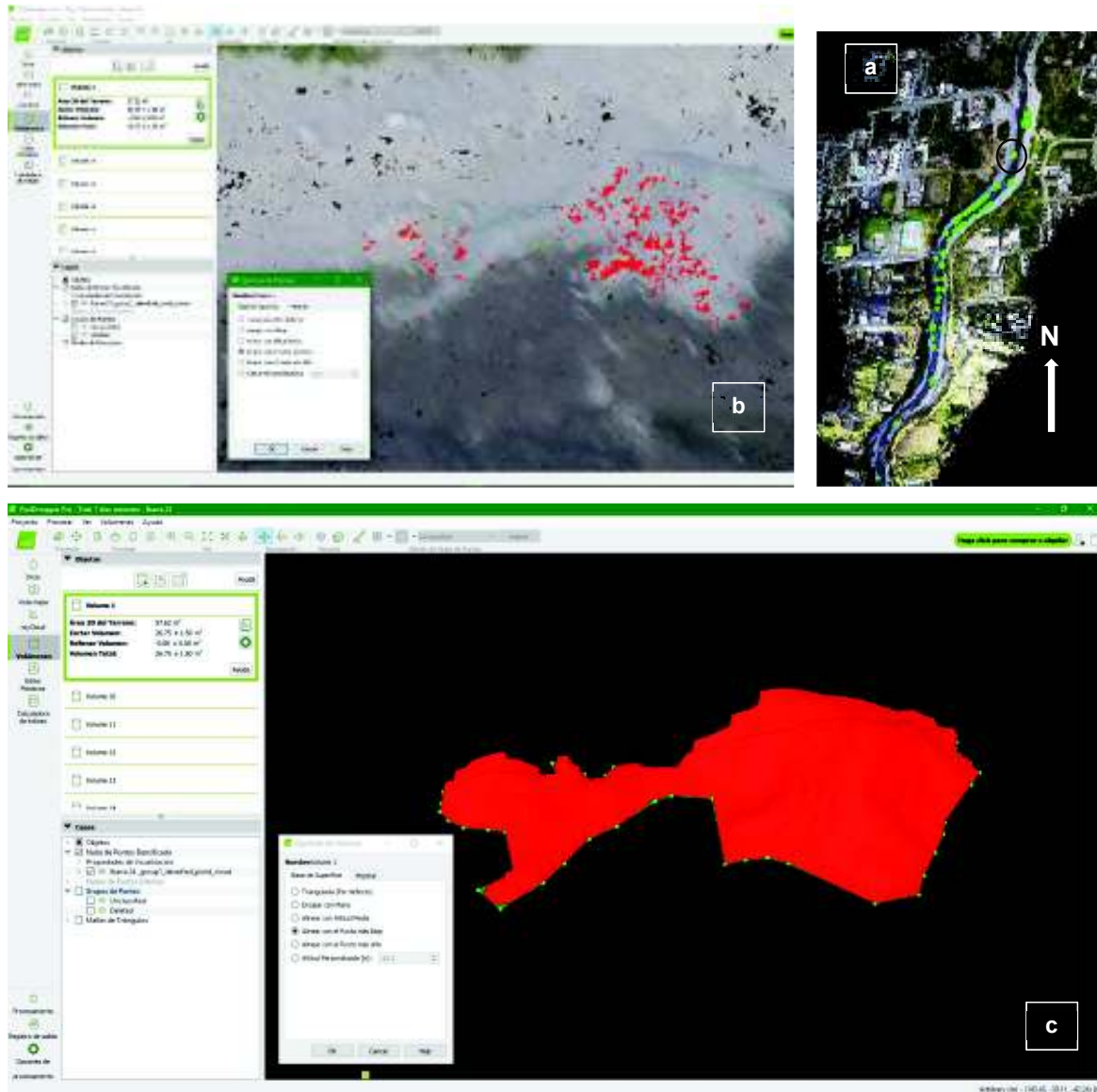


Figura 3. 5 Ejemplo de cálculo de volumen de un depósito de material suelto en el cauce la quebrada Las Flores, con Pix4D Mapper.

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo del cálculo de volumen de un depósito de material suelto de tamaño de arena fina o limo con baja cantidad de clastos centimétricos, localizado en el tercer tramo de la quebrada. La imagen a) muestra la localización del depósito en el cauce de la quebrada Las Flores, b) es un acercamiento al depósito y el menú de opciones para realizar el cálculo del volumen en la parte izquierda de la pantalla, en este caso la opción “Alinear con el punto más bajo” está seleccionada.

En esta imagen se encuentran activadas las capas “Volumen” (que aparecen como manchas rojas sobre el depósito) y “Grupos de Puntos” (que corresponden al modelo del terreno). La imagen **c**) muestra un objeto tridimensional (rojo) que representa el depósito de material limitado por los vértices (puntos de color verde) y que tiene como base el punto o vértice de menor altura. Se observa en la parte superior izquierda el resultado del proceso que incluye el área del sector delimitado, un valor de volumen de relleno, será volumen negativo cuando el objeto se crea por debajo del nivel del suelo (Figura 2.4), el volumen total calculado y un error de cálculo, en este caso la opción “Grupos de puntos” ha sido desactivada.

3.3. Caracterización de las cuencas hidrográficas

La presencia de canteras en la quebrada las Flores modifica su dinámica hidrológica por lo que es necesario dividir la esta cuenca en una subcuenca alta, limitada por el inicio de las canteras, y una subcuenca baja que va desde el inicio de las canteras hasta un el punto cercano a la unión con la quebrada Seca.

3.3.1. Cálculo de caudal base

Para calcular el caudal aproximado de cada subcuenca se utilizó en campo un método práctico. Usando un elemento flotador (como una hoja) el cual se pone sobre el cauce para medir el desplazamiento de este por unidad de tiempo. Se usa la fórmula descrita a continuación.

$$Q = L * H * V$$

Ecuación 6

Donde

Q = Caudal

L = Ancho del cauce

H = Profundidad del cauce

V = Velocidad del agua

3.3.2. Delimitación de las cuencas hidrográficas

Para delimitar las cuencas de las quebradas Seca y Las Flores se usó ArcGis versión 10.2.2. A partir del modelo de elevación digital de resolución 3 m y utilizando las herramientas del submenú *Hydrology* de la opción *Spatial Analyst Tools*. Estas opciones permiten corregir el DEM para posteriormente realizar los cálculos de las pendientes del terreno, establecer la dirección que puede tomar el flujo en función de

los valores de las celdas, crear las líneas que representan los cauces de las quebradas y finalmente, delimitar las cuencas (Tabla 3.1).

Tabla 3. 1 Descripción de las herramientas usadas para corregir y procesar el DEM.

ArcGis 10.2.2: Spatial Analyst Tools		
Herramienta	Descripción	
<p><i>Hydrology:</i></p> <p><i>Fill</i></p>	<p>Identifica y corrige las imperfecciones de altura de cada celda.</p> <p>Celdas de menor altura o píxeles vacíos (sumideros) son rellenadas y las de mayor altura (picos) serán limitadas.</p>	
<p><i>Hydrology:</i></p> <p><i>Flow Direction</i></p>	<p>Establece las pendientes del terreno y crea un ráster con celdas que indican la dirección más empinada del flujo desde esa celda. La dirección de flujo para una celda es la dirección en la que el agua fluirá fuera de esa celda.</p>	
<p><i>Hydrology:</i></p> <p><i>Flow Accumulation</i></p>	<p>Crea un ráster en el cual cada celda tiene asignado un valor según el número de celdas que fluyen hacia ella, y genera la red de drenaje más probable.</p>	
<p><i>Conditional:</i></p> <p><i>Con</i></p>	<p>Para crear la red de drenaje se usa esta herramienta que evalúa cada celda del ráster creado con <i>Flow Accumulation</i> en función de</p>	

	un valor condicional establecido por el usuario. El resultado es un ráster de las líneas de drenaje. Se obtiene una capa vectorial de la red hídrica usando la herramienta <i>Stream to Feature</i> .
<i>Hydrology:</i> <i>Watersheed</i>	Determina el área de contribución hídrica por sobre un conjunto de celdas de un ráster, en este caso el generado con <i>Flow Direction</i> . La herramienta genera un ráster de la cuenca hidrográfica tomando en consideración el punto de cierre de la cuenca que se ingresa en formato de capa vectorial. Para obtener la capa vectorial de la cuenca hidrográfica se utiliza la herramienta <i>From Raster, Raster to Polygon</i> , del menú <i>Conversion Tools</i> .

Se establecen los puntos de cierre de cada cuenca (y subcuencas). El punto de cierre de la subcuenca alta de la quebrada Las Flores se estableció al inicio de la cantera Punto Azul 1. Los puntos de cierre de la quebrada Seca y de la subcuenca baja de la quebrada las Flores se ubicaron en lugares cercanos a la unión de ambas quebradas, hacia el este del parque Ciudad Blanca (Tabla 3.2).

Tabla 3. 2 Ubicación de los puntos de cierre en cada quebrada (Coordenadas UTM).

QUEBRADA		PUNTO DE CIERRE (UTM)		
		X	Y	Z
SECA		818867	10036932	2220
LAS FLORES	SUBCUENCA BAJA	818577	10036932	2226
	SUBCUENCA ALTA	818469	10031608	2744

3.3.3. Cálculo de la longitud y pendiente del cauce principal

La longitud del cauce principal se determina a partir de la capa vectorial de la red hídrica creada anteriormente a partir del DEM de 3 m de resolución, para esto en la tabla de atributos se debe agregar una columna de nombre “Longitud” y se usa la opción *Calculate Geometry* para establecer el valor.

La pendiente media del cauce es igual a la diferencia entre las cotas máxima y mínima, dividida para la longitud del cauce. Se establece con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L}$$

Ecuación 7

Donde:

S = Pendiente media

Hmáx = Valor de la cota máxima

Hmín = Valor de la cota mínima

L = Longitud del cauce principal

3.3.4. Cálculo del área de la cuenca hidrográfica

El área de cada cuenca se determina a partir de la capa vectorial de polígonos creada anteriormente, para esto en la tabla de atributos se debe agregar una columna de nombre "Área" y haciendo uso de la opción *Calculate Geometry* se puede determinar el valor (Figura 3. 6).

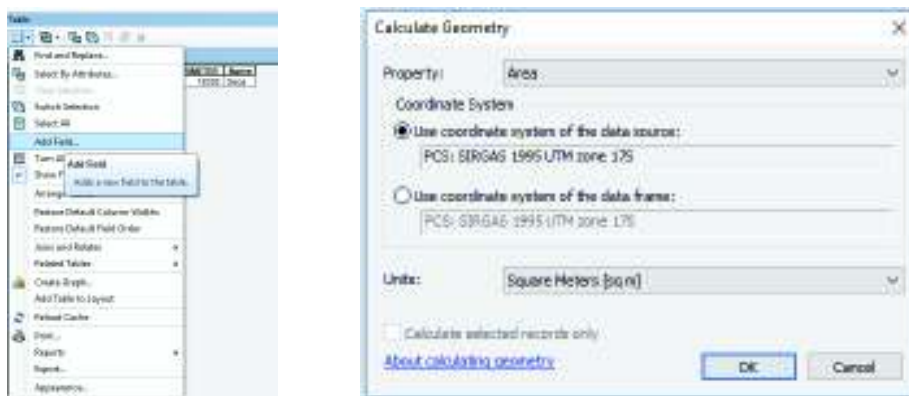


Figura 3. 6 Cálculo del área de la cuenca. Izq. Opciones de la Tabla de Atributos de la capa vectorial de la cuenca. Der. Herramienta *Calculate Geometry*.

3.4. Cálculo del volumen de agua

3.4.1. Tiempo de concentración y tiempo de retardo

El tiempo de concentración es calculado mediante la aplicación de ecuaciones empíricas que se han formulado en base a observaciones y experimentos en zonas establecidas y que han sido adaptadas a diferentes escenarios. Existen varias metodologías para determinar el tiempo de concentración de una cuenca con base en sus características morfométricas, que incluyen el área de la cuenca, la longitud del cauce principal y la pendiente media del cauce.

A continuación, se detallan algunos métodos con sus respectivas fórmulas, que pudieron ser usadas en este estudio. Si los tiempos de concentración son similares con los diferentes métodos se usará un valor promedio para los cálculos futuros, caso contrario se usará el valor del método que se adapte mejor a la zona de estudio (Almeida, 2014).

- **Método de Clark**

Desarrollado por la USGS, en base a los estudios de Clark (1946), se usa para cuencas rurales con áreas entre 5,18 km² y 59,57 km². El tiempo de concentración en este método se define como el tiempo de viaje requerido para la última gota de precipitación efectiva a nivel del punto hidráulicamente más distante de la cuenca para alcanzar el canal.

Se recomienda usar este método para cuencas con área menor a 12,95 km², que no contengan humedales o laderas muy planas. La fórmula es la siguiente:

$$T_c = 0,335 * \left[\frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,593}$$

Ecuación 8

Dónde:

T_c= tiempo de concentración (horas)

A= área de la cuenca (Km²)

S= pendiente promedio del cauce principal (m/m)

- **Método de Témez**

Se trata de una modificación del método racional desarrollado por Témez (1978) para la Dirección General de Carreteras, después de experimentar para varias cuencas aforadas. Este método se ve limitado por el tiempo de concentración (entre 0,25 y 24 horas) y la superficie de la cuenca de estudio (entre 1 y 3000 km²). La fórmula es:

$$T_c = 0,3 * \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$$

Ecuación 9

Dónde:

T_c= tiempo de concentración (horas)

L= longitud del canal principal (Km)

S= pendiente promedio del canal principal (m/m)

- **Método de Pilgrim y Mcdermott**

Realizaron análisis el área oeste de New South Gales para espacios áridos y en el este de la misma ciudad para pequeñas captaciones de tipo rural, en total 96 cuencas cubriendo un área aproximada de 400000 Km² (Pilgrim, 1989). Se recomienda este método para áreas menores a 250 km². La ecuación es la siguiente:

$$T_c = 0,76 * A^{0,38}$$

Ecuación 10

Dónde:

Tc= tiempo de concentración (horas)

A= área de la cuenca de drenaje (Km²)

- **Método Giandotti**

Es comúnmente usada en Europa, principalmente en Italia. Giandotti (1934), (Citado en Kaufmann *et al.*, 2015) recomienda su uso para cuencas en áreas rurales montañosas con áreas entre 170 y 70000 km². La fórmula es la siguiente:

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{25,3 * \sqrt{S * L}}$$

Ecuación 11

Dónde:

Tc= tiempo de concentración (horas)

L= longitud del cauce (Km)

A= área de la cuenca de drenaje (Km²)

- **Método de Passini**

Passini (Citado en Kaufmann *et al.*, 2015) recomienda que este método sea usado para cuencas con pendiente poco pronunciada. La fórmula es:

$$T_c = 0,108 * A^{0,33} * L^{0,33} * S^{-0,5}$$

Ecuación 12

Dónde:

Tc= tiempo de concentración (horas)

L= longitud del cauce (Km)

A= área de la cuenca de drenaje (Km²)

S=pendiente promedio del cauce principal (m/m)

- **Método de Kirpich**

Este método se desarrolló para pequeñas áreas agrícolas localizadas en granjas de Tennessee, caracterizadas por sus pendientes pronunciadas (3-10%) y presencia de canales de drenaje, de entre 5,05 km² y 45,0 km², aunque se recomienda su aplicación solo para áreas menores a 10,0 km² (Kirpich, 1940). La fórmula es:

$$T_c = 3,9 * \left[\frac{L}{S^{0,5}}\right]^{0,77}$$

Ecuación 13

Dónde:

T_c= tiempo de concentración (minutos)

L= longitud del canal principal (Km)

S= pendiente promedio del canal principal (m/m)

Siendo este último, el método de Kirpich, el más utilizado a nivel nacional en análisis hidrológicos.

El tiempo de retardo (T_r) se calcula en función del tiempo de concentración (T_c) usando la siguiente fórmula:

$$T_r = 0,6 T_c$$

Ecuación 14

3.4.2. Cálculo de intensidades

Para realizar el cálculo de intensidades se aplican las fórmulas descritas en el Estudio de Intensidades realizado por el INAMHI (2015), tomando como duración al tiempo de concentración. Se divide ese tiempo en intervalos de cinco minutos cada uno, por lo que se usarán las ecuaciones cin15.b y 15.c descritas en la Tabla 3.3, ya que en las cuencas el tiempo de concentración es menor a 120 minutos. Como valor de frecuencia se toma al período de retorno en años (5, 10, 25, 50 y 100 años).

Tabla 3. 3 Ecuaciones para el cálculo de intensidades (INAMHI, 2015). Ecuación 15 (a, b y c)

ESTACIÓN IBARRA-AEROPUERTO-M0053	
Intervalo de tiempo (min)	Ecuaciones
5 – 30	$i = 163,981 * T^{0,1746} * t^{-0,5490}$ Ecuación 15.a
30 - 120	$i = 235,822 * T^{0,1642} * t^{-0,6361}$ Ecuación 15.b
120 – 1440	$i = 629,210 * T^{0,2196} * t^{-0,8701}$ Ecuación 15.c

3.4.3. Hietogramas: Curvas de Huff

Se calcula la precipitación, para cada período de retorno, multiplicando el valor de la intensidad por el tiempo de concentración, en horas, siguiendo la siguiente ecuación:

$$P_m = I * T_c$$

Ecuación 16

Donde:

P_m = precipitación (mm)

I = intensidad (mm/horas)

T_c = tiempo de concentración (horas)

El valor de precipitación debe ser discretizado haciendo uso de las tablas de distribución de precipitación de tormentas fuertes de Huff (1967). Para eso se usaron los datos que de la Tabla 3. 4.

Tabla 3. 4 Distribución de Tormentas Fuertes respecto a la mediana en áreas puntuales. Porcentaje acumulado de precipitación para un tipo de tormenta Modificado de Huff (1967).

% AC TIEMPO	PRIMER CUARTIL	SEGUNDO CUARTIL	TERCER CUARTIL	CUARTO CUARTIL
5	16	3	3	2
10	33	8	6	5
15	43	12	9	8
20	52	16	12	10
25	60	22	15	13
30	66	29	19	16
35	71	39	23	19
40	75	51	27	22
45	79	62	32	25
50	82	70	38	28
55	84	76	45	32
60	86	81	57	35
65	88	85	70	39
70	90	88	79	45
75	92	91	85	51
80	94	93	89	59
85	96	95	92	72
90	97	97	95	84
95	98	98	97	92

3.4.4. Cálculo del número de curva (CN)

Se calculó el número de curva con el programa ArcGis versión 10.2.2 y las herramientas Hec-GeoRAS desarrolladas por el Cuerpo del Ejército de los Estados

Unidos. Los elementos requeridos para realizar el cálculo son: el modelo digital de elevación, de resolución 3 m, obtenido del GAD San Miguel de Ibarra; las capas vectoriales de uso de suelo y de cobertura vegetal que incluye el grupo hidrológico de suelo, y la tabla de base de datos de valores de CN que han sido establecidos por el SSS – USDA, a partir de la clasificación del suelo.

Definición del grupo hidrológico de suelo.

A partir de las capas vectoriales de tipo de suelo se clasifica y define el grupo hidrológico de suelo. En la tabla de atributos se encuentra información como: tipo de suelo (orden, suborden y gran grupo), pendiente, textura, drenaje, nivel freático, contenido de materia orgánica, toxicidad, permeabilidad, entre otras características que permitieron su clasificación.

Las más importantes para la determinación del grupo hidrológico de suelo son la textura, el drenaje y la pendiente debido a que estas permiten asumir la capacidad de infiltración que podría tener el suelo. El drenaje tiene valores entre 1 y 4, el 4 indica baja capacidad de infiltración. La pendiente tiene valores entre 1 y 6, el 6 indica valores altos de pendiente por lo tanto menor capacidad de infiltración, y la textura de los suelos se clasifica como gruesa, moderadamente gruesa, mediana, moderadamente fina y muy fina.

Al drenaje y a la pendiente se les da valores ponderados que se suman para obtener una clasificación (Tabla 3.5).

Tabla 3. 5 Ponderación de suelos en base a al drenaje y la pendiente.

	PENDIENTE					
DRENAJE	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
2	3	4	5	6	7	8
3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	10

Los valores ponderados tienen un rango del 1 al 10. Los suelos con valores altos indican baja capacidad de infiltración, los valores menores indican alta capacidad de infiltración. Estos valores se comparan con la textura y se le da una clasificación de tipo de suelo (Tabla 3.6).

Tabla 3. 6 Clasificación del suelo a partir de valores ponderados (pendiente más drenaje).

	VALORES PONDERADOS DE SUELOS: PENDIENTE – DRENAJE									
TEXTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gruesa	A	A	A	A	A	A	B	B	B	C
Mod. Gruesa	A	A	A	A	A	B	B	B	C	C
Mediana	A	A	B	B	B	C	C	C	C	D
Mod. Fina	A	B	B	C	C	C	C	D	D	D
Fina	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D

Codificación de los suelos en función de los grupos hidrológicos, el uso de suelo y la cobertura vegetal.

En el informe *Urban Hydrology or Small Watersheds-Technical Release 55* de la CED-USDA (1986) se presentan los procedimientos simplificados para calcular el número de curva en cuencas pequeñas. Además, el informe contiene tablas con valores de número de curva para diferentes condiciones como: áreas urbanas, tierras cultivadas o de agricultura, áreas áridas o semiáridas, en función de parámetros como el tipo de cobertura, el tratamiento del suelo, la condición hidrológica y el grupo hidrológico de suelo. Estas condiciones se resumen a continuación.

- Áreas urbanas desarrolladas y con vegetación, incluyen espacios abiertos (parques, cementerios, jardines, etc.), áreas impermeables (estacionamientos, techos, caminos, etc.), calles y carreteras, áreas desiertas natural o artificialmente, distritos urbanos y distritos residenciales.
Las áreas urbanas en desarrollo están siendo clasificadas y son áreas que no incluyen vegetación.
- Para establecer el número de curva en tierras de cultivos se toma en cuenta el tipo de cobertura (barbecho, cosechas, grano pequeño, primeras siembras o leguminosas o pastizales de rotación), el tratamiento del suelo que describe el manejo de la agricultura e incluye prácticas mecánicas (suelo, suelo con cubierta de residuos de cultivos, cultivos en filas, cultivos en contornos, cultivos en contornos y terrazados), la condición hidrológica que indica los efectos del tipo de cobertura y el tratamiento en los procesos de infiltración y escorrentía (es “pobre” cuando los factores debilitan la infiltración y favorecen la

escorrentía; y es “buena” cuando los factores aumentan la infiltración promedio y decrecen la escorrentía).

- Para otros tipos de tierras de cultivos como pastizales, pastos (y otros forrajes para pastoreo), prado usado para heno y protegido de pastoreo, arbustos mezclados con pasto, combinación de bosque y pasto (huertas) y bosques; se toma en cuenta el grupo hidrológico de suelo y la condición hidrológica que puede ser “pobre” cuando los árboles pequeños, arbustos y pastos son destruidos por el pastoreo o quema regular; “moderada” cuando el bosque es pastado pero no quemado y el suelo está cubierto por desperdicios forestales; y “buena” si los bosques están protegidos del pastoreo y los arbustos cubren adecuadamente el suelo.
- El cálculo para pastizales áridos a semiáridos depende del tipo de cobertura (herbácea que incluye pasto, hierba y arbustos; bosques de roble, aspen, maple, pinyon, enebro, plantas como la artemisa de la familia de las margaritas y plantas o arbustos del desierto como los cactus), el grupo hidrológico del suelo, y la condición hidrológica que puede ser “pobre” si tiene menos del 30% de cobertura, “moderada” si la cobertura es de 30 a 70% y “buena” cuando la cobertura supera el 70%.

Para este proyecto se establecieron códigos para los diferentes tipos de cobertura vegetal y uso de suelo, según el tipo de cultivo o vegetación, el tratamiento que se le ha dado y la condición hidrológica, llegando a clasificarse en 17 grupos (Tabla 3.7).

Tabla 3. 7 Clasificación de suelos (códigos) para el cálculo de número de curva.

COBERTURA VEGETAL-USO DE SUELO	TRATAMIENTO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	CÓDIGO
Afloramiento rocoso	No Aplica	No Aplica	1
Área erosionada	No Aplica	No Aplica	2
Área urbanizada	No Aplica	No Aplica	3
Bosque intervenido/Páramo	No Aplica	Moderada	4
Bosque intervenido/Vegetación arbustiva	No Aplica	Moderada	4
Bosque primario	No Aplica	Moderada	5
Cultivo de cereales	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de cereales/Área erosionada	Filas o hileras	Pobre	6
Cultivo de cereales/Área en fuerte proceso de erosión	Filas o hileras	Pobre	6
Cultivo de cereales/Área en proceso de erosión	Filas o hileras	Pobre	6

Cultivo de cereales/Cultivo de maíz	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de cereales/Frutales	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de cereales/vegetación arbustiva	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de maíz/Área erosionada	Filas o hileras	Pobre	6
Cultivo de maíz/Área en proceso de erosión	Filas o hileras	Pobre	6
Cultivo de maíz/Frutales	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de maíz/Pastos cultivados	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de maíz/Vegetación arbustiva	Filas o hileras	Bueno	7
Cultivo de ciclo corto/Área erosionada	Filas o hileras	Pobre	8
Cultivo de ciclo corto/Frutales	Filas o hileras	Bueno	9
Cultivo de ciclo corto/Páramo	Filas o hileras	Bueno	9
Cultivo de ciclo corto/Pastos cultivados	Filas o hileras	Bueno	9
Frutales/Cultivos de maíz	No Aplica	Moderada	10
Frutales/Pastos cultivados	No Aplica	Moderada	10
Nieve o Hielo	No Aplica	No Aplica	11
Páramo	No Aplica	No Aplica	12
Páramo/Bosque natural	No Aplica	No Aplica	12
Páramo/Vegetación arbustiva	No Aplica	No Aplica	12
Pasto natural	No Aplica	Moderada	13
Pastos cultivados	No Aplica	Moderada	13
Pastos cultivados/cultivo de maíz	No Aplica	Moderada	13
Pastos cultivados/Pasto natural	No Aplica	Moderada	13
Pastos cultivados/Vegetación arbustiva	No Aplica	Moderada	13
Vegetación arbustiva	No Aplica	Moderada	14
Vegetación arbustiva/Cultivos de ciclo corto	No Aplica	Moderada	14
Vegetación arbustiva/Pasto cultivado	No Aplica	Moderada	14

Este código numérico, en conjunto con la descripción, se agrega a la tabla de atributos de la capa vectorial de uso de suelo y cobertura vegetal. Posteriormente se intersecan las capas de uso de suelo-cobertura vegetal con la de grupos hidrológicos de suelo.

A esta nueva capa vectorial se deben agregar los siguientes campos en la tabla de atributos: SoilCode, Pcta, Pctb, Pctc, Pctd y Landuse. "SoilCode" es el código que identifica el grupo hidrológico de suelo. En los campos "PctA", "PctB", "PctC", "PctD" se

indica el porcentaje de cada grupo hidrológico de suelo. Por ejemplo, si el suelo corresponde al grupo hidrológico A, se escribe 100 en el campo PctA y cero en las otras tres casillas. En la última columna, con el código “Landuse”, se indica el uso del suelo según la clasificación realizada (Tabla 3.5).

Se crea una tabla, llamada “**CNLookup**”, la cual contiene los códigos establecidos previamente, una descripción de cada grupo y los valores de número de curva en función de los tipos hidrológicos de suelo.

Cálculo del número de curva con el módulo HEC-GeoHMS

Con la herramienta *Generate CN Grid* del módulo HEC-GeoHMS, que ha sido previamente instalado en el programa ArcGis, se genera un ráster con la información del número de curva y en la capa vectorial anterior se crea una columna con los valores de CN de cada polígono (Figura 3.7). Los datos de entrada son la capa vectorial de uso de suelo/cobertura vegetal, grupo hidrológico de suelo y la tabla *CnLookup*.

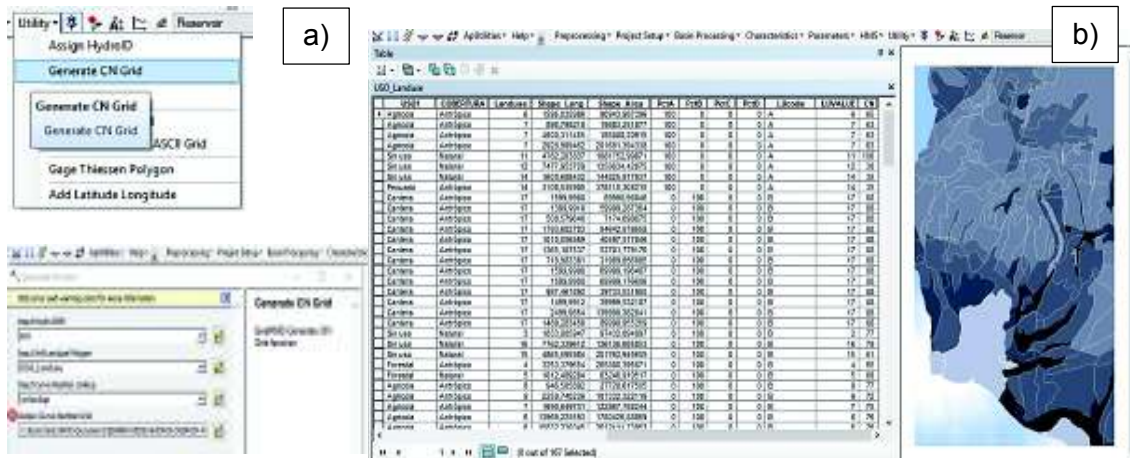


Figura 3. 7 Generación de CN con HEC-GeoHMS. a) Opción *Generate CN Grid* y ventana para ingresar datos. b) Ráster generado y columna con valores CN.

Para obtener el número de curva promedio en cada cuenca se calcula el sumatorio del número de curva por el área de cada polígono y dividirlo entre área total de cuenca:

$$CN = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i}$$

Ecuación 17

Donde:

CN = Número de curva promedio

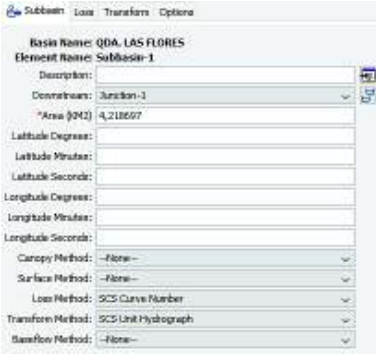
CN_i = Número de curva en cada polígono

A_i = Área de cada polígono (km²)

3.4.5. Construcción de hidrogramas y cálculo del volumen de agua con HEC-HMS

El Programa libre HEC-HMS comprende varias competencias distribuidas en diferentes módulos. Para este estudio los que se usarán principalmente los descritos a continuación (Tabla 3.8).

Tabla 3. 8 Descripción de las herramientas usadas para calcular el volumen de agua.

<p>Basin Model Manager</p>	<p>Se agregan capas vectoriales de las cuencas y redes de drenaje, y se establecen las subcuencas, reservorios, sumideros, etc. Permite ingresar datos de la cuenca: área, número de curva, tiempo de retardo (calculado en función del tiempo de concentración), etc.</p>	
<p>Time Series Data Manager</p>	<p>En este módulo se ingresan los datos de las precipitaciones calculadas previamente. Se puede establecer los intervalos, las fechas y horas de inicio y fin de los eventos de precipitación, y se crea automáticamente un hietograma.</p>	
<p>Meteorologic Model Manager</p>	<p>Este módulo permite añadir un nuevo modelo meteorológico al proyecto, en función de los datos del hietograma ingresados previamente.</p>	
<p>Control Specifications Manager</p>	<p>Sirve para especificar los datos de inicio y fin de la simulación así como los intervalos que ayudan a generar el hidrograma.</p>	

Para realizar la simulación se escogen métodos en función de los parámetros previamente calculados. Se usa el método de pérdida *SCS Curve Number* (número de curva), como método de transformación el *SCS Unit Hydrograph* (tiempo de retardo

calculado en función del tiempo de concentración) y como método de flujo base el *Linear Reservoir* (caudal base). Las series de datos se establecen en intervalos de cinco minutos, desde cero hasta alcanzar el tiempo de concentración determinado para cada subcuenca. Se crean hidrogramas de crecida para cada tiempo de retorno (5, 10, 25, 50, 100 años).

El programa permite realizar varias simulaciones de corridas con la herramienta *Simulation Run* de la opción *Compute*, y entre los resultados se obtienen gráficos, tablas de series de datos que contienen la precipitación por intervalos, el valor de flujo base distribuido en el tiempo, valores de pérdida y exceso de precipitación, caudal (m^3/s) y el volumen de agua (en m^3 o mm) (Figura 3.8).

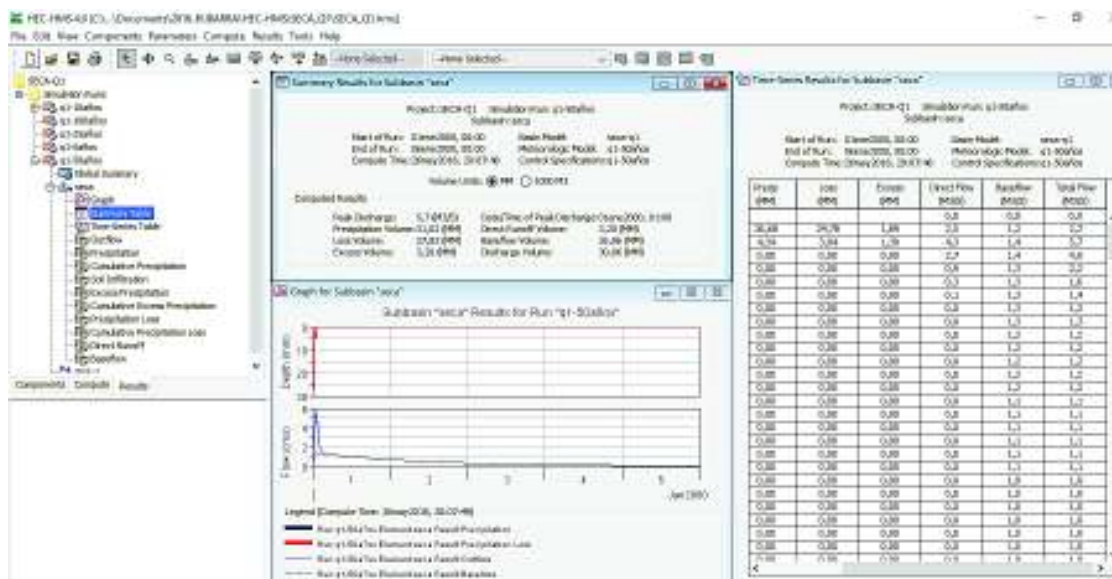


Figura 3. 8 Detalle de los resultados obtenidos después de realizar las simulaciones con la opción *Simulation Run*.

El valor de volumen de agua se suma al volumen de sedimentos, y este dato se usará para modelar los flujos de lodo secundarios de las quebradas.

3.5. Generación del modelo de flujos de lodo secundarios

Lahar Z es un programa libre que se adapta a ArcGis de versiones 10.0 o superiores. Para usar el Programa es necesario contar con un DEM del área de estudio con tamaño de celda apropiado, ya que un tamaño de celda muy alto dará resultados con menor precisión. Debido a que el ancho de las quebradas tiene valores entre 3 y 120 metros y la profundidad es mayor a 3 metros, se escoge un DEM con resolución de 3

m. A continuación, se describen las herramientas del módulo Lahar Z, que serán usadas en siguiente orden (Schilling, 2014).

- *Create Surface Hydrology Rasters:* crea un ráster de acumulación de flujo, un ráster de dirección de flujo y un ráster de la red de drenaje en el área de estudio. El umbral que se usa para crear esta primera red de drenaje tiene un valor de 7500.
- *Generate New Stream Network:* esta herramienta genera un nuevo ráster de red de drenaje, con un valor umbral diferente al anterior, en este caso se usa un umbral de 5000.
- *Hazard Zone Proximal:* genera un ráster y una capa vectorial que muestra la extensión de la zona de peligro proximal, intersecando el cono de energía con la topografía, además crea un archivo de extensión “txt” en el cual se describe la localización de los puntos de intersección en coordenadas UTM.

El valor H/L del volcán Imbabura se calcula usando la ecuación 18, donde H inicial es igual a la altura del volcán, H final es la altura a partir de la cual la pendiente es mínima y L es longitud en planta, medida entre H inicial y H final. Para realizar estas mediciones se usó Google Earth Pro, con la herramienta “Ruta”, que permite, además, generar un perfil de la zona medida (Figura 3.9). Se tomaron varios datos y se calculó el valor promedio de H/L.

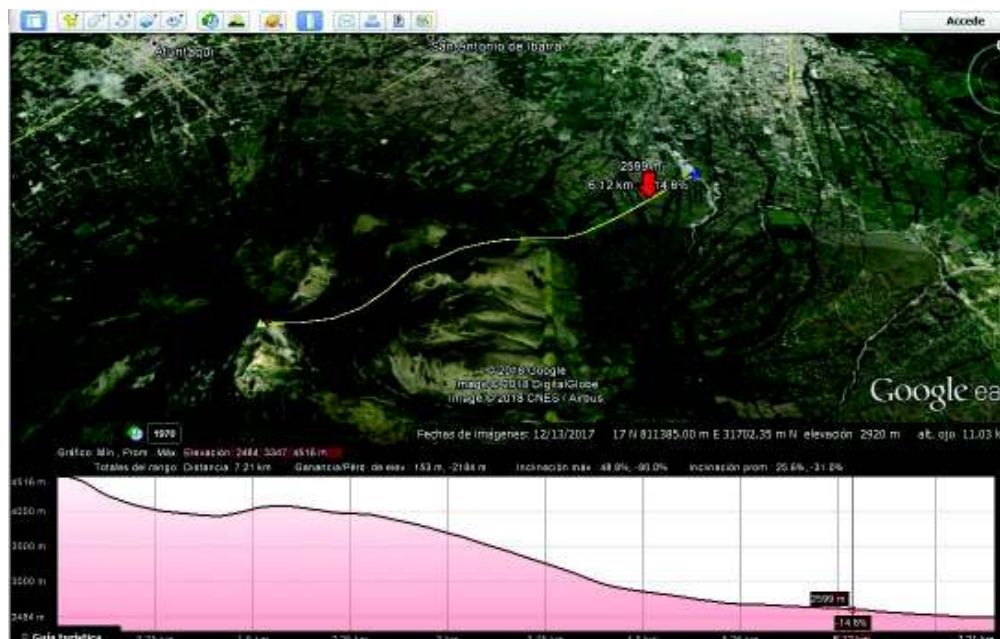


Figura 3. 9 Ejemplo de medición de H inicial, H final y Longitud con Google Earth Pro

$$H/L = \frac{H_{inicial} - H_{final}}{Longitud}$$

Ecuación 18

Donde:

H/L= Indicador de movilidad de flujo

Hinicial = altura del punto más alto

Hfinal = altura del punto más bajo

Longitud = alcance horizontal

- *Lahar Distal Zones*: genera ráster de las áreas de potencial inundación para cada drenaje. Los datos de entrada son los archivos de extensión “txt” del volumen y de ubicación de los puntos de intersección. Para usar esta herramienta se deberían anotar los cinco valores de volumen (obtenidos sumando el volumen de material suelto al volumen de agua por cada período de retorno) un solo archivo.
- *Lahar Distal Zones with Conf Levels*: para usar esta herramienta se crea un archivo “txt” con un solo valor de volumen, correspondiente al volumen del flujo de una quebrada en un período de retorno. También se crea un archivo de igual extensión con la ubicación, en coordenadas UTM, del punto de inicio de cada flujo. Por esto en total se crean diez archivos, cada uno conteniendo un valor de volumen de cada quebrada en diferentes tiempos de retorno.
- *Merge Rasters by Volume*: combina las áreas de diferentes drenajes que contienen el mismo volumen.
- *Raster to Shapefile*: convierte el ráster en un archivo de capa vectorial.

3.6. Calibración del modelo de flujos secundarios de lodo

El modelo de flujos de lodo generado fue calibrado con el evento de inundación del año 2011, que ha sido descrito en la sección 2.1.11.

Para esto se generó, con ArcGis 10.2.2, un mapa del alcance de los impactos en los barrios, calles y sistemas de alcantarillado en función de los datos tomados en el terreno y a la información recopilada. Además, se generó un modelo de flujos de lodo del evento. Para esto se debe calcular el número de curva con condición de humedad antecedente igual a III, que es adecuado para suelos previamente saturados de agua debido a que en este caso se asume que el terreno tenía humedad previa. Se usa la siguiente ecuación:

$$CN(III) = \frac{23 CN(II)}{0,13 CN(II)}$$

Ecuación 19

Donde

CN (III) = valor de CN para una condición de humedad antecedente tres

CN (II) = valor de CN para una condición de humedad antecedente dos.

Para generar un modelo con el programa HEC-HMS y determinar el volumen de agua aproximado que fue generado durante esta precipitación y que fue integrada al flujo de lodo, se usa el máximo valor de precipitación en el área de estudio durante el mes de abril del año 2011.

Se suma el valor del volumen de agua al valor de volumen de sedimentos, asumiendo que es el mismo, y se genera un modelo de ese evento con el módulo Lahar Z de ArcGis, el cual será útil para realizar la calibración.

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Descripción litológica y estratigráfica

A partir de observaciones de campo y del análisis de información geológica disponible se construyeron las columnas estratigráficas de los dos márgenes de las quebradas y de algunos de sus ramales. En la quebrada Flores se llegó hasta una altura de 2800 m (Punto 2FI1 de la Tabla 4.1), y en la quebrada Seca alcanzamos una cota de 2920 m (Punto 2SI11 de la Tabla 4.1). En total se realizaron las descripciones de 13 columnas representativas de la quebrada Las Flores y 15 columnas de la quebrada Seca, cuyas localizaciones se muestran en la Tabla 4.1, además se puede ver su ubicación en el Anexo 2 y sus descripciones en los Anexos 3 y 4.

Tabla 4. 1 Coordenadas UTM de la ubicación de las columnas estratigráficas.

QDA. LAS FLORES				QDA. SECA			
CÓDIGO	X	Y	Z	CÓDIGO	X	Y	Z
FD8	818221	10034686	2337	SI13	819705	10034120	2414
FD6	818228	10034756	2322	SI9	819591	10034628	2332
FD2	818291	10034979	2317	2S3D7	818818	10030687	2912
FD23	818899	10032725	2564	2SI17	819564	10032460	2568
FD24	818895	10032858	2536	SD11	819575	10034798	2349
FD13	818268	10034254	2660	SD15	819612	10034542	2369
FD25	818929	10032934	2500	SD10	819524	10034907	2348
2FD2	818391	10031474	2770	SD9	819480	10035026	2336
2FI1	818315	10031337	2800	2SD2	819532	10032264	2581
FI15	818223	10034290	2378	2SUQ3	819331	10031226	2791
FI11	818392	10031636	2786	2SD5	819676	10031449	2692
FI11.1	818375	10031636	2786	2SD9	819570	10031678	2662
PQF.1	818279	10034991	2310	2SD4	819675	10031283	2685
				2SD14	819651	10032738	2567
				2SI20	819651	10032754	2559

En base al levantamiento geológico realizado en campo se pudieron distinguir al menos tres unidades litológicas correspondientes a flujos piroclásticos, depósitos retrabajados y cangahua (toba). En la zona de estudio no se encontraron afloramientos de lavas volcánicas. Todos los depósitos están cubiertos por una capa de suelo de color oscuro.

A continuación, se describen las principales unidades observadas.

- Flujos piroclásticos: series de eventos de depositación compuestos por bloques de composición andesítica de tamaño de centímetros hasta decímetros, en una matriz de ceniza de color gris claro de tamaño arenoso o limoso. Contienen áreas enriquecidas en ceniza, capas finas de ceniza retrabajada, e intercalaciones de flujos retrabajados. Estos depósitos se observan principalmente en las laderas y tienen mayor espesor en la parte alta de las quebradas llegando a alcanzar los 30 m de espesor, el cual va disminuyendo hacia la parte baja.
- Depósitos retrabajados: de composición similar a los flujos piroclásticos, que han sido removilizados, por lo que contienen mayor cantidad de clastos de tamaños muy variables que pueden ser subangulosos a redondeados. Se diferencian dos tipos de depósitos: 1) Depósitos matrizsoportados con clastos subangulosos. Estos contienen bloques subangulosos a subredondeados de tamaño decimétrico de composición andesítico, en una matriz de ceniza gruesa o arena. Se reconocen por el mal sorteo de los clastos y por tener la matriz de color gris oscuro. En el área de estudio se encontraron depósitos con espesores de entre 0,5 m y 3 m, el cual disminuye a medida que descendemos por la quebrada. Fueron observados en las laderas de la quebrada y formando parte de las terrazas antiguas de la misma. Generalmente estos depósitos sobreyacen a flujos piroclásticos en la parte alta de la quebrada (sobre 2500 m aprox.). 2) Depósitos clastosoportados a matriz soportados con clastos redondeados (aluviales). Contienen bloques subredondeados a redondeados (conglomerados) de composición andesítica, de tamaño centimétrico a decimétrico. Presentan mejor sorteo que los anteriores y se encuentran en una matriz fina de color gris claro. Contienen zonas enriquecidas en ceniza (de color gris claro) y zonas de cangahua (color amarillo). Los principales depósitos se encontraron en las partes bajas de las quebradas, y pueden alcanzar espesores de 4 m.
- Cangahua (o toba): de color amarillo-pardo claro. Se compone por material piroclástico retrabajado de tamaño de limo, aunque puede contener clastos andesíticos generalmente subangulosos en bajo porcentaje (<5%). El espesor de esta unidad varía entre 40 cm y 2,5 m.
- Suelo: de tipo mollisol, producto de la meteorización y retrabajamiento intenso del material subyacente. Se caracteriza por el alto contenido de materia orgánica lo que le da un color oscuro.

Columnas estratigráficas de la quebrada Seca

En la columna del punto 2S3D7 se encuentra un depósito de flujos piroclásticos de al menos 30m de espesor, se pueden observar los diferentes eventos y capas enriquecidas en ceniza. En la base del afloramiento se encuentra un depósito de material de caída antiguo, cubierto por vegetación.

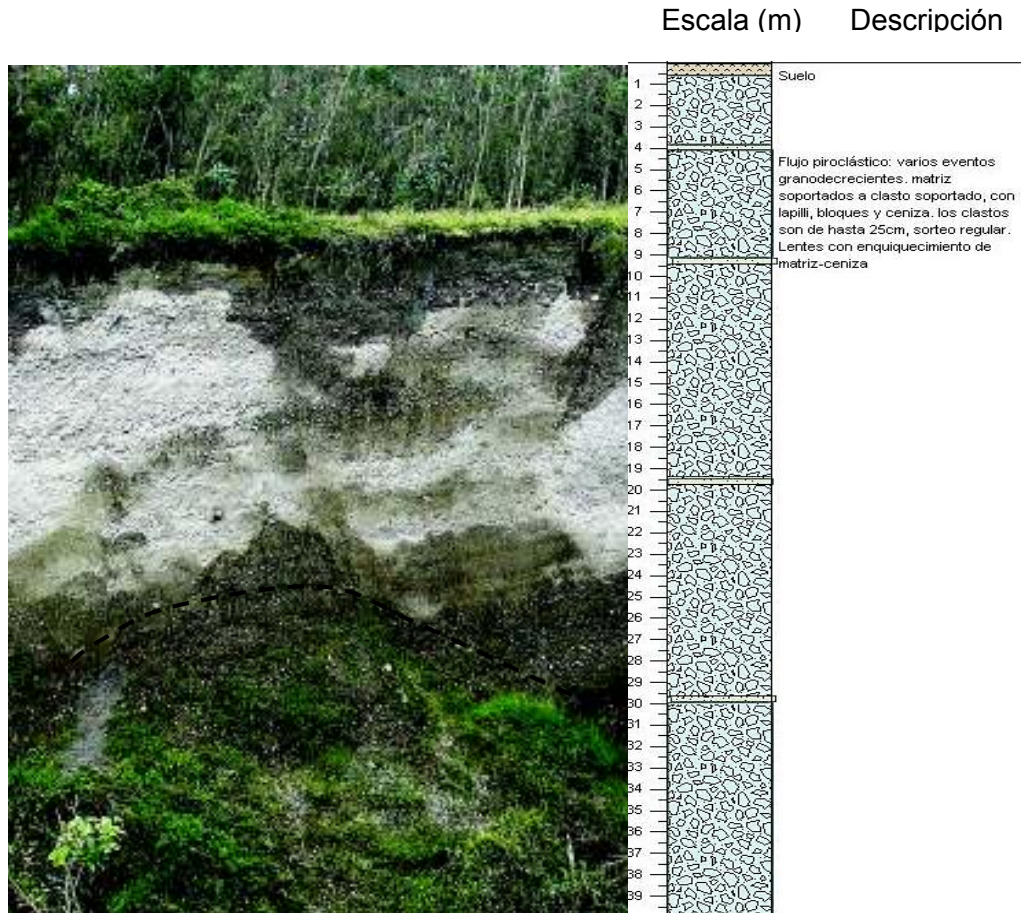


Figura 4. 1 Columna estratigráfica del punto 2S3D7.

La columna 2SD4 muestra en la parte superior un depósito retrabajado compuesto de bloques andesíticos subangulosos de tamaño decimétrico en una matriz arenosa de color gris oscuro, sobre un depósito piroclástico de color gris claro con intercalaciones de capas de ceniza fina.

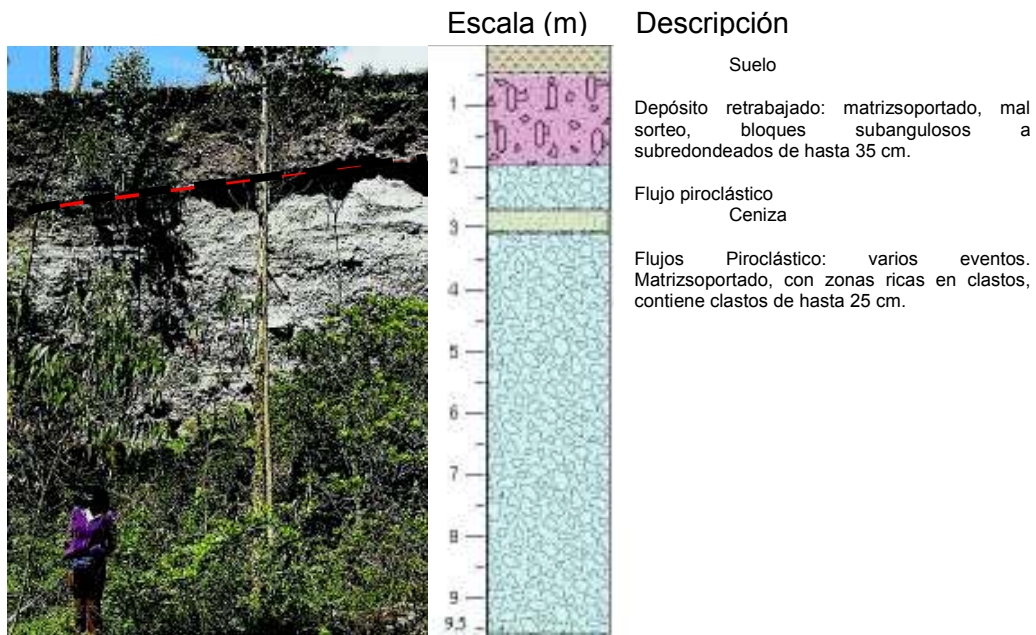


Figura 4. 2 Columna estratigráfica del punto 2SD4

En el punto SD15 se observó un depósito de flujos piroclásticos intercalados con flujos retrabajados y cangahua. En la parte superior el depósito es matriz soportado y contiene bloques decimétricos subangulosos. En la parte inferior el depósito es clastososportados muestra mejor sorteo, contiene clastos subredondeados y presenta imbricación. En la parte central izquierda se observa un lente de flujo piroclástico enriquecido en clastos subangulosos.

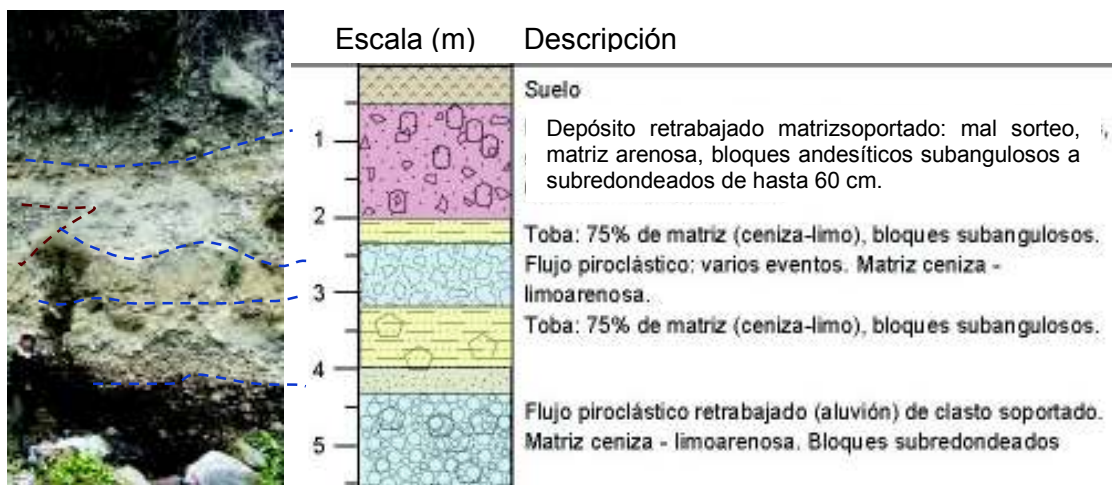


Figura 4. 3 Columna estratigráfica del punto SD15.

Columnas estratigráficas de la quebrada Las Flores

La columna estratigráfica del punto FI11 muestra una secuencia de flujo piroclástico con posible retrabajamiento. Se observan varios eventos definidos por la diferencia del tamaño de clastos y la cantidad de matriz.

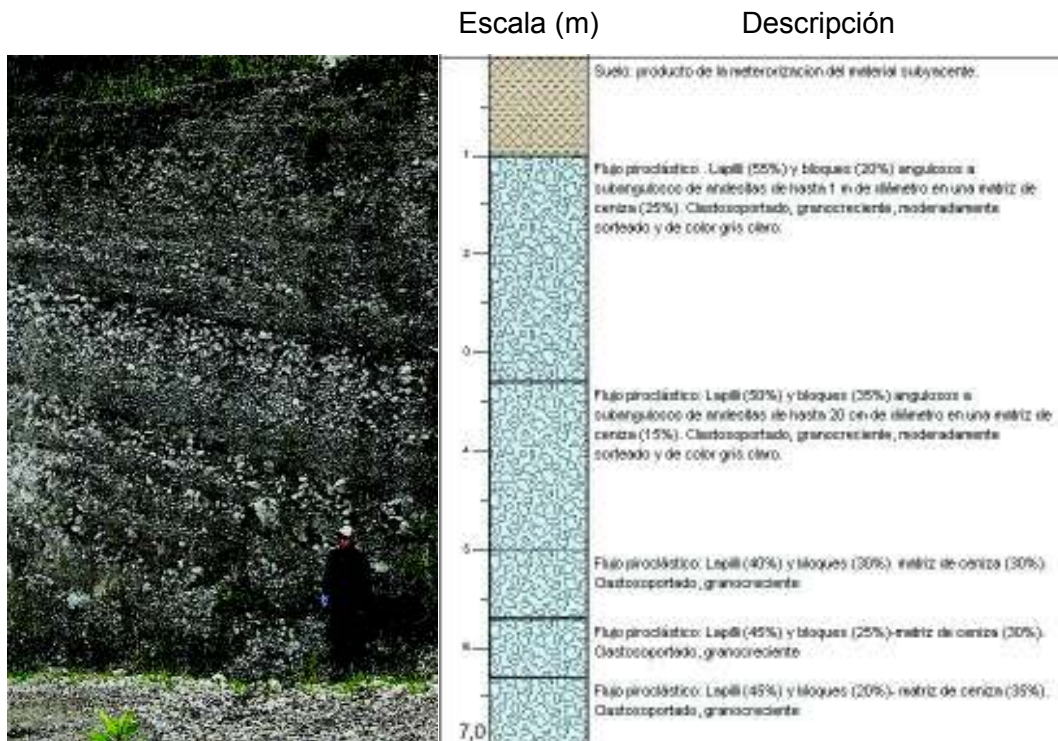


Figura 4. 4 Columna estratigráfica del punto FI11

En el punto FD13 se muestra un depósito de flujos piroclásticos de color gris claro, sobreyacido por una capa de cangahua e intercalado con un depósito retrabajado, de matriz soportado, que contiene bloques de tamaño decimétrico, de mal sorteo y con espesor menor a 1m.

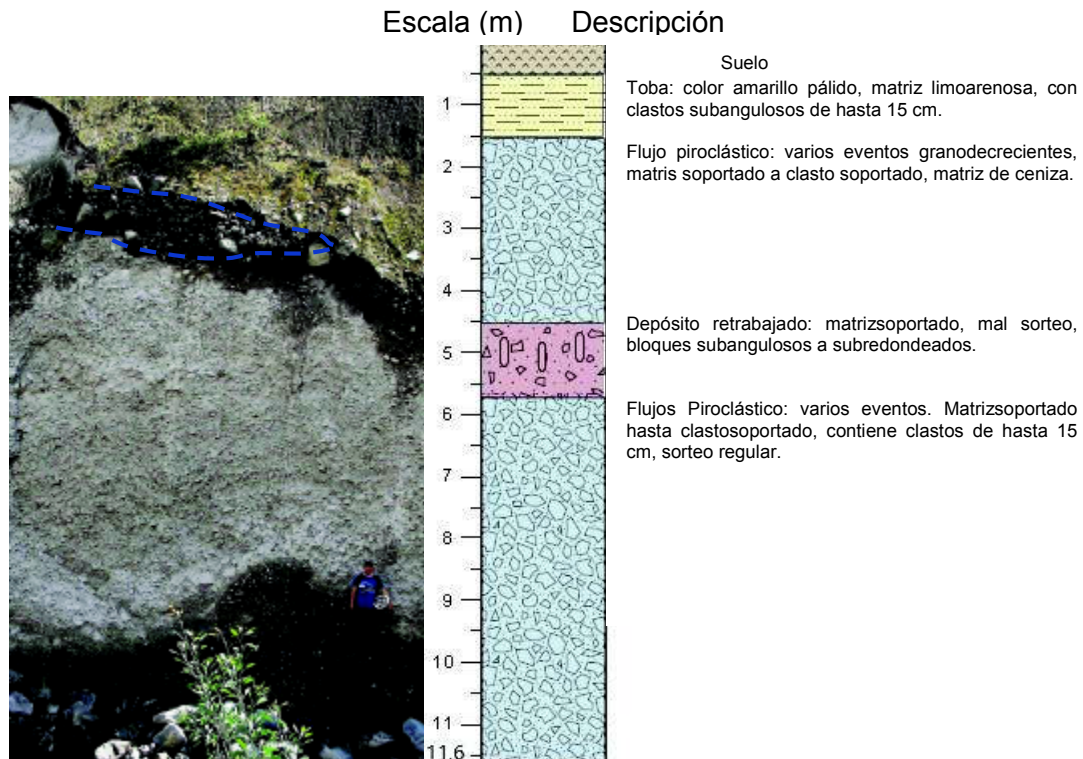


Figura 4. 5 Columna del punto FD13

En el punto FD6 se observó un afloramiento compuesto por una capa de cangahua de color amarillento en la parte central, sobre un depósito piroclástico enriquecido en ceniza, y sobreyacido por un depósito retrabajado, clastosoportado con clastos subredondeados y matriz fina de color gris claro.



Figura 4. 6 Columna estratigráfica en el punto FD6.

4.2. Volumen de los depósitos

4.2.1. Volumen de material en la quebrada Seca

En la quebrada Seca se recolectaron datos de los depósitos, que están resumidos en la tabla 4.2, dando como resultado un volumen aproximado de 6500 m³ de material que por sus características (pobre compactación, tamaño de partícula fino o muy fino, localizados en pendientes moderadas a altas y expuestos a factores externos de removilización) puede ser fácilmente removido durante un evento de lluvia intensa, contribuyendo al volumen total de un flujo de lodo.

Los depósitos tienen entre 12 m³ y 650 m³. Los más pequeños son recientes, constituidos principalmente de suelo, material piroclástico retrabajado, bloques andesíticos y material orgánico. Los depósitos de mayor volumen se componen generalmente de flujos piroclásticos removilizados y se localizan en la base de laderas de gran espesor. Los más antiguos presentan vegetación y suelo desarrollado en la superficie. Los depósitos localizados en los taludes de las canteras, donde el material está en constante proceso de removilización, se componen de ceniza, arena fina, poca cantidad de bloques y no presentan desarrollo de vegetación.

Tabla 4. 2 Ubicación y características de los depósitos en la Qda. Seca.

QUEBRADA SECA			
CÓDIGO	UBICACIÓN (UTM)	COTA	CARACTERÍSTICAS
SD2	819360 10035250	2307	Suelo erosionado con clastos y material orgánico. Bloques andesíticos y ladrillos (5%). Bajo nivel de humedad. Hierba poco abundante.
SD3	819386 10035240	2314	Suelo erosionado con clastos y material orgánico (Hierba poco abundante y ramas (árboles de eucalipto). Bloques andesíticos y ladrillos (5%). Bajo nivel de humedad.
SD4	819379 10035223	2314	Suelo erosionado con clastos y material orgánico (hierba poco abundante). Bloques andesíticos y ladrillos (5%). Bajo nivel de humedad.
SD4.1	819379 10035223	2314	Suelo erosionado con clastos y material orgánico (hierba poco abundante). Bloques andesíticos y ladrillos (5%). Bajo nivel de humedad.
SD6	819421 10035126	2303	Suelo erosionado con clastos y material orgánico. Bajo nivel de humedad.
SD7	819448 10035121	2324	Suelo y ceniza con clastos subredondeados andesíticos (45%). Material sin humedad, sin vegetación.
SD7.1	819448 10035121	2324	Suelo y ceniza con clastos subredondeados andesíticos, y material inorgánico (<5%). Material con bajo nivel de humedad y poca vegetación
SI1	818387 10035339	2318	Matriz limo-arenosa (40%) y clastos subangulosos (60%). Bajo nivel de humedad.
SI5	819458 10035049	2317	Matriz limo-arenosa (40%) y clastos subangulosos andesíticos (60%). Desarrollo de suelo y vegetación pobre. Material casi seco.
SI6	819486 10034964	2337	Matriz limo-arenosa-suelo orgánico (50%) y clastos subangulosos andesíticos (50%).
SI10	819601 10034530	2370	Arena fina (20%) y bloques de andesita subredondeados (80%). Material seco y sin vegetación.
SI14	819675 10034061	2411	Arena fina (30%) y bloques de andesita subredondeados (70%). Material seco y sin vegetación.
2SI1	819367 10030743	2849	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y árboles incluyendo eucaliptos. Bajo nivel de humedad.
2SI4	819444 10030820	2822	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y árboles incluyendo eucaliptos. Material seco o poco húmedo.
2SI4.1	819445 10030830	2822	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y rodeado por árboles incluyendo eucaliptos. Bajo nivel de humedad.
2SI4.2	819444 10030820	2822	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y árboles incluyendo eucaliptos. Material seco o poco húmedo.
2SI5	819536 10030954	2810	Arena fina (94%) y Bloques subangulosos de andesita (6%). Al pie de un afloramiento. Sin vegetación ni humedad.
2SD3	819557 10032322	2566	Suelo limoso y arena fina (96%) y bloques subangulosos (4%). Vegetación en la superficie.
2SD3.1	819557 10032322	2566	Suelo limoso y arena fina (96%) y bloques subangulosos (4%). Vegetación en la superficie.
2SI9	819672 10031512	2688	Suelo y arena (65%) y bloques andesíticos subangulosos que miden hasta 60 cm (35%). Caída de un árbol. Bajo nivel de humedad.
2SI10	819676 10031603	2679	Suelo y arena (60%) y bloques andesíticos subangulosos (40%). Presencia de hierba creciendo en la superficie, presenta humedad.

2S3D7	818818 10030687	2912	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y plantas pequeñas. Suelo húmedo.
2S4I12	819445 10031369	2761	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico. Cubierto por hierbas y árboles.
2SD12	819530 10032023	2613	Depósito antiguo al pie de un depósito de flujo piroclástico retrabajado (lahar en terraza aluvial). Cubierto por hierbas y árboles.
2SD8	819563 10031623	2661	Suelo y arena (55%) y bloques andesíticos subangulosos (45%). Nivel de humedad bajo, con presencia de hierba en la superficie.
2SD11	819550 10031904	2639	Suelo y arena (65%) y bloques andesíticos subangulosos (35%). Poca humedad y no tiene vegetación.
2SI14	819520 10032086	2607	Suelo y arena (94%) y bloques andesíticos subangulosos (6%). Poca humedad y no tiene vegetación.
2SI16	819511 10032181	2598	Arena fina (35%) y bloques de andesita subredondeados (65%). Poca humedad y no tiene vegetación.
2SI18	819558 10032607	2562	Suelo limoso y arena fina (96%) y bloques subangulosos (4%). Bajo nivel de humedad. No presenta vegetación.
2SD14	819651 10032738	2567	Suelo limoso y arena fina (88%) y bloques subangulosos. Presencia de vegetación que incluye hierbas y árboles de eucalipto.
2SI22	819721 10032969	2526	Suelo limoso y arena fina (95%) y bloques subangulosos, contiene restos de vegetación.

4.2.2. Volumen de material en la quebrada Las Flores

En la quebrada Las Flores se realizaron mediciones y recolección de datos en campo y el análisis y cálculo de volúmenes en base a ortofotos recolectadas con DRON y procesadas con Pix4D Mapper.

En la tabla 4.3 se describen los depósitos que fueron medidos en campo y que dieron como resultado un volumen aproximado de 450 m³. Éstos tienen entre 9 m³ y 60 m³, y están localizados al pie de pequeños taludes. Se componen principalmente de suelo, material piroclástico retrabajado y material orgánico en algunos casos.

Tabla 4. 3 Ubicación y características de los depósitos de la Qda. Las Flores.

CÓDIGO	UBICACIÓN (UTM)	COTA	CARACTERÍSTICAS
FD8.1	818165 10034611	2327	Arena fina y suelo con bloques de andesita subredondeados. Contiene restos de vegetación (hierbas y ramas). Bajo nivel de humedad.
FI10	818208 10034428	2328	Arena fina (40%) y bloques de andesita gris, subredondeados (60%). Poca vegetación. Bajo nivel de humedad.
FI15	818223 10034290	2378	Arena fina (40%) y bloques de andesita gris, subredondeados (60%). Poca vegetación. Bajo nivel de humedad.
FI17	818529 10033801	2383	Arena fina (60%) y bloques de andesita gris, subangulosos (40%). Sin vegetación. Sin humedad notable.
FI18	818553 10033753	2404	Matriz de limo arenoso (75%) y bloques subangulosos y subredondeados de andesita (25%). Sin vegetación, no presenta humedad.

FI20	818562 10033688	2402	Arena fina (30%) y bloques subangulosos a subredondeados de andesita gris (70%). La pared se muestra desgastada. Sin vegetación. Bajo nivel de humedad.
FI21	818576 10033641	2406	Quebradilla en la cantera Terraza Qda. Blanca. Arena fina (30%) y bloques subredondeados o subangulosos de andesita (70%). Bajo nivel de humedad, sin presencia de vegetación.
FI22	818914 10032994	2502	Microdeslizamiento, depósito de material suelto andesítico, clastos de 5 cm a 50cm de diámetro, angulosos y subredondeados, mal sorteados. La matriz es arena fina a limo. Sin vegetación.
FD15	818408 10034234	2364	Arena fina (50%) y bloques subangulosos a subredondeados de andesita (50%). Sin vegetación, bajo nivel de humedad.
FD16	818523 10034113	2350	Acumulación de arena fina (90%) y clastos andesíticos (4%). Sin vegetación. Bajo nivel de humedad.
2FI1	818315 10031337	2800	Acumulación de arena fina (50%) y clastos andesíticos (50%). Muy húmedo, poca vegetación.
2FD1	818354 10031395	2786	Acumulación de suelo, arena fina y clastos andesíticos (10%). Muy húmedo con poca presencia de vegetación.
2FI2	818404 10031566	2756	Acumulación de arena fina (80%) y clastos andesíticos (20%). Plantas removidas. Material muy húmedo.
2FD4	818477 10031706	2750	Acumulación de arena fina (40%) y clastos andesíticos (60%). Contiene restos de vegetación. Material muy húmedo.
2FD5	818628 10032129	2682	Arena fina y suelo (50%) y bloques subangulosos a subredondeados de andesita (50%). Muy húmedo con poca presencia de humedad.

Las ortofotos tomadas con DRON se realizaron en tramos de la quebrada Las Flores en donde se localizan canteras, por lo cual los depósitos son más abundantes, y en algunos casos, de acceso restringido. En general los depósitos tienen sorteo bueno a regular y se componen de arena fina con bloques subredondeados a subangulosos de composición andesítica, con poca o nula cantidad de materia orgánica como restos de plantas (Figura 4.7).



Figura 4. 7 Depósito al pie del talud en la Qda. Las Flores, compuesta por arena (90%) y bloques (10%).

Durante el levantamiento de datos con DRON se tomaron alrededor de 1560 fotografías las cuales fueron procesadas con el programa Pix4D Mapper, con el que se obtuvo un modelo digital de terreno y una ortofoto de cada tramo sobrevolado (Figura 4.8). En la tabla 4.4 se resumen las características de las ortofotos, cabe mencionar que la resolución de las imágenes es muy alta, siendo la ortofoto tomada en el tercer intervalo, hacia el sur del puente del barrio El Ejido, la que tiene mayor resolución. En el Anexo 5 se encuentran las ortofotos generadas.

Tabla 4. 4 Características de las ortofotos tomadas con DRON.

Característica	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
Longitud sobre el terreno (m)	500	750	705
Ancho máximo del área (m)	200	290	310
Tamaño de celdas X, Y (m)	0,02437, 0,02437	0,02724, 0,002724	0,03659, 0,03659
Lugar de referencia	Cantera Terraza Qda. Granda	Cantera Alondra del Rey	Puente – Barrio El Ejido de Caranqui

El programa Pix4D, mediante la aplicación de la herramienta *Volumes*, permitió calcular los volúmenes de los depósitos localizados los tres tramos de la quebrada, dando como resultado un valor aproximado de 15000 m³.

En total de volumen de material que podría ser removidos ante un evento de lluvia intensa en esta quebrada es de 15450m³.

En la Tabla 4.5 se resumen los volúmenes de material suelto, que podría ser removido en cada quebrada.

Tabla 4. 5 Volumen de material suelto determinado en cada quebrada.

QUEBRADA	MEDIDAS DE VOLUMEN (m³)		VOLUMEN TOTAL (m³)
	En campo	DRON	
Qda. Seca	6500	-	6500
Qda. Las Flores	450	15000	15450

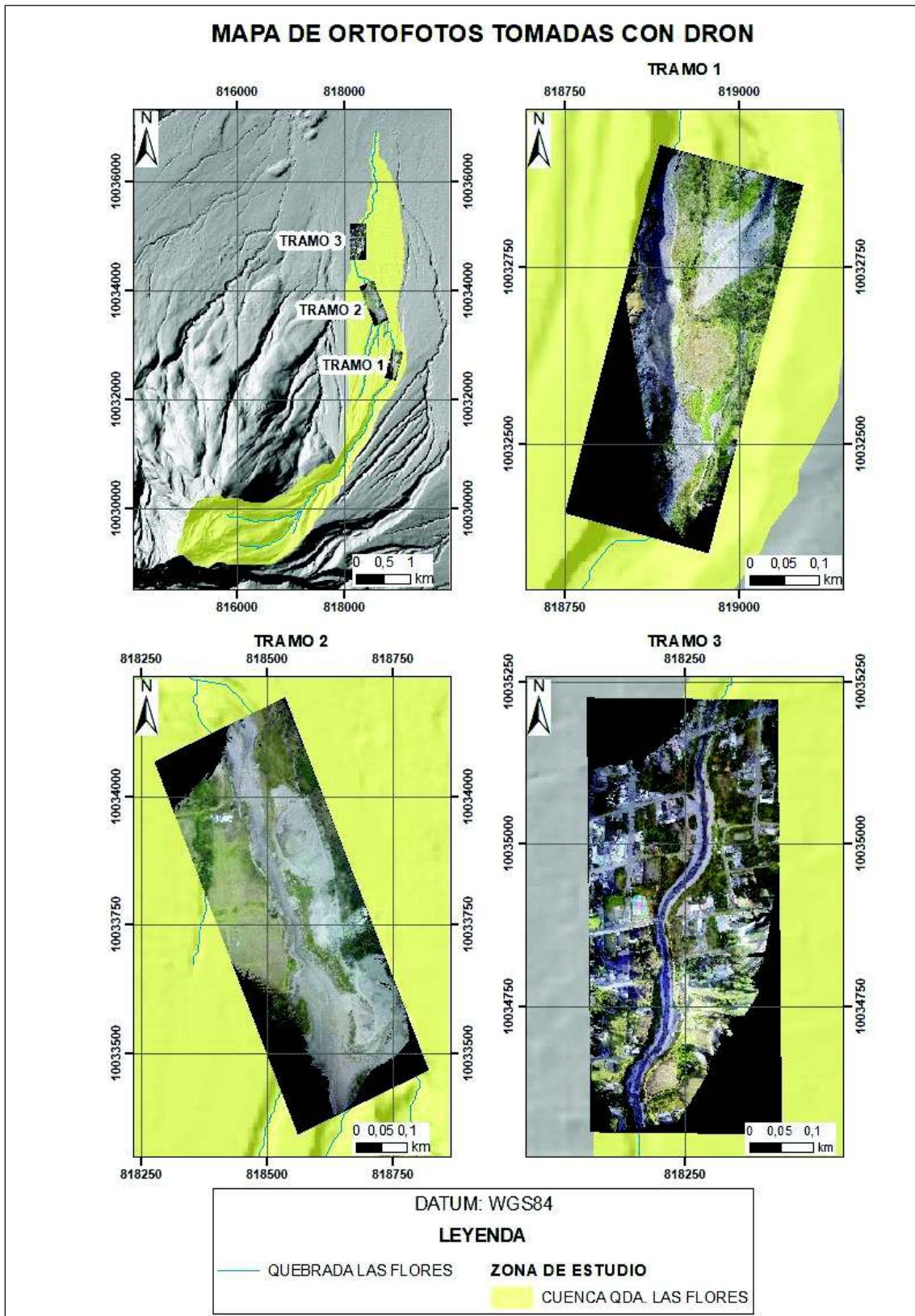


Figura 4. 8 Localización de las ortofotos tomadas con DRON en tres tramos de la quebrada Las Flores.

4.3. Características de las cuencas hidrográficas

Mediante el uso de herramientas del programa ArcGis 10.2.2, y con observaciones realizadas en campo (cálculo aproximado del caudal base con la ecuación 6), se delimitaron (Figura 4.9) y caracterizaron las cuencas y las redes de drenaje de las quebradas Seca y Las Flores (Tabla 4.6).

Tabla 4. 6 Características básicas de las quebradas obtenidas a partir del procesamiento de un modelo digital de terreno.

CARACTERÍSTICAS	QUEBRADA SECA	QUEBRADA LAS FLORES	
		SUBCUENCA ALTA	SUBCUENCA BAJA
Cota del punto más alto del cauce principal	2997 m	3865 m	2744 m
Cota del punto más bajo del cauce principal	2220 m	2744 m	2226 m
Longitud del cauce principal	8379 m	4492 m	6328,6
Pendiente del cauce principal	0,092732	0,24955476	0,08185116
Perímetro de la cuenca	18302 m	10404,5 m	12325,75 m
Área de la cuenca	6052748 m ²	3520120,98 m ²	3923208,23 m ²
Caudal Base aproximado.	0,0025 m ³ /s	0,0028 m ³ /s	0.005 m ³ /s

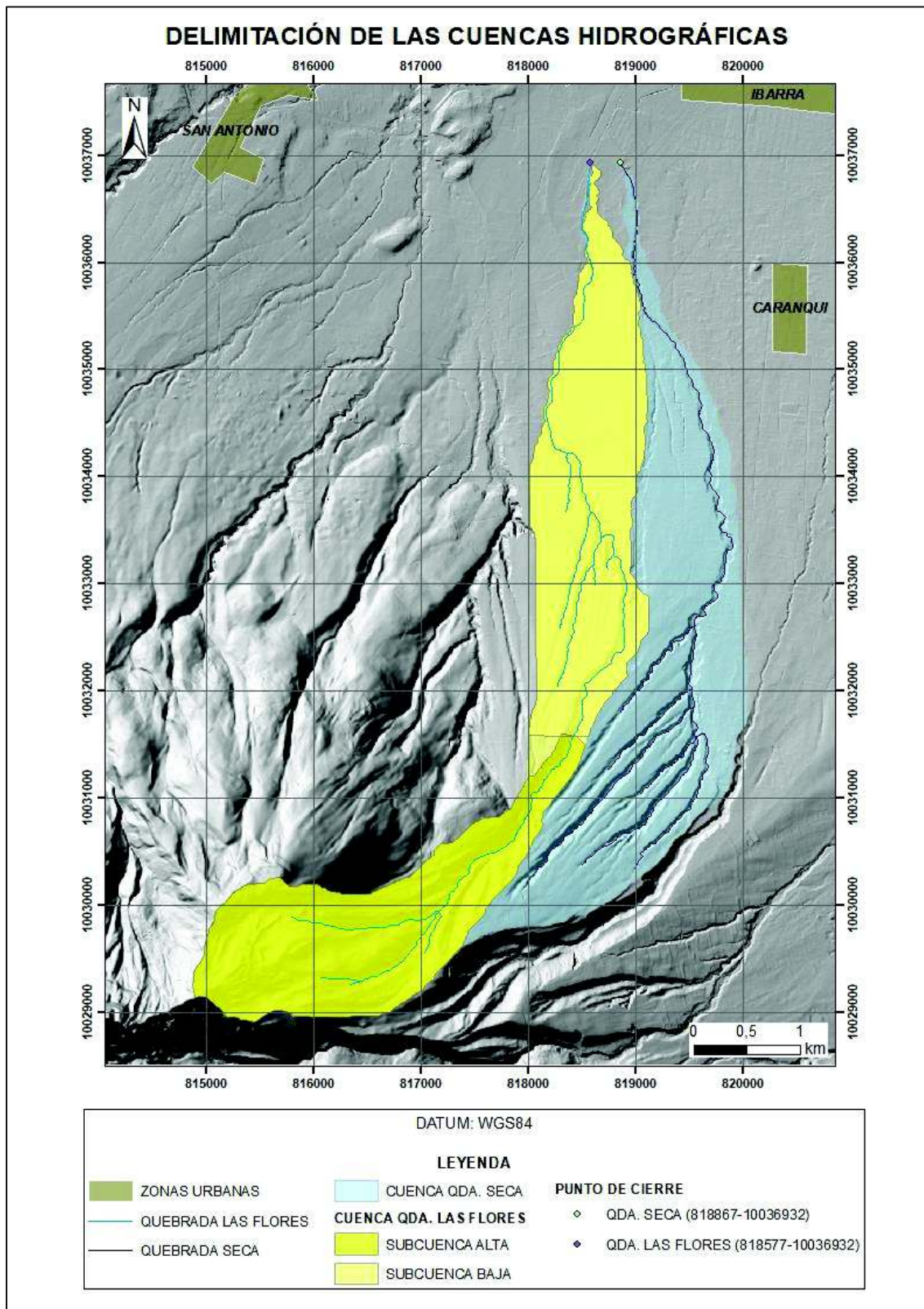


Figura 4. 9 Delimitación y ubicación de las cuencas y la red de drenaje de las quebradas Seca y Las Flores.

4.4. Volumen de agua

4.4.1. Tiempo de concentración y tiempo de retardo

Con los datos obtenidos (área de la cuenca, longitud de cauce y pendiente promedio del cauce) se calcula el tiempo de concentración con las fórmulas mencionadas en la sección 3.3.5., obteniendo los resultados que se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 7 Resultados de tiempo de concentración para cada quebrada.

MÉTODO	DATOS	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN		
		QDA. SECA	QDA. LAS FLORES	
			SUBCUENCA ALTA	SUBCUENCA BAJA
Clark	<ul style="list-style-type: none"> Área de la cuenca (km²) Pendiente promedio del cauce principal (m/m) 	118,33 min	63,98 min	94,95 min
Témez	<ul style="list-style-type: none"> Longitud del cauce principal (km) Pendiente promedio del cauce principal (m/m) 	142,27 min	73,39 min	117,70 min
Pilgrim y Mcdermott	<ul style="list-style-type: none"> Área de la cuenca (km²) 	90,39 min	73,96 min	76,65 min
Giandotti	<ul style="list-style-type: none"> Longitud del cauce (km) Área de la cuenca (km²) Pendiente promedio del canal principal (m/m) 	60,29 min	31,90 min	57,39 min
Passini	<ul style="list-style-type: none"> Longitud del cauce (km) Área de la cuenca (km²) Pendiente promedio del canal principal (m/m) 	77,74 min	32,25 min	65,37 min
Kirpich	<ul style="list-style-type: none"> Longitud del cauce principal (km) Pendiente promedio del cauce principal (m/m) 	49,54 min	21,16 min	42,30 min

Los valores obtenidos con los diferentes métodos fueron muy variables por lo que no sería adecuado calcular un valor promedio del cálculo. Por las características de las cuencas y por la sencillez de su aplicación, el método de Kirpich (ecuación 13) fue el usado en el presente estudio. Se recomienda utilizar este método en zonas urbanas siempre y cuando éstas sean de gran tamaño (mayor a tres hectáreas) y su pendiente no sea muy pronunciada, además se indica que el método se aplica mejor a áreas de drenaje rurales semiplanas, donde se tiene valores considerables en cuanto a tamaños de áreas de aportación (Salvador, 2013).

El tiempo de retardo (ecuación 14) calculado fue: 29,43 min en la Qda. Seca, 12,7 min en la subcuenca alta y 25,38 min en la subcuenca baja de la Qda. Las Flores.

Para el cálculo de las intensidades los valores tiempo de concentración fueron aproximados a los números cerrados inmediatamente superiores. Por esto, para quebrada Seca se usó un valor de 50 minutos, para la subcuenca alta de la quebrada Las Flores se usó un valor de 25 minutos y para la subcuenca baja se usó 45 minutos. Se debe notar que en estas subcuencas el tiempo es muy diferente y esto se debe a la gran diferencia en el valor de las pendientes de los cauces principales.

4.4.2. Intensidades

Para realizar el cálculo de las intensidades se utilizaron como datos de duración a los tiempos de concentración divididos en intervalos de cinco minutos. Como datos de frecuencia se tomaron los períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los valores de intensidades se encuentran en las tablas 4.8, 4.9 y 4.10, para las quebradas Las Flores – subcuenca alta, Las Flores – subcuenca baja, y Seca, respectivamente.

Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran las curvas IDF para las quebradas Las Flores – subcuenca alta, Las Flores – subcuenca baja, y Seca, respectivamente, e indican la variación de las intensidades con respecto al tiempo. Las intensidades mayores se dan en eventos de menor duración, y aumentan su valor en función del período de retorno. A mayor duración del evento, la intensidad adquiere valores constantes.

Tabla 4. 8 Intensidades (Itr) para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la subcuenca alta de la quebrada Las Flores.

Tiempo	Itr 5años	Itr10años	Itr25años	Itr50años	Itr100años
Min	mm/hora	mm/hora	mm/hora	mm/hora	mm/hora
5	89,763	101,312	118,888	134,184	151,446
10	61,353	69,246	81,259	91,714	103,513
15	49,109	55,427	65,043	73,411	82,855
20	41,934	47,329	55,540	62,686	70,750
25	37,099	41,872	49,137	55,458	62,593

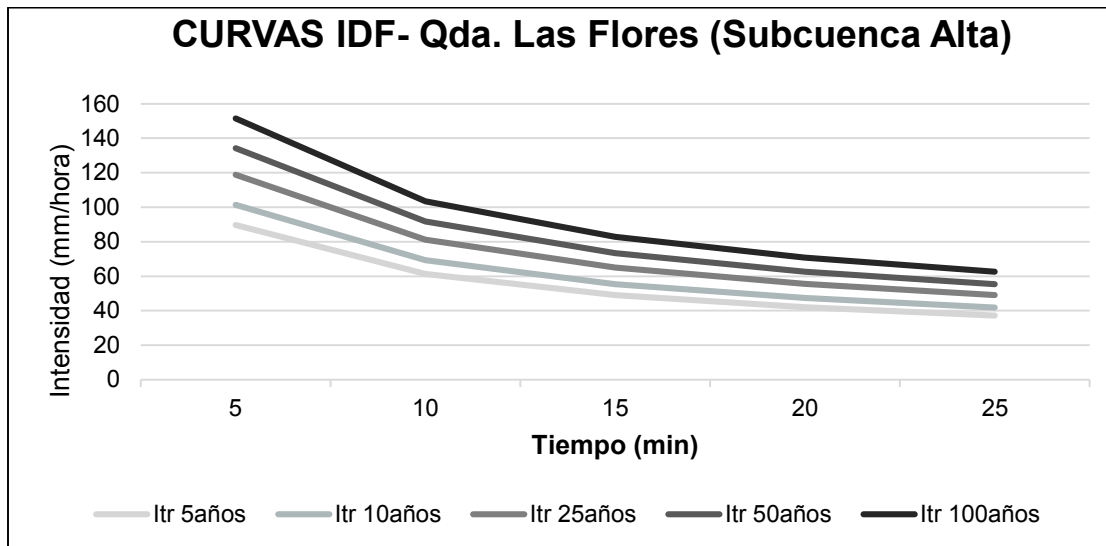


Figura 4. 10 Curvas IDF de la subcuenca alta en la quebrada Las Flores.

Tabla 4. 9 Intensidades (Itr) para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la subcuenca baja de la quebrada Las Flores.

Tiempo min	Itr 5años mm/hora	Itr 10años mm/hora	Itr 25años mm/hora	Itr 50años mm/hora	Itr 100años mm/hora
5	89,763	101,312	118,888	134,184	151,446
10	61,353	69,246	81,259	91,714	103,513
15	49,109	55,427	65,043	73,411	82,855
20	41,934	47,329	55,540	62,686	70,750
25	37,099	41,872	49,137	55,458	62,593
30	35,299	39,554	45,976	51,518	57,728
35	32,002	35,859	41,682	46,706	52,336
40	29,396	32,939	38,287	42,903	48,074
45	27,274	30,562	35,524	39,806	44,604

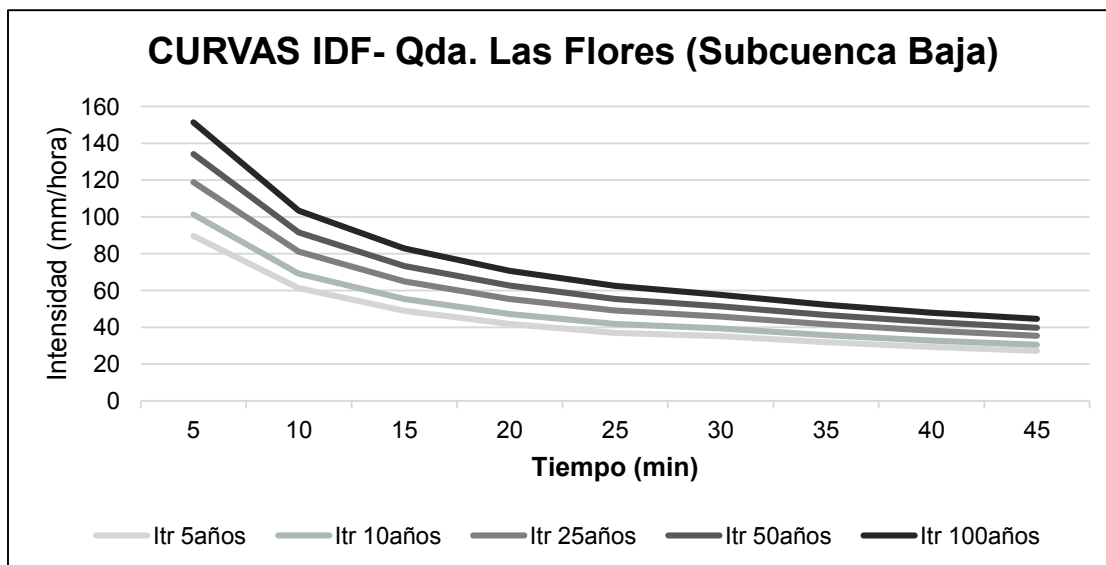


Figura 4. 11 Curvas IDF de la subcuenca baja de la quebrada Las Flores.

Tabla 4. 10 Intensidades para períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años en la quebrada. Seca.

Tiempo	Itr 5años	Itr 10años	Itr 25años	Itr 50años	Itr 100años
min	mm/hora	mm/hora	mm/hora	mm/hora	mm/hora
5	89,763	101,312	118,888	134,184	151,446
10	61,353	69,246	81,259	91,714	103,513
15	49,109	55,427	65,043	73,411	82,855
20	41,934	47,329	55,540	62,686	70,750
25	37,099	41,872	49,137	55,458	62,593
30	35,299	39,554	45,976	51,518	57,728
35	32,002	35,859	41,682	46,706	52,336
40	29,396	32,939	38,287	42,903	48,074
45	27,274	30,562	35,524	39,806	44,604
50	25,506	28,580	33,221	37,225	41,713

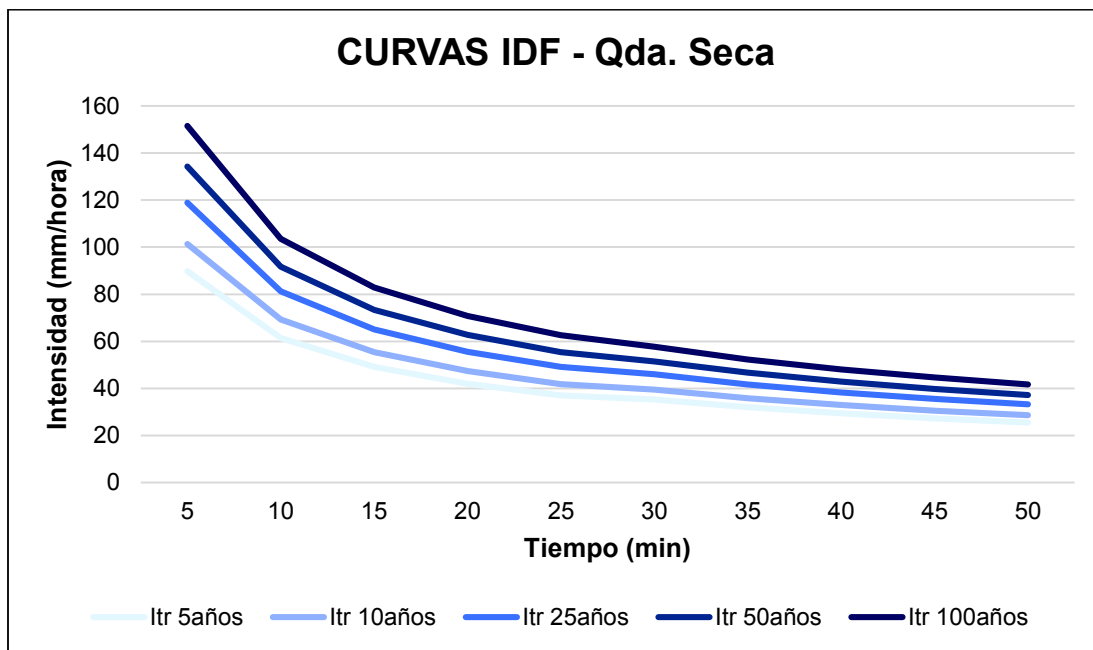


Figura 4. 12 Curvas IDF de la quebrada Seca.

4.4.3. Precipitación

A partir de los valores de intensidades se calcula la precipitación total, en milímetros, usando la ecuación 1. Este valor se discretiza para obtener las precipitaciones acumuladas y parciales usando el método de Huff.

Beltrán (1995) en su investigación de tormentas de Quito recomienda usar los patrones correspondientes al primer y segundo cuartil debido a que en esta ciudad las tormentas suelen ser concentradas, cortas e intensas. En este aspecto, las precipitaciones de Ibarra son similares a las de Quito la mayor parte del tiempo.

Checa (2012) concluye que la experiencia ingenieril indica que la distribución del segundo cuartil representa de mejor manera la variación de la intensidad de lluvia con respecto a la duración, para la ciudad de Ibarra y para áreas similares a la cuenca del río Ajaví.

Conociendo las áreas de las cuencas se escogió el método de Huff para áreas puntuales, es decir, las que tiene menos de 12,95 km², en el segundo cuartil y con el nivel del 50% de probabilidad de ocurrencia acumulada (mediana) ya que esta “es probablemente la estadística más útil” (Huff, 1990)

El volumen calculado será el mismo o similar usando cualquiera de los cuatro cuartiles del método de Huff ya que éste se encarga de distribuir la precipitación en el tiempo, pero no controla la cantidad de precipitación que se mueve de un punto a otro. En las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se observan estos valores de precipitación para cada quebrada y los hietogramas (Anexo 6) muestran la distribución de tal forma que la mayor cantidad de precipitación ocurrió durante el segundo cuartil del total de tiempo de precipitación.

Tabla 4. 11 Valores de precipitación discretizados para cada intervalo de duración. quebrada Las Flores, subcuenca baja.

45				TR 5años	TR 10años	TR 25años	TR 50años	TR 100años
P[mm]				20,5	22,9	26,6	29,9	33,5
Tiempo [min]	%Tiempo	%Precip. Acu	%Precip. Par	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]
5	11,1	8,9	8,9	1,818	2,038	2,369	2,654	2,974
10	22,2	18,7	9,8	1,998	2,239	2,603	2,917	3,268
15	33,3	35,7	17,0	3,477	3,897	4,529	5,075	5,687
20	44,4	60,8	25,1	5,136	5,756	6,690	7,496	8,400
25	55,6	76,6	15,8	3,230	3,619	4,207	4,714	5,282
30	66,7	86,0	9,4	1,931	2,164	2,515	2,818	3,158
35	77,8	92,1	6,1	1,250	1,400	1,628	1,824	2,044
40	88,9	96,6	4,5	0,910	1,020	1,186	1,329	1,489
45	100,0	100,0	3,4	0,704	0,788	0,917	1,027	1,151
		Suma	100,0	20,5	22,9	26,6	29,9	33,5

Tabla 4. 12 Valores de precipitación discretizados para cada intervalo de duración, para diferentes períodos de retorno en la quebrada Las Flores - subcuenca alta.

25				TR 5años	TR 10años	TR 25años	TR 50años	TR 100años
P[mm]				15,5	17,4	20,5	23,1	26,1
Tiempo [min]	%Tiempo	%Precip. Acu	%Precip. Par	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]
5	20,0	16,0	16,0	2,473	2,791	3,276	3,697	4,173
10	40,0	51,0	35,0	5,410	6,106	7,166	8,088	9,128
15	60,0	81,0	30,0	4,637	5,234	6,142	6,932	7,824
20	80,0	93,0	12,0	1,855	2,094	2,457	2,773	3,130
25	100,0	100,0	7,0	1,082	1,221	1,433	1,618	1,826
		Suma	100,0	15,5	17,4	20,5	23,1	26,1

Tabla 4. 13 Valores de precipitación discretizada para cada intervalo de duración, en diferentes períodos de retorno, en la quebrada Seca.

50 min				TR 5años	TR 10años	TR 25años	TR 50años	TR 100años
P[mm]				21,3	23,8	27,7	31,0	34,8
Tiempo [min]	%Tiempo	%Precip. Acu	%Precip. Par	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]	Precip. [mm]
5	10,0	8,0	8,0	1,700	1,905	2,215	2,482	2,781
10	20,0	16,0	8,0	1,700	1,905	2,215	2,482	2,781
15	30,0	29,0	13,0	2,763	3,096	3,599	4,033	4,519
20	40,0	51,0	22,0	4,676	5,240	6,090	6,825	7,647
25	50,0	70,0	19,0	4,038	4,525	5,260	5,894	6,605
30	60,0	81,0	11,0	2,338	2,620	3,045	3,412	3,824
35	70,0	88,0	7,0	1,488	1,667	1,938	2,171	2,433
40	80,0	93,0	5,0	1,063	1,191	1,384	1,551	1,738
45	90,0	97,0	4,0	0,850	0,953	1,107	1,241	1,390
50	100,0	100,0	3,0	0,638	0,715	0,831	0,931	1,043
		Suma	100,0	21,3	23,8	27,7	31,0	34,8

4.4.4. Valor del número de curva

Se realizó la clasificación de suelos en los grupos hidrológicos en función de características como la pendiente (Anexo 7), el drenaje (Anexo 8) y la textura, ponderando los valores de cada característica.

La cuenca de la quebrada Las Flores tiene 44,6% suelos de tipo B y 54,4% de suelos tipo C, que son suelos con drenaje moderado a bueno y pendientes moderadas. La quebrada Seca tiene 71,03% de suelo tipo B y 28,97% de suelo tipo C (Figura 4.12).

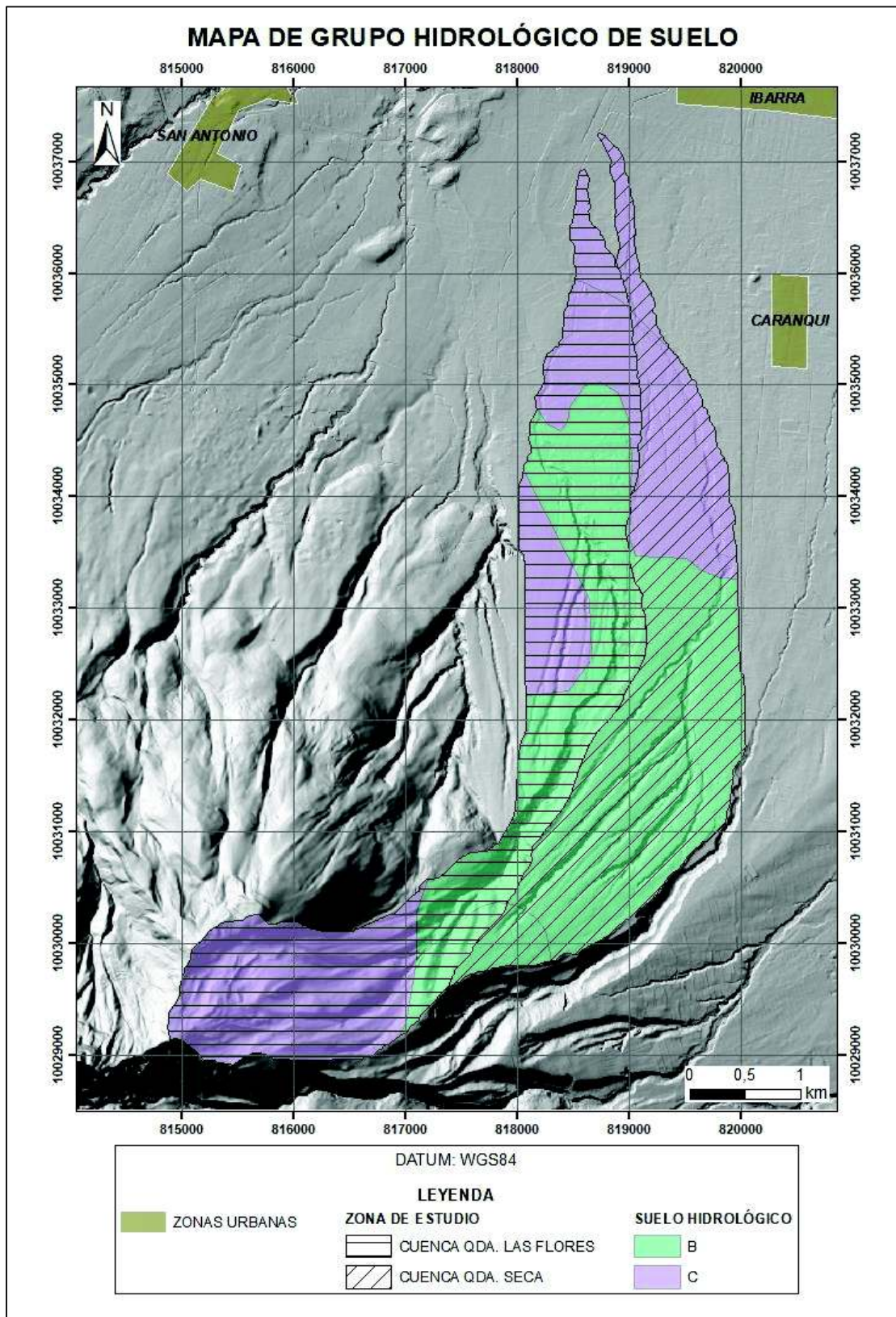


Figura 4. 13 Clasificación de grupo hidrológico del suelo en el área de estudio en función del drenaje, la pendiente y la textura.

La clasificación de suelos según el uso de suelo y cobertura vegetal dio como resultado 17 grupos (códigos de la Tabla 3.7) los cuales tienen diferentes valores de número de curva según el grupo hidrológico de suelo (Tabla 4.14).

Áreas de afloramientos rocosos o que contienen hielo (nieve) tienen valores altos de número de curva lo que indica mayor escorrentía. Áreas de páramos y cultivos tienen los menores valores de número de curva, en estas áreas la infiltración es mayor.

Tabla 4. 14 Valor de número de curva para los 17 grupos establecidos previamente (código) en función de los cuatro grupos hidrológicos de suelo.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	NÚMERO DE CURVA			
			GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
			A	B	C	D
1	Afloramiento rocoso	El agua tiende a escurrir	96	96	96	96
2	Área erosionada	Desiertos naturales	63	77	85	88
3	Área urbanizada	Distrito residencial por tamaño de lote	57	72	81	86
4	Bosque intervenido	Combinación Bosque-Pasto, usado para pastar	43	65	76	82
5	Bosque primario	Usado para pastar. Protegido de incendios	36	60	73	79
6	Cultivos/Área erosionada	Grano pequeño. Factores que aumentan la escorrentía	65	76	84	88
7	Cultivos	Grano pequeño. Factores que disminuyen la escorrentía	63	75	83	87
8	Cultivo de ciclo corto/Área erosionada	Muy sembrado-rotación. Factores que aumentan la escorrentía	66	77	85	89
9	Cultivo de ciclo corto/Frutales	Muy sembrado-rotación. Factores que disminuyen la escorrentía	58	72	81	85
10	Frutales	Combinación árboles-arbustos. Protegidos de incendios	43	65	76	82
11	Nieve o Hielo	No aplica	100	100	100	100
12	Páramo	Páramo-Pradera. Protegido de pastaciones. Usado para heno.	30	58	71	78
13	Pastos cultivados/ Vegetación arbustiva	Pasto, pastizal. No es pastado intensivamente	49	69	79	84
14	Vegetación arbustiva/Cultivos de ciclo corto	Arbustos mezclados con vegetación y pastizales.	35	56	70	77
15	Área erosionada/ Cauce	Espacio abierto (>75% con cobertura vegetal)	39	61	74	80
16	Área erosionada/ Cauce/Canteras	Espacio abierto (<50% con cobertura vegetal)	68	79	86	89
17	Canteras	Espacio abierto/Área Industrial	81	89	91	93

La figura 4.16 muestra la distribución del número de curva en el área de estudio. Usando la ecuación 17 se calcula el valor promedio del número de curva que en la quebrada Seca es 76,66; en Quebrada las Flores- subcuenca alta es de 86,52 y en la subcuenca baja es 80,86. Por la presencia de afloramientos rocosos, la parte superior de la quebrada Las Flores contiene los valores más altos de número de curva.

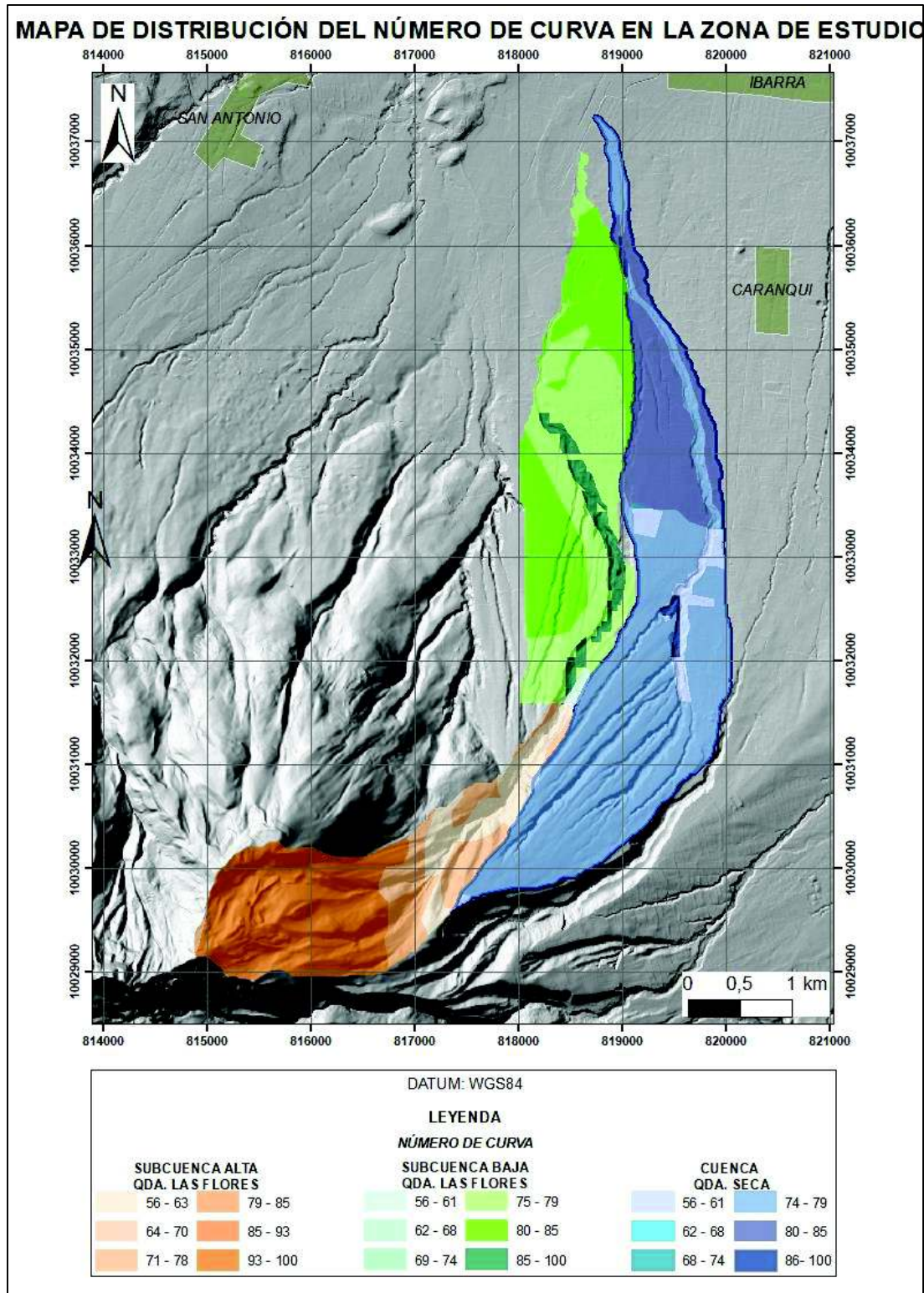


Figura 4. 14 Mapa de distribución del número de curva en el área de estudio.

4.4.5. Cálculo del volumen de agua con HEC-HMS

Con el programa HEC-HMS, y los datos previamente calculados (área de la cuenca, número de curva, tiempo de retardo que se calcula basándose en el tiempo de concentración calculado), caudal base y precipitaciones, se realiza la simulación del comportamiento de las cuencas hidrográficas. Para conocer el volumen total aportado por la cuenca se recomienda generar hidrogramas completos, que incluyen períodos de actividad desde el inicio del evento de precipitación, hasta la recuperación de caudal base. En este caso se realiza la simulación para tiempos iguales a 2, 3, 4 y 5 días. Los resultados obtenidos de la simulación en la quebrada Seca se resumen en la tabla 4.15.

Tabla 4. 15 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Seca con el programa HEC-RAS.

QUEBRADA SECA					
	TR 5años	TR 10años	TR 25años	TR 50años	TR 100años
Descarga Pico (m3/s)	2,0	2,7	4,2	5,7	7,6
Volumen de precipitación (m3)	128600	144200	167600	187800	210400
Volumen de pérdida (m3)	124200	136800	154400	168300	182800
Volumen de exceso (m3)	4400	7400	13200	19400	27600
Volumen base (m3)	120000	132100	149100	162500	176400
Volumen de descarga (m3)	124400	139500	162200	181900	204000



La quebrada Flores fue dividida en dos subcuencas (alta y baja) debido a la presencia de canteras en la subcuenca baja. Cada subcuenca tiene valores independientes de descarga pico, precipitación, volumen de pérdida, volumen de exceso, volumen de flujo base y volumen de descarga (Tabla 4. 18). Mediante la herramienta *Reach*, se unificó los valores caudal y volumen de las dos subcuencas al transitar el agua de la subcuenca alta hacia la cuenca baja, modificando las características del flujo hasta llegar a unirse en el punto de cierre de la subcuenca baja (*Sink*).

Tabla 4. 16 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores, subcuenca alta, con el programa HEC-RAS.

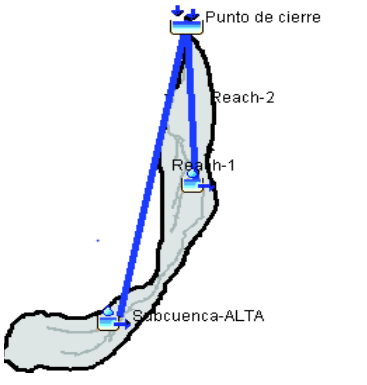
QUEBRADA LAS FLORES- Subcuenca Alta					
	TR 5 años	TR 10 años	TR 25 años	TR 50 años	TR 100 años
Descarga Pico (m3/s)	2,8	4,1	6,5	7,7	11,7
Volumen de precipitación (m3)	50600	57100	67000	81300	85400
Volumen de pérdida (m3)	46900	51500	57800	65800	67900
Volumen de exceso (m3)	3700	5600	9200	15500	17500
Volumen base (m3)	45500	49900	56000	63700	657000
Volumen de descarga (m3)	49200	55500	65200	79200	83200

Tabla 4. 17 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores, subcuenca baja, con el programa HEC-RAS.

QUEBRADA LAS FLORES- Subcuenca baja					
	TR 5 años	TR 10 años	TR 25 años	TR 50 años	TR 100 años
Descarga Pico (m3/s)	2,1	3,0	4,7	6,4	8,6
Volumen de precipitación (m3)	77500	86800	100900	117100	126700
Volumen de pérdida (m3)	73300	80300	90000	100100	105600
Volumen de exceso (m3)	4200	6500	10900	17000	21100
Volumen base (m3)	71200	78000	87400	97100	102300
Volumen de descarga (m3)	75400	84500	98200	114100	123500

Tabla 4. 18 Resultados obtenidos a partir de las simulaciones de comportamiento hidrológico de la quebrada Las Flores con el programa HEC-RAS, usando la herramienta *Reach*, para unificar los datos de las subcuencas.

QUEBRADA LAS FLORES					
	TR 5años	TR 10años	TR 25años	TR 50años	TR 100años
Descarga Pico (m3/s)	4,5	6,5	10,2	13,1	18,7
Volumen de descarga (m3)	124600	140000	163400	193300	206700



4.5. Modelo de flujo de lodos secundario

El modelo de flujos secundarios de lodo se realizó con el módulo *LaharZ* y el programa ArcGis versión 10.2.2. El indicador H/L de este volcán es de 0,305 en el área de estudio, este es un valor promedio ya que los factores para el cálculo son variables. Se usaron los valores de volumen de material sumado al volumen de agua por cada período de retorno (Tabla 4.19). Se crearon archivos de extensión “txt” los cuales contenían los valores de volumen individuales de cada quebrada y de cada período de retorno, en total diez archivos que dieron como resultados diez capas vectoriales que indicaban el alcance de los flujos de lodo.

Tabla 4. 19 Volumen calculado de sólidos añadido al volumen de agua, en los diferentes períodos de retorno.

	VOLUMEN QDA. LAS FLORES	VOLUMEN QDA. SECA	VOLUMEN TOTAL
TR 5 años	140050	130900	270950
TR 10 años	155450	146000	301450
TR 25 años	178850	168700	347550
TR 50 años	208750	188400	397150
TR 100 años	222150	210500	432650

La figura 4.13 muestra el alcance los flujos de cada quebrada para lluvias intensas con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 años. Podemos observar que los flujos de la quebrada Las Flores tienen un alcance mucho mayor a los flujos generados en la quebrada Seca.

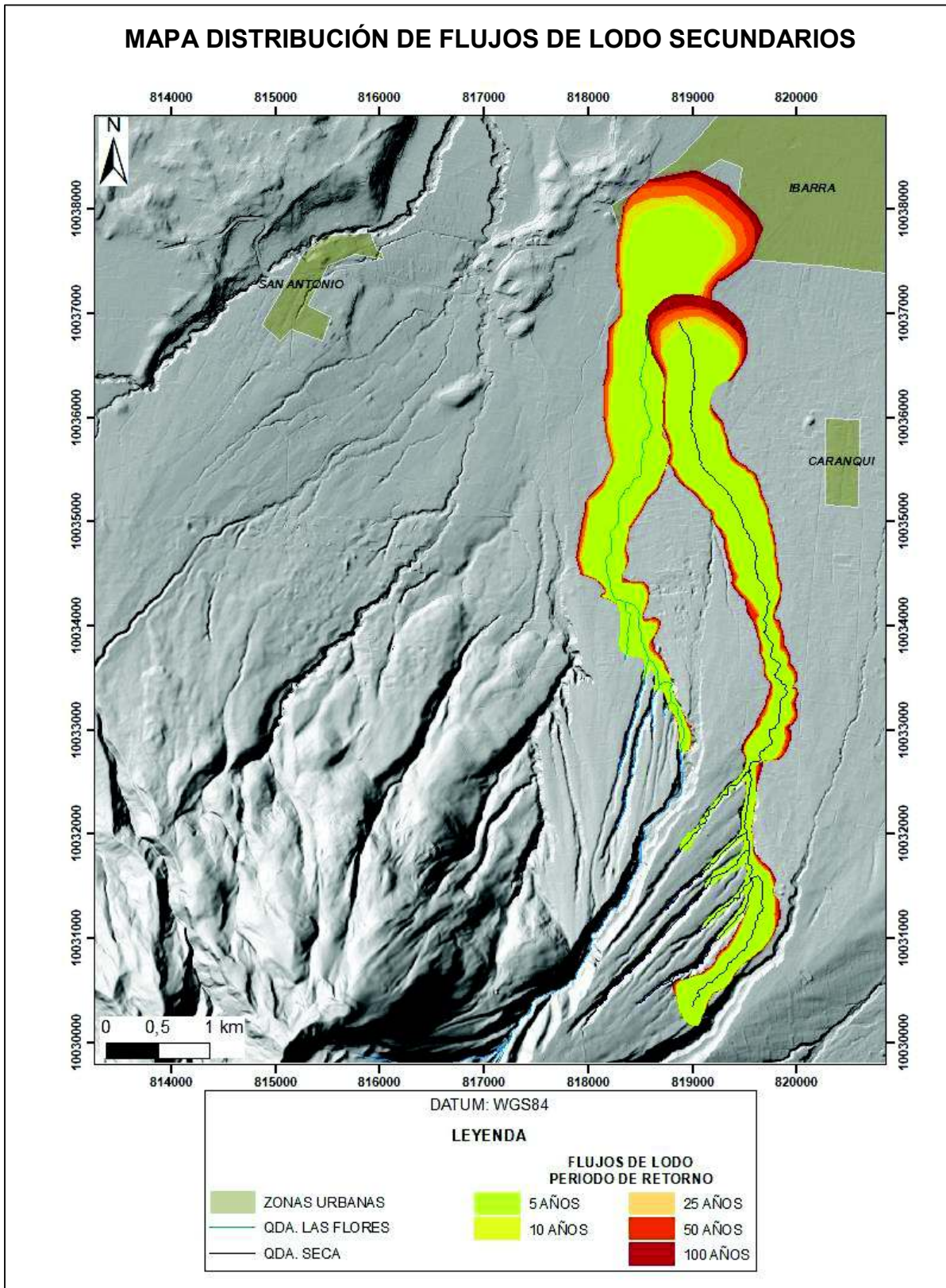


Figura 4. 15 Mapa de distribución de flujos de lodos secundarios generados por lluvias intensas asociados a cinco periodos de retorno.

4.6. Modelo de flujos de lodo: Inundación 2011

Con la información recopilada se generó un mapa de los principales lugares afectados durante el evento de inundación del año 2011 (Anexo 1).

Para generar el modelo del flujo de lodo del mes de abril de ese año, se asumió que el volumen de material sólido sería el mismo que se determinó para los modelos de flujos creados para diferentes períodos de retorno.

El volumen de agua se calcula a partir de datos de precipitación medidos en estaciones cercanas durante el mes de abril del año 2011. Para realizar el cálculo se asumen algunas condiciones similares como el tiempo de concentración, el caudal base y el área de la cuenca. El número de curva se calcula para cada subcuenca en condiciones de humedad antecedente igual a tres (AMC III) asumiendo que el suelo tenía humedad previa ya que el evento ocurrió en época invernal. Para esto se usó la ecuación 19, que dio como resultados los siguientes valores.

- Número de curva en la quebrada Seca: 88,27
- Número de curva en la quebrada las Flores, subcuenca alta: 93,65
- Número de curva en la quebrada las Flores, subcuenca baja: 90,66

Los valores de número de curva son mayores debido a que al estar el suelo saturado previamente la infiltración de agua en el mismo es menor, aumentando la escorrentía.

Durante el mes de abril ocurrieron lluvias con intensidades altas en la ciudad de Ibarra y más específicamente en las cercanías del volcán Imbabura. La estación Mariano Acosta (M0310) registró una precipitación de 39,7 mm en menos de 24 horas el 20 de abril; la estación Cotacachi Hacienda Estercita registró 100,3 mm el 20 de abril en menos de 24 horas y la estación Otavalo registró un valor de 35,7 mm durante el 4 de abril en menos de 12 horas.

Debido a que los principales flujos que bajaron por las quebradas ocurrieron a inicio del mes de abril, se usó como dato de precipitación el valor de 35,7 mm de la estación Otavalo debido a que no existen registros en estaciones más cercanas. Este valor junto con el de número de curva para cada subcuenca, se utilizó como dato de entrada en el programa HEC-HMS,

Con estos datos el programa dio los siguientes resultados de volumen de agua, que fue sumado al volumen de sedimentos calculado:

Tabla 4. 20 Volúmenes de agua del evento de inundación de 2011, calculados en función de la precipitación registrada el 4 de abril en la estación Otavalo.

QUEBRADA	VOL. SEDIMENTOS	VOL. AGUA	VOL. TOTAL
LAS FLORES	15450 m ³	178500 m ³	193950 m ³
SECA	6500 m ³	116900 m ³	123400 m ³

Con estos datos se realizó el modelo de flujos de lodo de cada quebrada, con el programa Lahar-Z, con el que se limitó el flujo en función de los volúmenes de entrada (Figura 4.16).

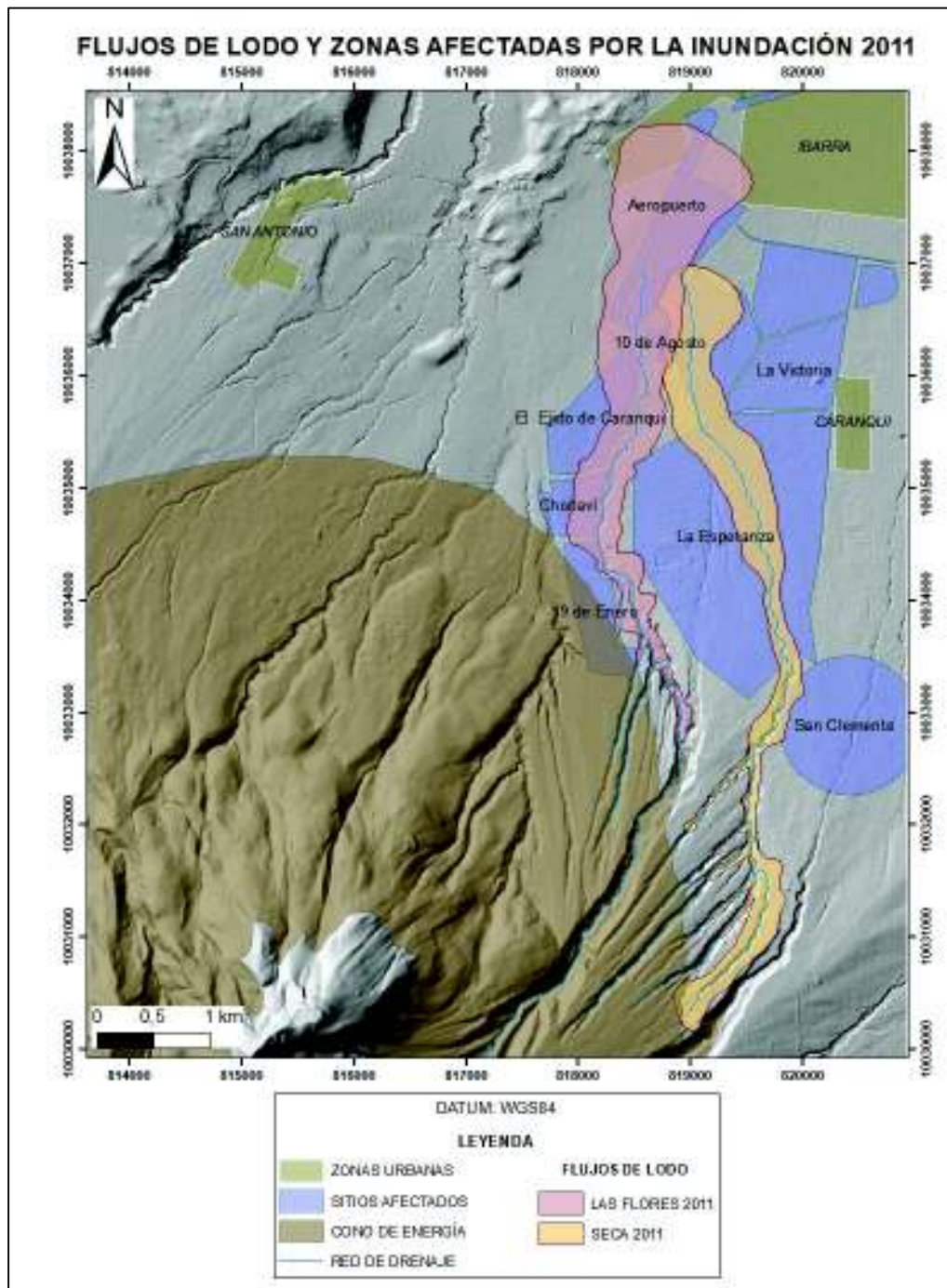


Figura 4. 16 Mapa de flujos de lodo generados por las precipitaciones del mes de abril del año 2011, y zonas afectadas.

5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Los flujos de lodo secundarios son fenómeno de remoción en masa clasificados principalmente en función del volumen de agua, características del material y la velocidad de movimiento. Se definen como flujos de lodo aquellos movimientos en masa cuya actividad ocurre en las laderas de volcanes, remueven material volcánico a su paso y pueden llegar a tener velocidades muy altas. Los flujos de lodo son canalizados a través de las quebradas y sistemas de drenaje de los volcanes, impulsados principalmente por la fuerza de gravedad. Tienen capacidad de incorporar sedimentos y escombros durante su descenso, provocar erosión en el cauce y generar depósitos laháricos que generalmente son matrizsoportados, incluyen bloques de diferentes tamaños y pueden presentar cierta segregación debido a los procesos de selección de partículas.

En el presente estudio se recurrió a la determinación del volumen de agua, a través de análisis hidrológico, y al cálculo del volumen de sedimentos (y otros materiales) de los cauces de las quebradas Seca y Las Flores, para generar modelos de flujos de lodo secundarios y determinar su alcance con determinado volumen y también la frecuencia o el período de retorno que tendrán dichos flujos.

El trabajo de campo incluyó recorridos por los cauces de las quebradas, los cuales además de datos técnicos, nos permitieron de obtener información por parte de los pobladores de la comunidad La Esperanza quienes viven en las cercanías de la quebrada Seca.

La presencia de canteras activas de explotación de material pétreo modifica el paisaje y causan que la cantidad de escombros y residuos sólidos aumente en los cauces de las quebradas. En los sectores de explotación las laderas presentan surcos verticales generados por la caída de agua, esto indica que la presencia de canteras, activas o en estado de abandono, al no tener sistemas de drenaje adecuados, generan zonas inestables e incremento del desgaste y la erosión (Figura 5.1).



Figura 5. 1 Desgaste de taludes en áreas de canteras. Der. Cantera inactiva – Qda. Seca. Izq. Cantera activa Terraza Quebrada Blanca 2 – Qda. Las Flores.

La presencia de vegetación en los taludes del cauce es un factor importante en la valoración de la erosionabilidad de las laderas y se pudo notar que las laderas que están cubiertas por vegetación presentan menor cantidad de depósitos de caída, y en caso de haber depósitos estos son de menor tamaño.

En los cauces de las quebradas se encontraron sitios de botaderos de ladrillos, escombros y basura común, residuos provenientes de tubos de desagüe que caen en las laderas de las quebradas aumentando el caudal líquido de la quebrada y su erosionabilidad. También se observaron estructuras que fueron construidas con el objetivo de mitigar los efectos de las lluvias y el estado en el que se encuentran, muchas están deterioradas ya que no han tenido mantenimiento oportuno y algunas incluso han colapsado (Figura 5.2).



Figura 5. 2 En a) se muestra un botadero de ladrillos y escombros; b) estructura llamada “peinilla” que ha colapsado por falta de mantenimiento; c) un microdique y una tubería que cruza la quebrada Seca.

5.1. Descripción Litológica

Las columnas estratigráficas en las quebradas muestran tres unidades litológicas principales correspondientes a flujos piroclásticos, flujos piroclásticos retrabajados y cangahua. En la parte superior de las quebradas los flujos piroclásticos muestran mayor espesor que puede alcanzar hasta 30 m en la quebrada Seca y 10 m en la quebrada Las Flores, en las áreas observadas. Los depósitos retrabajados se clasificaron en función de sorteo, tipo y cantidad de matriz y forma de los clastos. Los depósitos retrabajados matrizsoportados de mal sorteo, con clastos subangulosos se encuentran sobreyaciendo a los flujos piroclásticos, como intercalaciones o formando parte del relleno de las quebradas. En las terrazas antiguas se observan hasta 2 m de espesor de estos depósitos. En las partes bajas de las quebradas, en alturas menores a 2400 m, se encontraron flujos piroclásticos retrabajados clastosoportados, de sorteo regular a bueno, con bloques subredondeados (conglomerados). Estos depósitos pueden llegar a tener hasta 4 m de espesor. Presentan diferencias en las dos quebradas. En la quebrada Seca muestra intercalaciones de zonas clastosportadas de bloques andesíticos subredondeados a subangulosos (conglomerados) de tamaño centimétrico, zonas enriquecidas en ceniza (de color gris claro) y zonas de cangahua

(color amarillo). En la quebrada Las Flores los depósitos presentan mayor cantidad de clastos (clastosoportado) que los depósitos de la quebrada Seca, los clastos son de mayor tamaño y más redondeados y tienen menor cantidad de capas de ceniza o cangahua (toba) intercaladas. Los depósitos de cangahua son característicos por su color amarillo pardusco, el tamaño fino de la matriz, la escasez de bloques y la dureza. Su espesor alcanza los dos metros en algunos afloramientos.

Por las características de las unidades anteriormente descritas, y la ubicación geoespacial de las mismas, se puede concluir que son parte de la unidad Imbabura II-2 (Andrade, 2009), que se distribuye en el flanco noreste del volcán y se compone de flujos de lava, flujos piroclásticos y flujos retrabajados. Debido a que la cota alcanzada durante el trabajo de campo no superó los 2900 metros de altura, no se encontraron flujos de lavas, pero se reconoció la presencia de bloques andesíticos con fracturas radiales a lo largo del cauce de las quebradas.

5.2. Volumen de los depósitos

Los depósitos de material suelto encontrados en las quebradas tienen una composición de características similares a las unidades anteriormente descritas. Los depósitos más antiguos se reconocen por estar cubiertos de vegetación. En las dos quebradas se observaron depósitos antiguos de gran magnitud, localizados en la base de afloramientos de flujos de bloques y ceniza de gran espesor. Los depósitos de aspecto reciente se componen de suelo, bloques, material limo arenoso y pueden tener material orgánico como restos de plantas. La caída de árboles que han crecido en el borde las laderas provoca que el material se remueva y caiga formando depósitos recientes, los árboles de eucalipto son los que se caen más comúnmente debido a su gran altura y a las raíces largas y gruesas que erosionan el suelo. La erosión en taludes relacionados a canteras es mayor y en algunos casos es constante, los depósitos producidos se componen de material fino como ceniza o arena fina con poca cantidad de bloques. La diferencia de volumen de sedimentos en las dos quebradas es notable (6500 m³ en la quebrada Seca y 15450 m³ en la quebrada Las Flores) y se debe principalmente a la presencia de canteras en la quebrada Las Flores y a procesos de reforestación que se han dado en la quebrada Seca por parte de los moradores de la Comunidad La esperanza.

El uso de DRON y del programa Pix4D permitió obtener valores de mayor precisión que los cálculos realizados en campo debido a la forma irregular de los depósitos.

El volumen total de los depósitos en las dos quebradas no refleja un porcentaje adecuado. En la quebrada Seca el volumen de sólidos representa entre 3 y 5% del total de los volúmenes de flujos de lodo calculados y en la quebrada Las Flores el rango es de 7,5 hasta 12,4%. Ya que los flujos de lodo secundarios (flujos hiperconcentrados) deben tener al menos 40% de material sólido y mediante la información histórica recopilada se conoce que el evento ocurrido en el mes de abril del año 2011 se sabe que el flujo de lodo estaba compuesto por al menos el 30% de material sólido, se concluye que la determinación de los volúmenes de sólidos es inapropiada y esta gran diferencia de valores puede indicar que durante un evento de ocurrencia de flujo de lodo el material removido corresponde a depósitos de material suelto, además de material removido del cauce o de las laderas de las quebradas, a material antrópico localizado en las laderas o a material orgánico como plantas que son removidas durante el movimiento del flujo de lodo.

5.3. Volumen de agua

El volumen de agua calculado corresponde al volumen de precipitación menos el volumen de pérdida por infiltración sumado al volumen producido por el caudal base. Los volúmenes son ligeramente mayores en la quebrada Las Flores, con valores que van desde 124600 m³ hasta 206700 m³, para los diferentes períodos de retorno. En la quebrada Seca los valores de volumen de agua van desde 124400 m³ hasta 204000 m³. Esta similitud se debe principalmente a que el tipo y uso de suelo en las dos cuencas es muy parecido, por lo que la capacidad de infiltración es similar, lo que se puede comparar en función del número de curva. La quebrada Seca tiene un valor de número de curva de 76,6 y la quebrada Las Flores tiene un valor de número de curva de 80,86 en la subcuenca baja y 86,52 en la subcuenca alta. La similitud entre los volúmenes calculados podría deberse también a factores morfológicos y topográficos como los valores de las pendientes de los cauces que en la quebrada Seca es de 9,3%, mientras en la quebrada Las Flores tiene valores entre 25% (en la parte alta) y 8,2% (en la parte baja). La corta diferencia entre los volúmenes podría deberse al caudal base que en la quebrada Las Flores muestra un valor mayor (0,005 m³) en comparación a la quebrada Seca (0,0025 m³). También se debe a la diferencia en los valores de volumen de material suelto y a las características de los depósitos. Estas variables están estrechamente relacionadas con la presencia de canteras, las cuales empobrecen el suelo y las laderas al no tener vegetación, generan material suelto y depósitos y modifican la morfología de las quebradas.

Para la determinación de volumen hídrico se necesitaron calcular o medir varios parámetros y por la falta de datos pluviométricos, estudios hidrológicos y de suelos cercanos a la zona de estudio, los resultados no muestran datos completamente cercanos a la realidad. La estación hidrometeorológica más cercana fue la ubicada en el Aeropuerto de Ibarra, pero no cuenta con una serie de datos completa, además, esta estación hidrometeorológica muestra datos de precipitaciones cercanos a los puntos de cierre de las quebradas los cuales no representan las características en la cima del volcán, donde inicia el evento.

El cálculo tiempo de concentración, descrito en la sección 4.4.1, resulta en diferentes valores con los diferentes métodos debido a que cada método usa parámetros diferentes (área, longitud, pendiente) y ha sido establecido según características propias de cada cuenca hidrográfica y la experticia de cada autor. Se escogió el tiempo de concentración calculado con la fórmula de Kirpich debido a que es el más usado en el Ecuador por las características similares que presenta entre las cuencas hidrográficas estudiadas por el modelo y las cuencas hidrográficas del país. El cálculo de precipitación se llevó a cabo usando la distribución de precipitaciones propuesta por Huff usando los valores de la mediana del segundo cuartil, para cuencas puntuales. Se escogió este método por ser el que crea una distribución con mayor semejanza a la realidad de la Ciudad de Ibarra, es decir, concentra la mayor cantidad de volumen de precipitación poco después del inicio de la precipitación disminuyendo notablemente a partir de la mitad tiempo de duración del evento de lluvia. El volumen de agua calculado es el mismo independientemente del cuartil utilizado para realizar la distribución de la precipitación ya que el método solo distribuye la lluvia en el tiempo, pero no controla la cantidad de agua que escurre por el cauce de la quebrada.

El programa HEC-HMS exige datos de entrada específicos, dependiendo del modelo de cálculo escogido, los cuales, en este caso, no fueron medidos o calculados, por lo que los resultados pueden alterarse. Utilizando el método de pérdida “SCS *Curve Number*”, se debe ingresar el dato de entrada “*Impervious (%)*” que indica un porcentaje de la superficie del área de estudio que es completamente impermeable. Este dato comprende generalmente valores bajos, menores a 3, debido a que son áreas que ya se debieron incluir en el cálculo del número de curva. Si se realizan cálculos con valores altos, el valor del volumen de descarga puede modificarse significativamente. Algo similar ocurre con el cálculo del flujo base cuando se utiliza el método “*Linear Reservoir*”, en el cual es necesario ingresar un valor de “*GW Coefficient*” el cual representa el tiempo (en horas) que tarda el agua a través de las capas de la tierra, alcanzar, de ser al caso, los acuíferos, y regresar al caudal

superficial. Este dato de entrada modifica principalmente el caudal o descarga pico de la cuenca, de tal forma que, si el valor de este coeficiente es muy bajo, el caudal pico será alto, y viceversa.

5.4. Modelos de flujos de lodo secundarios generados

Los volúmenes de agua calculados son muy altos en comparación al volumen de sólidos que forman los flujos de lodo, esto puede deberse a que en el modelamiento de los flujos de lodo secundarios con el programa Lahar Z se ingresó el volumen total que aporta la cuenca, desde la parte alta hasta el punto de cierre de cada quebrada, es decir, el volumen de escorrentía directa, el volumen base y el volumen de agua subterránea que fue infiltrada, almacenada y después escurrida hasta que el suelo recupere su humedad base. Para futuros estudios será necesario limitar el volumen de agua en función de la duración del evento de lluvia hasta la ocurrencia de un lahar, y a la duración de evento mismo.

Los modelos de flujos de lodos secundarios no presentan variaciones notables con respecto al alcance geográfico que éstos tienen. Los flujos de lodo generados en la quebrada Seca alcanzan el inicio del actual parque Ciudad Blanca, entre las calles Camilo Ponce y el Corredor Periférico Sur. Los flujos generados en la quebrada Las Flores alcanzan mayores distancias (al menos 1000 metros) llegando hasta las cercanías del Redondel de la Madre.

El alcance de los flujos de lodo modelados con el programa Lahar Z depende del inicio del flujo de lodo (que corresponde a la intersección de un cono de energía con la red hídrica) y del volumen que generará el flujo. Variaciones en estos parámetros crean imprecisiones en los modelos generados. Como se indicó antes, los volúmenes ingresados no son adecuados. Además, es necesario tomar en consideración que los volúmenes fueron calculados hasta el punto de cierre de cada cuenca, 2220 metros de altura en la quebrada Seca y 2226 metros de altura en la quebrada Las Flores, mientras los modelos son generados desde una altura de 2954 metros en la quebrada Seca y 2550 metros en la quebrada Las Flores (Figura 5.3). Esta diferencia de cotas genera errores en los modelos ya que Lahar Z es un programa que muestra zonas de deposición de los flujos de lodo y no zonas de erosión. En su modelamiento no presenta la variación del flujo con respecto al tiempo de duración y no considera en su proceso los aportes de volumen que pueden presentarse y adicionarse al flujo de lodo durante su movimiento, como sería el caso en los modelos generados.

5.5. Comparación de los modelos de flujo de lodo secundarios generados con el evento ocurrido en abril del año 2011

Los principales sitios afectados por la inundación del año 2011 fueron el puente del barrio El Ejido de Caranqui, la plaza Municipal Rumipamba, barrios como San Cristóbal, 19 de enero y el principal elemento afectado fue el parque Ciudad Blanca, en el cual se ubicaba el aeropuerto. En la Figura 5.3 se comparan los principales sitios afectados por la inundación ocurrida en el año 2011 y el alcance de los flujos de lodo generados durante esta investigación dando como resultado que el evento de ese año es compatible con eventos de lluvias intensas con períodos de retorno iguales a 10 o 25 años. A pesar de las imprecisiones anteriormente discutidas, se puede notar que, al comparar los modelos de los flujos de lodo generados a partir de datos teóricos, en los cinco períodos de tiempo, con el modelo de flujos de lodo ocurrido en el mes de abril del año 2011 (Figura 5.4) se observa que el este último tiene mayor similitud con los flujos cuyo período de retorno es 10 años, para la quebrada Seca, y 25 años, para la quebrada Las Flores.

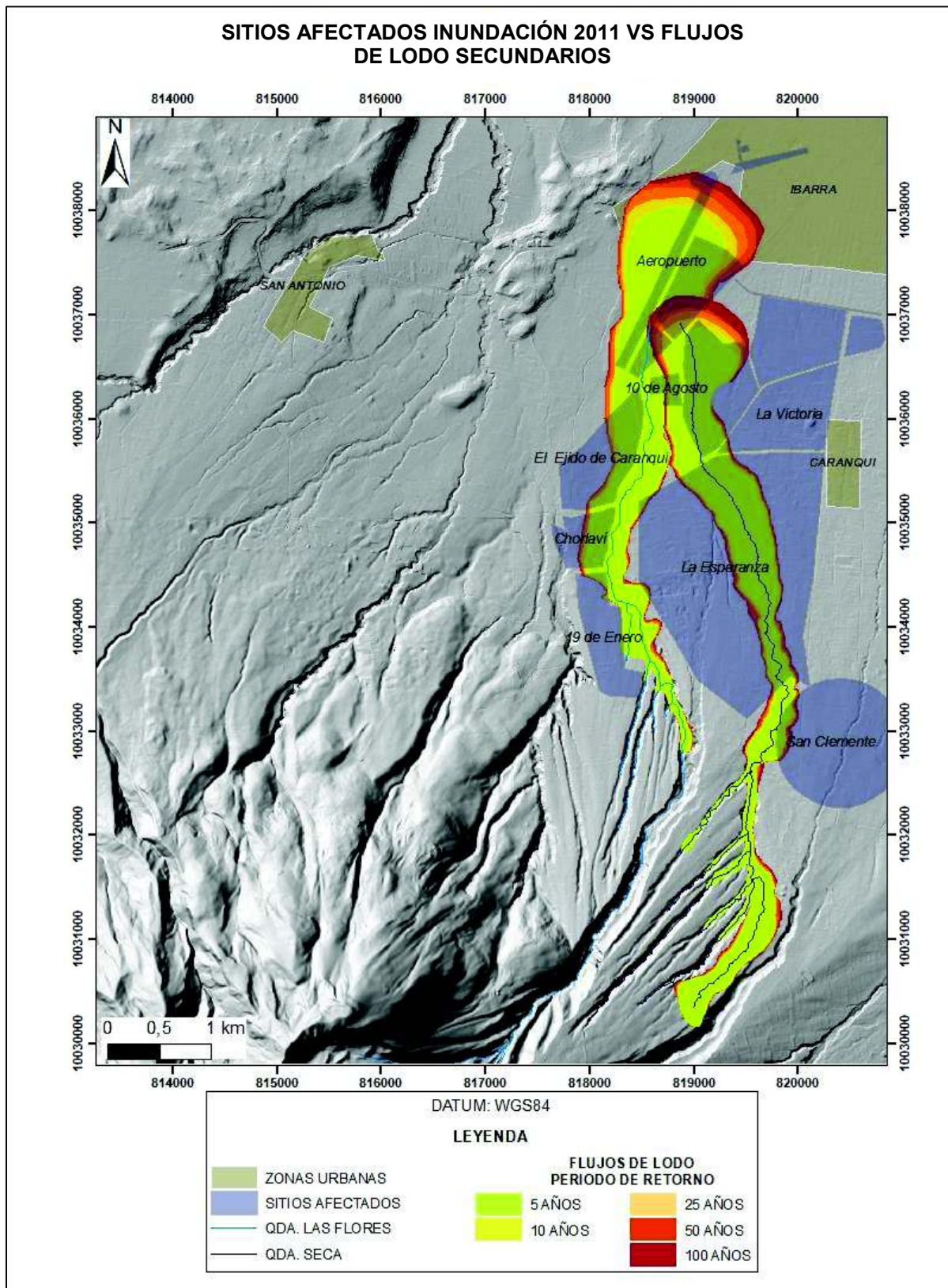


Figura 5. 3 Comparación de las áreas afectadas durante la inundación ocurrida en el año 2011, con los modelos de flujos de lodo secundarios generados teóricamente.

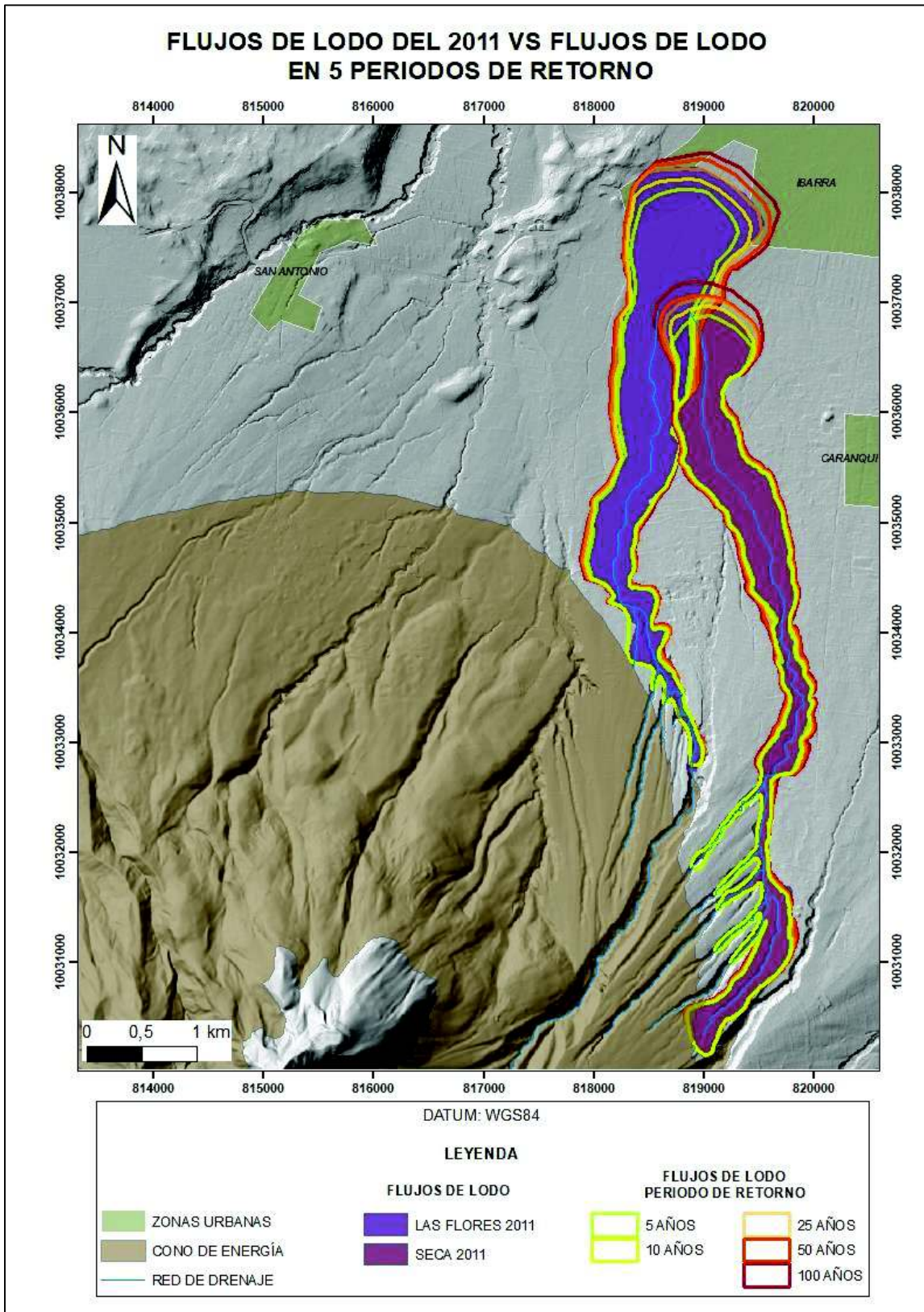


Figura 5. 4 Comparación de los modelos de flujos de lodo generados a partir de datos teóricos, con el modelo de flujo de lodo ocurrido en abril del año 2011.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La Ciudad de Ibarra, al estar localizada en las faldas del volcán Imbabura, está en constante peligro de ocurrencia de un evento catastrófico. Además, las intensas lluvias a las que es sometida durante el período de invierno han hecho que los deslizamientos y las inundaciones sean las mayores amenazas para la población.

Las unidades encontradas en las quebradas y representadas en las columnas estratigráficas, indican que el sector corresponde a la unidad Imbabura II-2 cuya principal característica es la presencia de depósitos de eventos sucesivos de flujos piroclásticos de gran espesor. Ahí se pueden encontrar flujos de bloques y ceniza, flujos retrabajados como lahares y depósitos aluviales antiguos, y cangahua. En la zona de estudio no se encontraron flujos de lava.

Para realizar el modelo de flujos de lodo secundarios fue necesario conocer el volumen de sedimentos que está en los cauces de las quebradas y que pueden ser fácilmente removidos durante un evento, y el volumen agua que puede ser agregado debido a la ocurrencia de lluvia intensa.

Los flujos generados en las quebradas ocurren por lluvias intensas que remobilizan material de depósitos de caída que se ubica en los bordes del cauce, material del cauce y de las laderas que es desprendido y arrastrado y agregado al flujo de lodo, material orgánico como vegetación y material inorgánico de origen antrópico. En algunos casos el agua se represa en las partes altas de las quebradas y es liberada con mayor fuerza por lo que aumenta su poder de arrastre.

El cálculo de volumen de sedimentos se realizó mediante trabajo de campo y con el uso de un DRON del Departamento de Vehículos No Tripulados de la EPN y el programa de procesamiento de imágenes Pix4D. Los volúmenes de sedimentos son mayores en la quebrada Las Flores (15400 m³) que en la quebrada Seca (6500 m³). Los principales materiales que pueden ser removidos durante un evento de flujo de lodo corresponde a flujos piroclástico y flujos piroclásticos retrabajados

El cálculo del volumen hídrico integra parámetros que pueden ser muy variables y que en su mayoría son datos obtenidos a partir de ecuaciones empíricas o por métodos estadísticos, y no a mediciones directas. El tiempo de concentración se calculó con el método de Kirpich debido a que es el más usado en el Ecuador y por ser el más adecuado para cuencas rurales de menor tamaño. La discretización de datos de

precipitación se realizó con los datos de curvas de Huff, utilizando el valor de la mediana del segundo cuartil. En base a estos parámetros se calcularon valores de volumen para precipitaciones con diferentes períodos de retorno (5,10, 25, 50 y 100 años) dando como resultado valores de volumen que en la quebrada Las Flores van desde 124600 m³ hasta 206700 m³, mientras en la quebrada Seca los valores de volumen de agua van desde 124400 m³ hasta 204000 m³.

No existen grandes diferencias en los volúmenes de los flujos de la quebrada Seca en comparación a los flujos de la quebrada Las Flores esto se atribuye a factores como la infiltración de los suelos, que se expresa en función del número de curva. Las ligeras diferencias se deben al caudal base de las quebradas al volumen de material suelto y a las características de los depósitos de este material. Todas estas variables están estrechamente relacionadas con la presencia de canteras en la quebrada Las Flores, las cuales empobrecen el suelo y las laderas al no tener vegetación, generan mayor cantidad de depósitos de material suelto y modifican la morfología e hidrología de la quebrada.

Los alcances en los modelos de los flujos de lodo generados indican que estos impactan principalmente al parque Ciudad Blanca, siendo las lluvias con menor período de retorno las que generan flujos con un alcance menor.

Los modelos generados no representan con precisión la realidad de los flujos de lodo generados debido a la irregularidad en los volúmenes calculados y al uso inadecuado del programa Lahar Z.

El volumen del material es muy bajo en comparación a volúmenes necesarios para generar flujos de lodo, esto se debe a que el volumen de sólidos se calculó solamente en base a los depósitos de material suelto que están en las laderas de las quebradas sin tomar en cuenta otros materiales que podrían ser añadidos durante un evento. El volumen de agua, en cambio, es mucho mayor al esperado debido a que para su cálculo se tomó en cuenta todo el aporte de las cuencas, el cual sobrepasa al volumen que sería aportado durante un evento de lahar.

El uso del programa Lahar Z no es adecuado para realizar los modelos con estos parámetros ya que no considera la variación que el volumen del flujo de lodo puede tener durante su movimiento por las quebradas.

La inundación ocurrida en el año 2011 causó graves impactos a la ciudad de Ibarra. Las lluvias intensas ocurridas al inicio del año y que aumentaron en el mes de abril generaron flujos de lodo que arrastraron material por los cauces de las quebradas y

que provocaron daños estructurales, pérdidas económicas y pérdidas de vidas humanas. Este evento generó conciencia en la población y en sus dirigentes por lo que se realizó el proyecto de Control de Inundaciones para la Ciudad de Ibarra, pero la falta de compromiso con los resultados del estudio y con las medidas de mitigación propuestas, ha hecho que la amenaza por inundaciones en la Ciudad de Ibarra no sea controlada.

Este evento serviría para comparar los modelos de flujos de lodo generados de forma teórica. Comparando el mapa de sitios afectados y el modelo de flujo de lodo creado con datos de precipitaciones medidas durante el mes de abril del año 2011, con los modelos creados en este estudio, se puede deducir que los flujos de lodos generados por lluvias intensas con períodos de retorno de 10 y 25 años son más compatibles con dicho evento, mientras que los flujos que serían generados con períodos de retorno mayores (50 y 100 años) podrían afectar sectores más alejados y posiblemente colapsarían el colector Ajaví.

6.2. Recomendaciones

Mejorar la calidad de los datos de precipitaciones en la ciudad de Ibarra. Debido a la variedad de microclimas en el cantón y a la exposición que tiene ante eventos como inundaciones, deslizamientos o flujos de lodo, es importante conocer las características hidrometeorológicas de los diferentes sectores, teniendo como prioridad áreas aledañas a quebradas, ríos, y a poblados ubicados en las faldas del volcán, por lo que sería de vital importancia aumentar la red de pluviómetros y pluviógrafos en el cantón, y principalmente en las partes altas del Complejo Volcánico Imbabura.

Realizar análisis meteorológicos e hidrológicos que permitan tener un mayor conocimiento del comportamiento de las subcuencas en el área, estableciendo el uso normado de modelos probabilísticos y estadísticos necesarios para futuros estudios. Por ejemplo, se puede establecer un modelo de tiempo de concentración adecuado para la zona de estudio en particular, mejorar los modelos de distribución de lluvias, generar mapas de uso de suelo y cobertura de mayor escala, establecer valores de infiltración del suelo y realizar estudios de mecánica de suelo para conocer su resistencia. Además, sería necesaria la implementación de una estación hidrometeorológica en la parte alta del volcán que permitan conocer el comportamiento en esa área de las cuencas que puede variar significativamente en comparación al comportamiento en las partes bajas de las mismas.

Para futuros estudios se recomienda utilizar un programa que permita generar modelos de flujos de lodo, tomando en consideración las variaciones que estos pueden tener durante su movimiento. Además, es aconsejable limitar el volumen de agua de tal forma que no incluya toda el agua que la cuenca contribuye, sino que se tome consideración solo el volumen de agua que será aportado al flujo de lodo, y extrapolar el volumen de sedimentos para que el flujo de lodo tenga una concentración mayor al 40%.

Realizar informes detallados de los eventos de inundación o deslizamientos importantes que ocurran dentro del cantón, principalmente en zonas aledañas al volcán. Los informes deberían incluir su ubicación específica, el alcance temporal y espacial del evento, la afectación (a la población y a la infraestructura), los métodos de mitigación y la respuesta de la población ante dichos eventos.

La presencia de canteras en el cauce de las quebradas modifica su comportamiento ante eventos de lluvias intensas. Por esto es necesario regular el número de canteras, el alcance de su extracción, la forma de extracción utilizada, la disposición de los desechos y reforestación del área que debería ser obligada en todos los casos.

La reforestación en los cauces de las quebradas puede mejorar el estado de los taludes y la erosionabilidad de los mismo. Es importante llevar a cabo el proceso de reforestación con vegetación propia del lugar, la cual se adaptará mejor a la zona en comparación a plantas extranjeras, como los eucaliptos, que por sus características pueden generar mayor desestabilización y depósitos de material en los cauces.

En los procesos de mitigación y remediación, hacer parte activa a las comunidades aledañas a las quebradas, ya que su experiencia y conocimiento del área permitirá tomar decisiones congruentes con sus necesidades y útiles para la disminución de eventos desastrosos.

Realizar mantenimiento a las obras de control estructural que se han hecho en el cauce de las quebradas, y revisar las características hidráulicas de las mismas en función de los estudios técnicos realizados, para no sobrepasar su alcance y mejorara su rendimiento. Tomar en cuenta las medidas de control recomendadas en el estudio Análisis de Flujo en el Canal Ajaví (Checa, 2013).

Es necesario realizar limpiezas a los colectores de agua, canales de riego, alcantarillas y otros sistemas de drenaje, con el fin de mejorar su capacidad para transportan el agua de escorrentía de lluvias intensas.

Se debe limitar la densidad poblacional en las cercanías de las quebradas ya que, además de aumentar la vulnerabilidad ante eventos desastrosos, el aumento de población genera mayor volumen de desperdicios que muchas veces llegan a los cauces de las quebradas, así mismo, al no contar con sistemas de alcantarillado o de agua potable adecuados, los residuos hídricos generados por la población aumentan el caudal base de las quebradas aumentando la probabilidad de ocurrencia de un evento y tal vez, su magnitud.

Es necesaria la coordinación entre entidades, instituciones y población para disminuir su vulnerabilidad. Crear políticas que permitan priorizar medidas de prevención en lugar de medidas de mitigación. Esto incluye medidas de prevención de desastres (estructurales y no estructurales), sistemas de información a la población, por lo que es necesario un sistema de alertas, y educar a la población para que sepan cómo actuar en caso de ocurrencia de un evento.

Es necesario mejorar el Departamento de Gestión de Riesgos de la Ciudad de Ibarra, dotándolo de equipos, principalmente medios de transporte, y personal capacitado que pueda atender las emergencias de forma oportuna.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM). (2017). Catastro Minero, 15 de abril del 2017.
- Almeida, I., Almeida , A., Anache, J., Steffen, J., & Alves, T. (2014). Estimation on time on concentration of overland flow in watersheds: a review. *Sao Paulo, UNESP, Geociencias*, 661-671.
- Andrade, D. (2009). *The influence of active tectonics on the structural development and flank collapse of Ecuadorian arc volcanoes. (Doctoral Thesis). University of Blaise Pascal.*
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa - Grupo Noriega Editores.
- Aspden, J., & Litherland, M. (1992). The geology and the Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics (205)*.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. Grupo de Investigadores en Transporte de Sedimentos.
- Beltrán, F. (1995). *Investigación de Hietogramas Críticos y Evaluación del Efecto de Simultaneidad de Tormenta en Quito*. Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- Casagrande, A. (1936). Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 13-32.
- Checa, S. (2013). *Análisis del Flujo en el Canal Ajaví, Drenaje Principal de la Ciudad de Ibarra*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil. Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.
- Chow, V. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. A compendium of Water Resources Technology. McGraw Hill.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Publishing Company.
- Clark, C. O. (1946). Storage and the Unit Hydrograph. *American Society of Civil Engineers*, 1419-1486.
- Collot, J., Michaud , F., Alvarado , A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., & Pazmiño , A. (2009). Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-sur de Colombia: implicaciones sobre la transferencia

de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carneige. *Geología y Geofísica Marina del Ecuador*, 29-56.

Conservation Engineering Division (CED). (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Cruden, D. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, París.

Donoso, E. (2012). *Análisis del Sistema Ambiental según la Metodología de Senplades como Aporte a la Planificación y el Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Ibarra*. Disertación previa a la obtención del título de Ingeniería en Ciencias Geográficas y Desarrollo Sustentable. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito-Ecuador.

Duque, P. (2000). *Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador*. Quito.

El Norte - Diario Regional Independiente. (30 de Abril de 2011). Las intensas lluvias son monitoreadas. págs. http://www.elnorte.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=5137:las-intensas-lluvias-son-monitoreadas&catid=58&Itemid=539.

El Norte - Diario Regional Independiente. (Febrero de 2011). Les sorprendió la inundación. págs. <http://www.elnorte.ec/ibarra/actualidad/2315-les-sorprendio-la-inundacion.html.html>.

El Universo. (Miércoles, 06 de Abril de 2011). Aluvión arrasa casas y deja 2 muertos y una desaparecida. págs. <https://www.eluniverso.com/2011/04/06/1/1447/aluvion-arrasa-casas-deja-2-muertos-desaparecida.html>.

El Universo. (23 de Febrero de 2011). Barrios de Ibarra y Riobamba intransitables por agua y lodo. <https://www.eluniverso.com/2011/02/23/1/1447/barrios-ibarra-riobamba-intransitables-agua-lodo>.

El Universo. (06 de Abril de 2011). Cuatro casas destruidas y cerca de 50 afectadas gravemente en Imbabura. págs. <https://www.eluniverso.com/2011/04/06/1/1447/cuatro-casas-destruidas-cerca-50-afectadas-gravemente-imbabura.html>.

GAD San Miguel de Ibarra. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra 2015-2023. Imbabura, Ecuador.

- Giandotti, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. . *Istituto Poligrafico dello Stato*, 107–117.
- Grupo de Estándares para Movimientos en Masa-GEMMA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas.
- Huff, F. A. (1967). Time Distribution of Rainfalls in Heavy Storms. *Water Resources Research*. 1007-1019.
- Huff, F. A. (1990). Time Distribution of Heavy Rainstorms in Illinois. *Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173*.
- Huff, F., & Vogel, J. (1976). Hydrometeorology of Heavy Rainstorms in Chicago and Northeastern Illinois, Phase I - Historical Studies. *Illinois State Water Survey, Urbana, Report of Investigation 82*.
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., & Hutchinson, J. (2001). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*.
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., & Hutchinson, J. (2001). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 221-238.
- INAM-HIDROSERVICE. (1995). *Estudio de Factibilidad y Diseños Definitivos del Sistema de Alcantarillado Mixto para la Ciudad de Ibarra*. Ibarra.
- INGECONSULT CIA. LTDA. (2012). *Diagnóstico y Diseño Definitivo del Sistema de Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Servidas para la Ciudad de Ibarra*. Ibarra.
- INGECONSULT CIA. LTDA. (2012). *Estudio para el Control de Inundaciones de la Ciudad de Ibarra*. Ibarra.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2005). *Estudio Hidrológico del Río Mira*. Gestión Hidrológica-Estudios e Investigaciones Hidrológicas. Quito-Ecuador.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2011). *Anuario Meteorológico N° 51-2011*. Dirección de estudios , investigación y desarrollo hidrometeorológico. Quito-Ecuador.

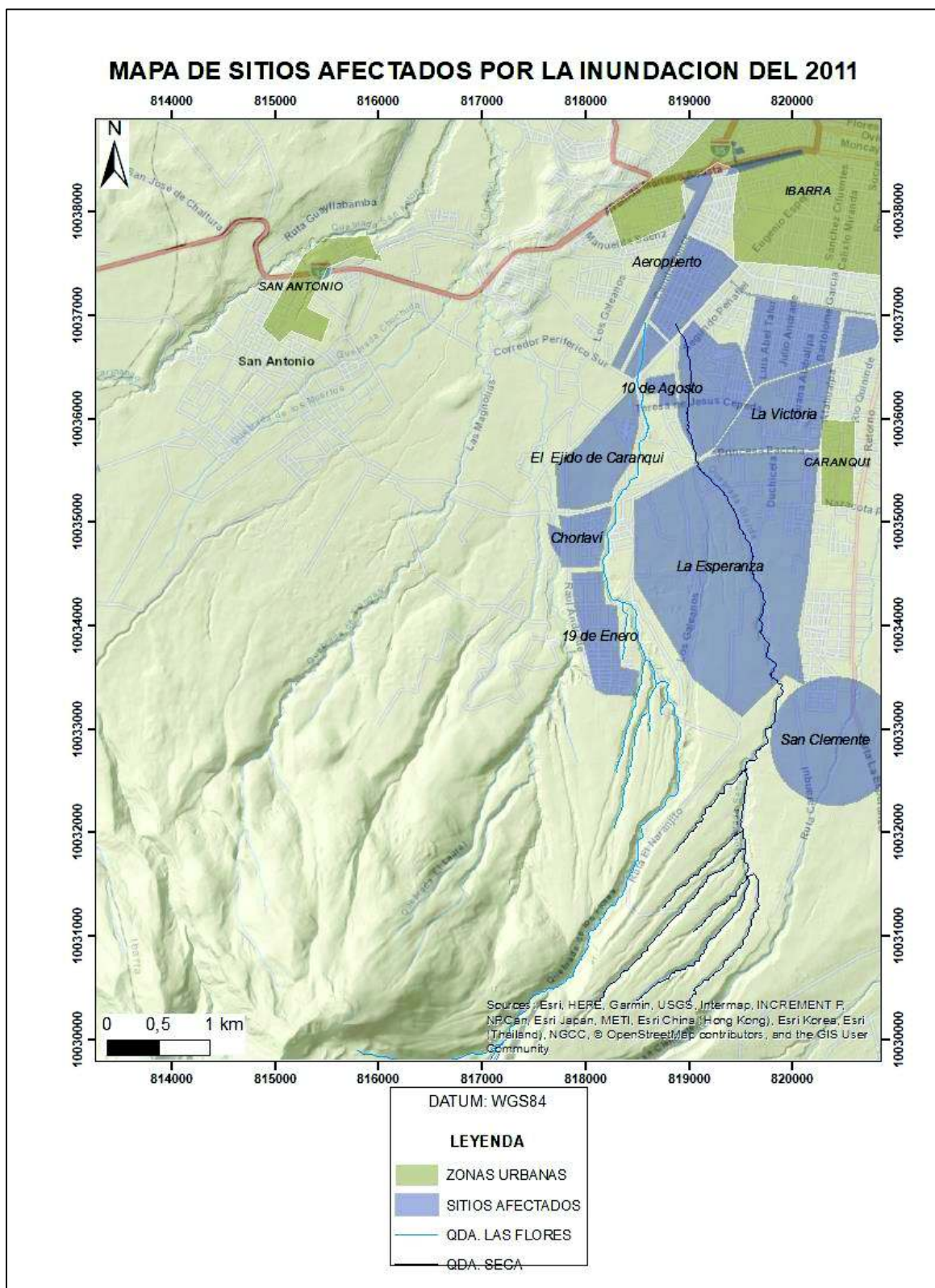
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación: Actualización del Estudio de Lluvias Intensas. Quito-Ecuador.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2018). *Boletín Meteorológico Abril, 2018- Análisis Climatológico*. Dirección de estudios , investigación y desarrollo hidrometeorológico. Quito-Ecuador.
- Jaillard, E., Sempere, T., Soler, P., Carlier, G., & Marocco, R. (1995). The role of Thetys in the evolution of the Northern Andes Late Permian and Late Eocene times. *New York: Plenum Press*, 463-492.
- Kaufmann, I., Ayach, J., Kaufmann, A., Steffen, J., & Alves, T. (2015). Estimation of Time Concentration of Overland Flow in Watersheds: A Review. *Geociencias*, 661-671. .
- Kirpich Z.P. (1940). Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. En *Engineers' Notebook: Ingenious Suggestions and Practical Data Usefull in a Variety of Engineering Problems* (pág. 360).
- La Hora. (19 de Febrero de 2011). Canteras: tres zonas afectadas. <http://lahora.com.ec/noticia/1101097669/canteras-tres-zonas-afectadas>.
- La Hora. (Mayo de 2017). Escorrentías, proyecto para controlar inundaciones en Ibarra aún no está terminado. págs. <https://lahora.com.ec/noticia/1102057508/escorrentc3adas-proyecto-para-controlar-inundaciones-en-ibarra-ac3ban-no-estc3a1-terminado>.
- Le Pennec, J., Ruiz, A., Eissen, J., Hall, M., & Fornati, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121-135.
- Litherland, M., Aspden, J., & Jemielita, R. (1994). *The Metamorphic Belts of Ecuador*. British Geological Survey. Overseas Memoir.
- Llamas, & Llamas, J. (1993). *Hidrología General*. Edición española: Universidad del País Vasco.
- Martínez, R., Calderón, M., Camacho, N., Luque, D., Somoza, A., & Tejada, I. (2006). *Programa de Vigilancia de la Cobertura Vegetal-Región Oriental de la Cuenca del Canal de Panamá*. Convenio de Cooperación ANAM – ACP. Monitoreo de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.

- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP). (2003). *Inventario de Recursos Naturales - 1:250000*. Geoportal del Agro Ecuatoriano.
- Mothes, P., & Vallance, J. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. *Elsevier - Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*, 141-168.
- Natural Resources Conservation Services - NRCS. (2004). *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*. Hydrology National Engineering Handbook - Chapter 10. United States Department of Agriculture.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión de Riesgo de Desastres - Una Guía*. FAO - División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía.
- Pilgrim D.H. (1989). Regional methods for estimation of desing floods for small to medium sized drainage basins in Australia. *New Directions for Surface Water Modeling* , 247-260.
- Pourrut, P. (1983). *Los Climas del Ecuador - Fundamentos explicativos*. Convenio ORSTOM-PRONAREG. Quito-Ecuador.
- Rallison, R., & Miller, N. (1982). *Rainfall-Runoff Relationship: Past, Present and Future SCS Runoff Procedure*. Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Ruiz, G. A. (2003). *Estudio Geovolcanológico del Complejo Volcánico Imbabura*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Geólogo. Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.
- Salvador, J. (2013). *Análisis Comparativo de los Métodos de Cálculo del Tiempo de Concentración en la Red de Alcantarillado en el Campus Universitario*. Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil. Universidad Central del Ecuador, Quito-Ecuador.
- Schilling, S. (2014). *Lahar_py: GIS Tools for Automated Mapping of Lahar Inundation Hazard Zones: U. S. Geological Survey*. Open-File Report 2014. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073>.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Boletín de Prensa: 148 años del "Terremoto de Ibarra"*.

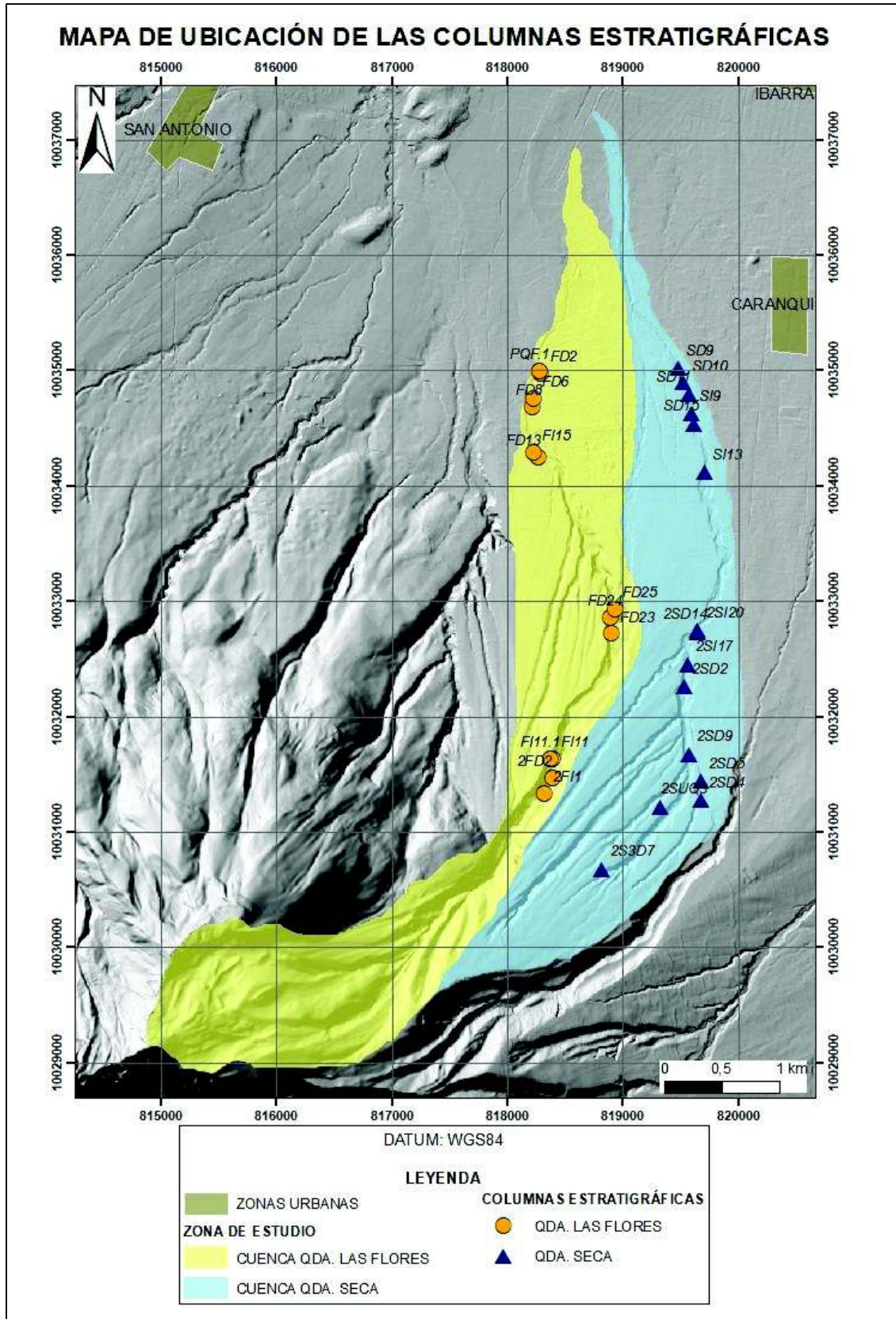
- Soil Science Division Staff - USDA. (2017). *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook No. 18 - Chapter 3. United States Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff - USDA. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Segunda Edición. Washington D.C.
- Spikings, R., Winkler, W., Seward, D., & Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *ELSEVIER-Earth and Planetary Science Letters* 186, 57-73.
- Témez, J. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. Madrid, España. Dirección General de Carreteras. Nueva versión 1987.
- U. S. Army Corps of Engineers: Hydrologic Engineering Center. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual.
- Vallance , J., & Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 649-664.
- Vallance, J. (2000). Lahars. *Encyclopedia of Volcanoes*, 601-616. USA: Academic Press.
- Vallance, J. (2005). Volcanic Debris Flows. *Praxis-Springer. Debris Flow Hazards and Related Phenomena*, 247-274.
- Vallejo, C. (2007). Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene). *Tesis de Doctorado-ETH (Suiza)*.
- Varnes, D. (1978). Slope movements, types and processes. *Lansslide analysis and control*, 9-33.
- Villagómez, D. (2003). *Evolución Geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (Zona Quito-Guayabamba-San Antonio)*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Geólogo, EPN, Quito-Ecuador.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Ableggen, P., Tobler, S., & Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Science* 19, 5-19.

ANEXOS

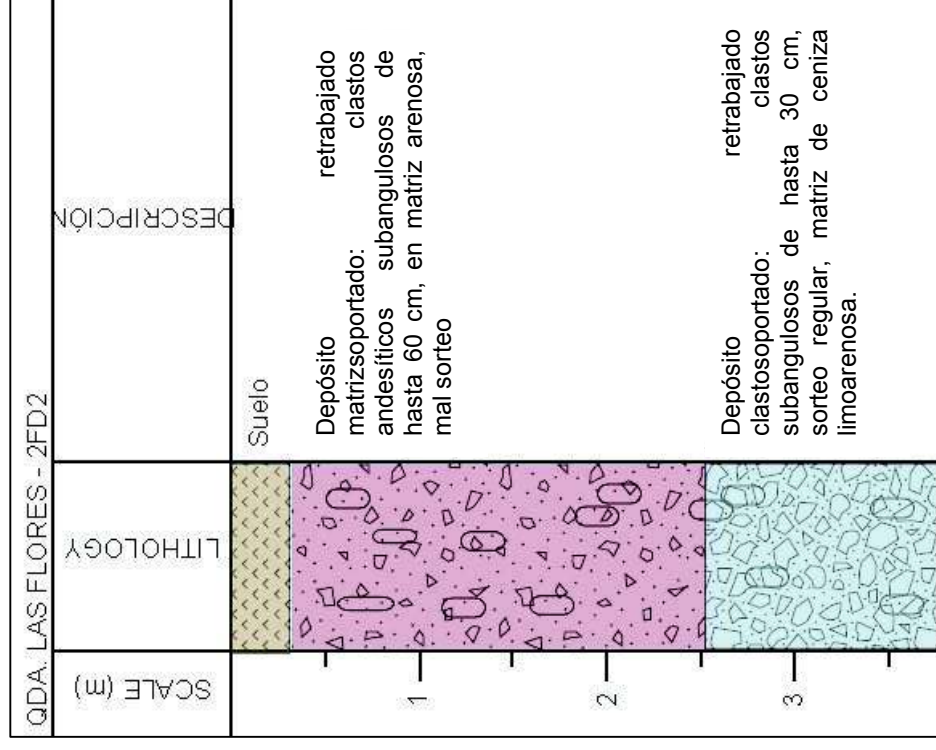
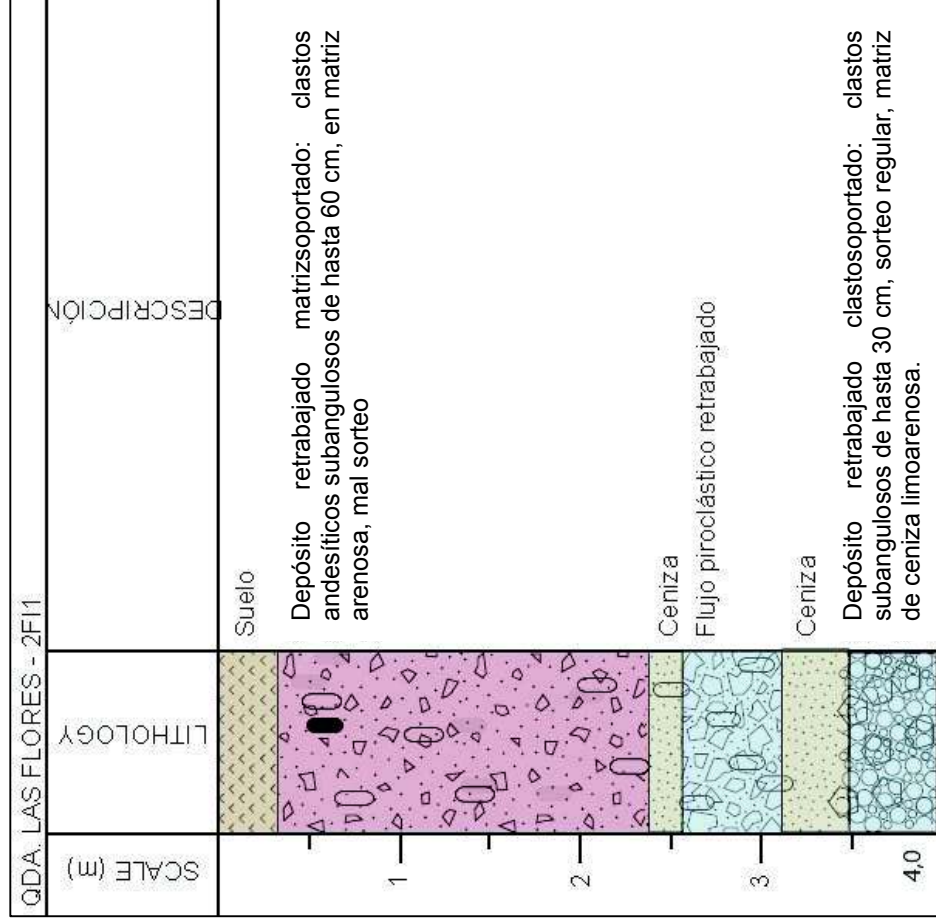
Anexo 1. Mapa de ubicación de los principales sectores afectados por durante el evento de inundación del año 2011.

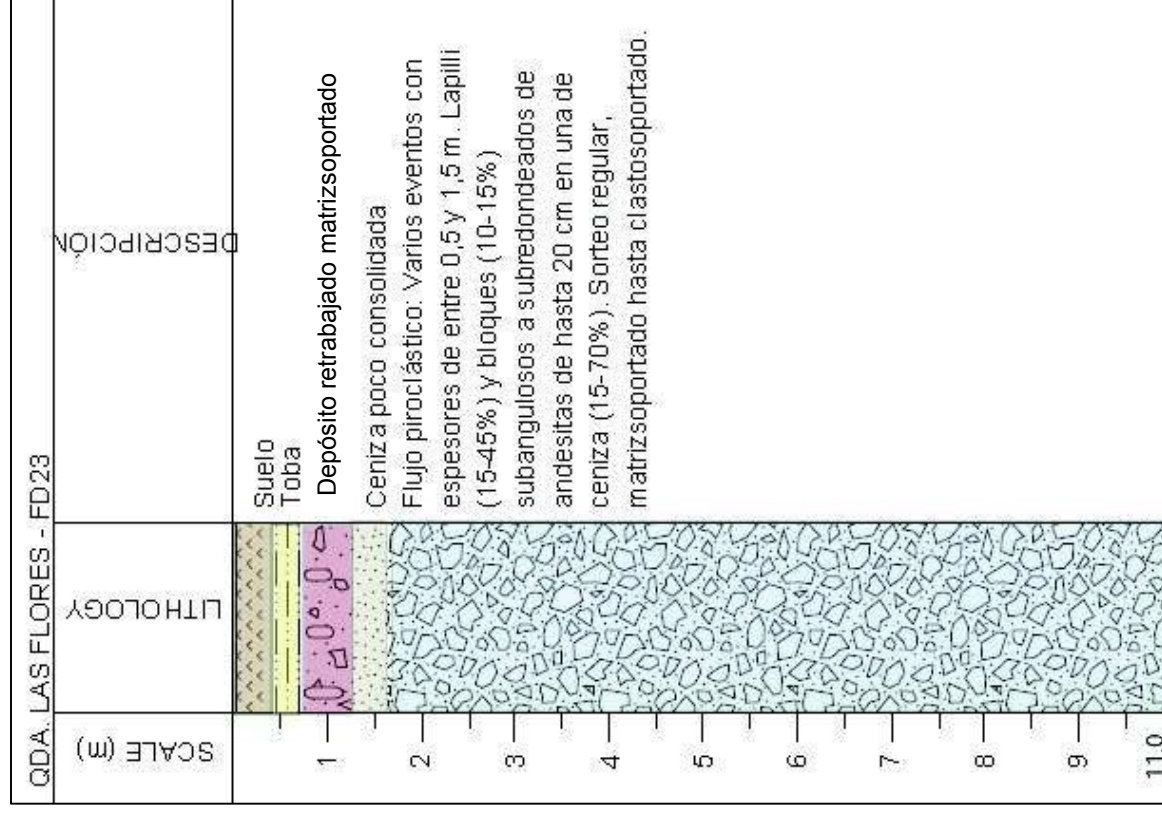
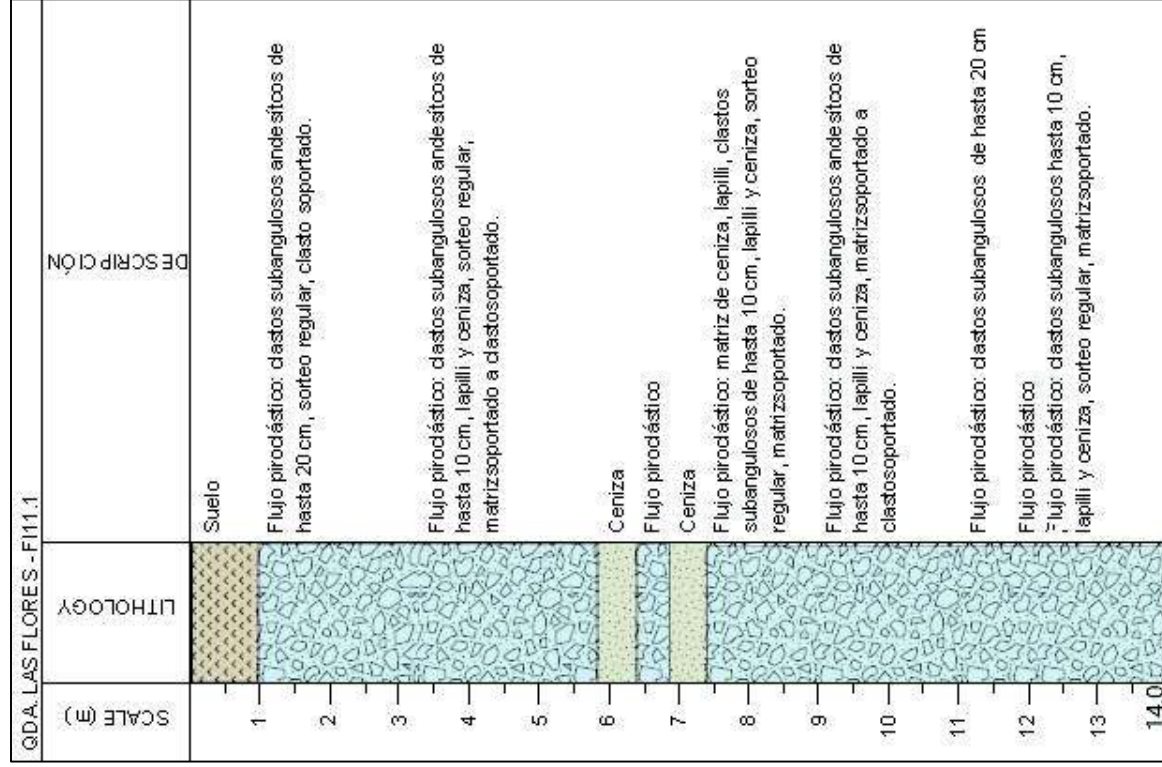


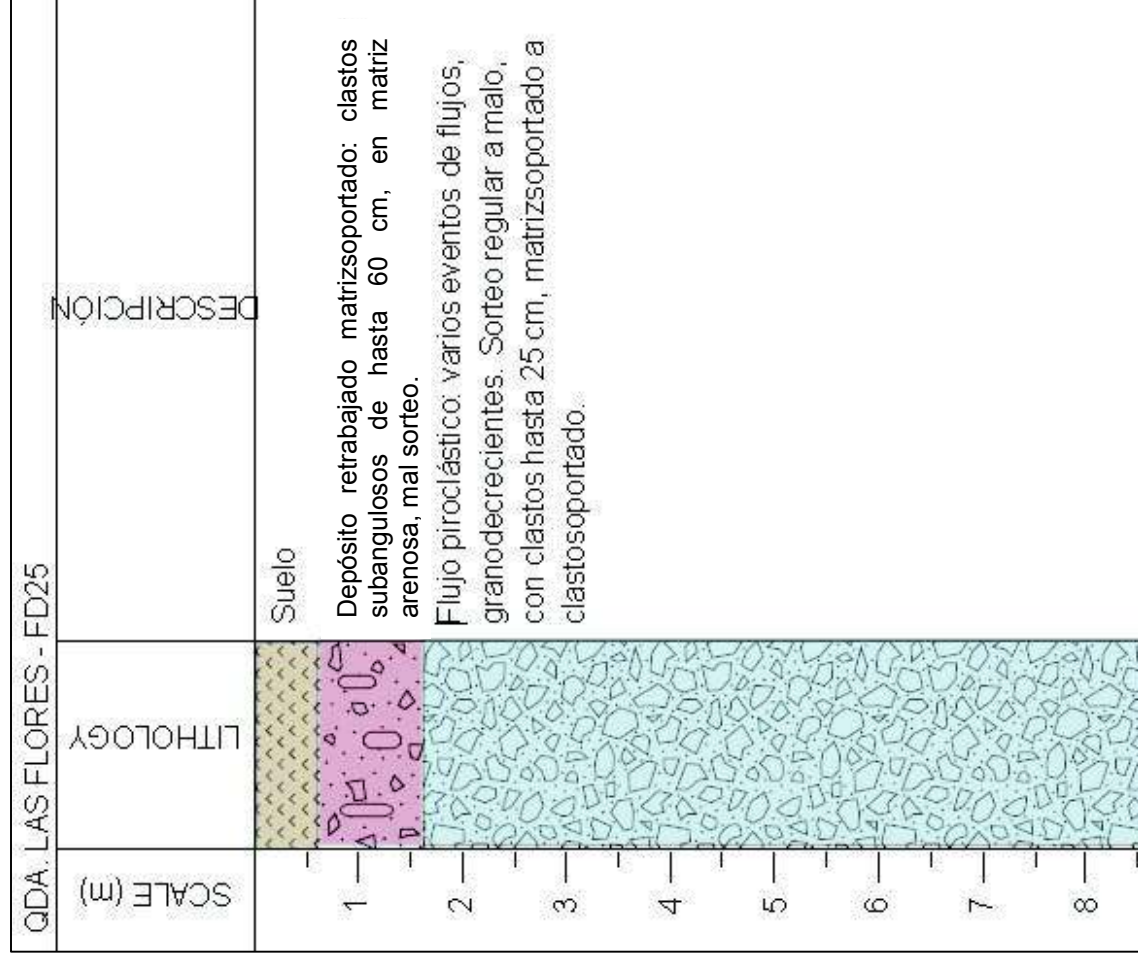
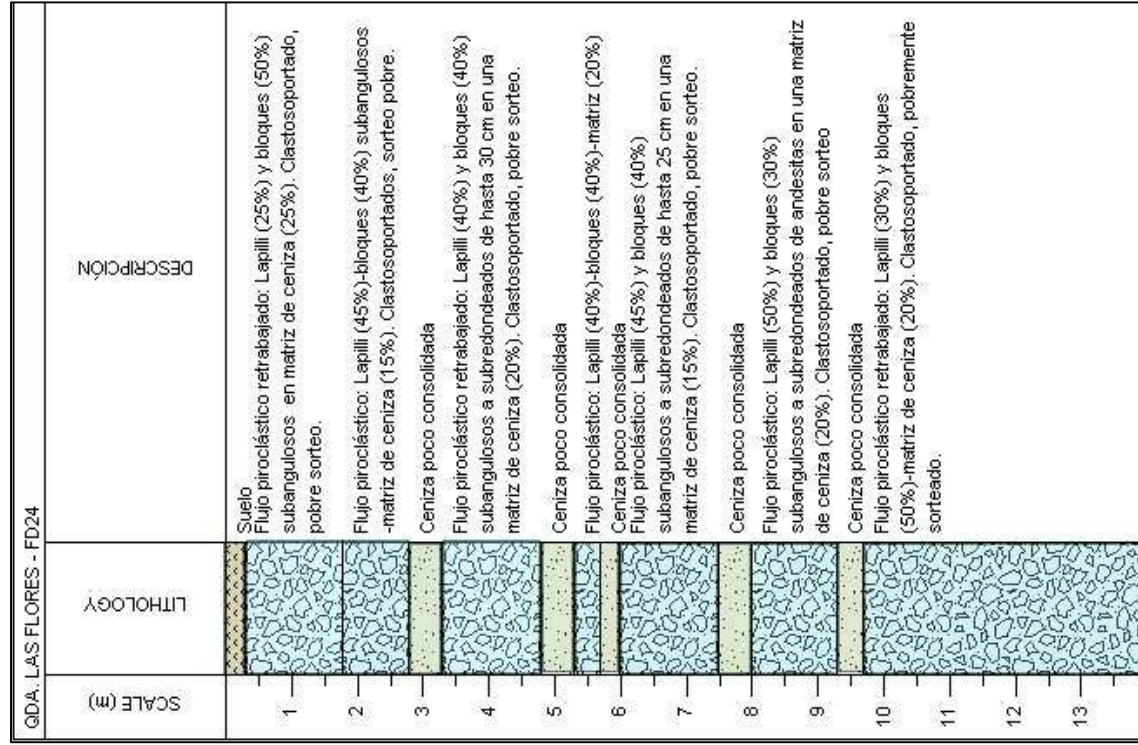
Anexo 2. Mapa de ubicación de las columnas estratigráficas

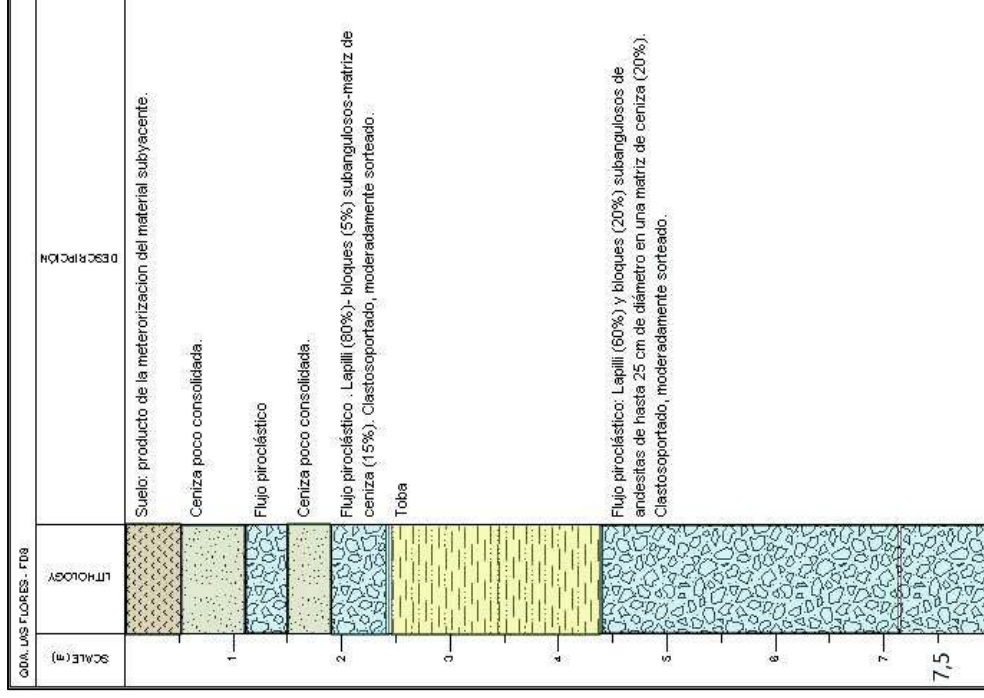
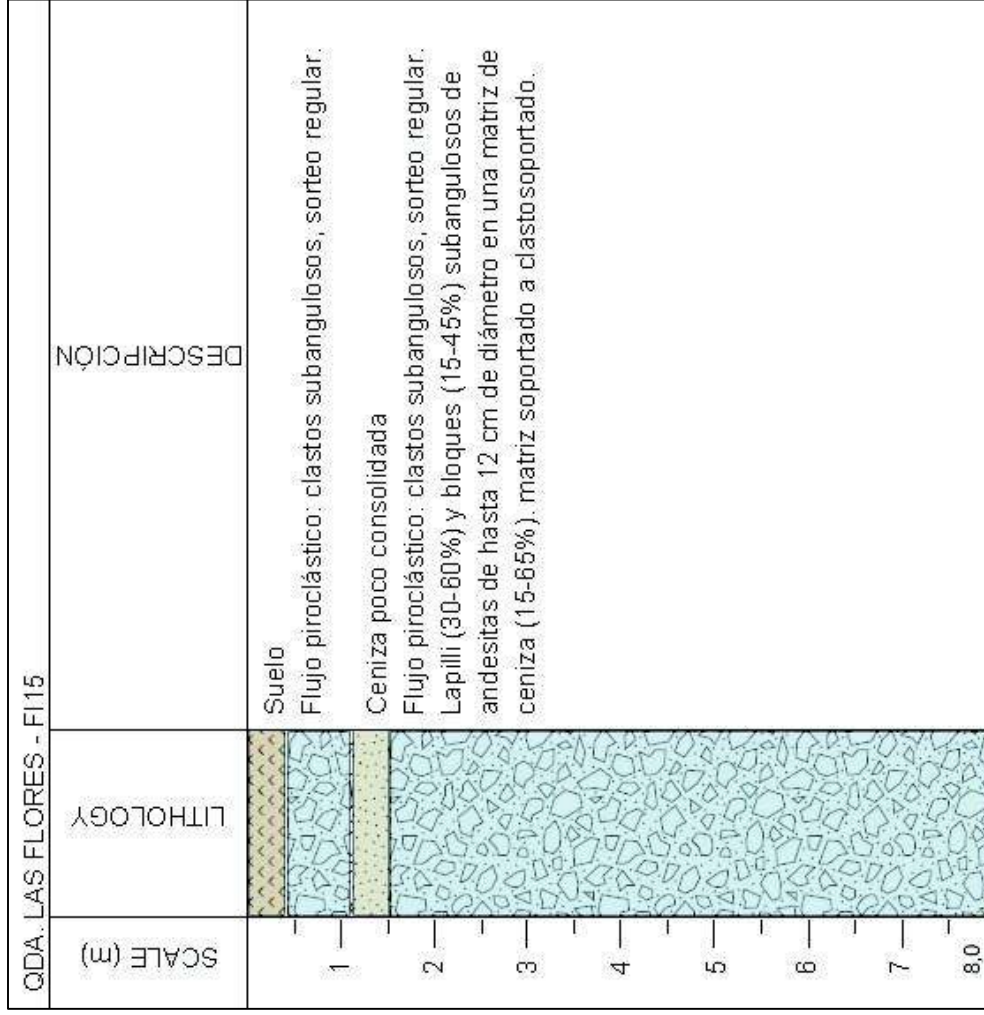


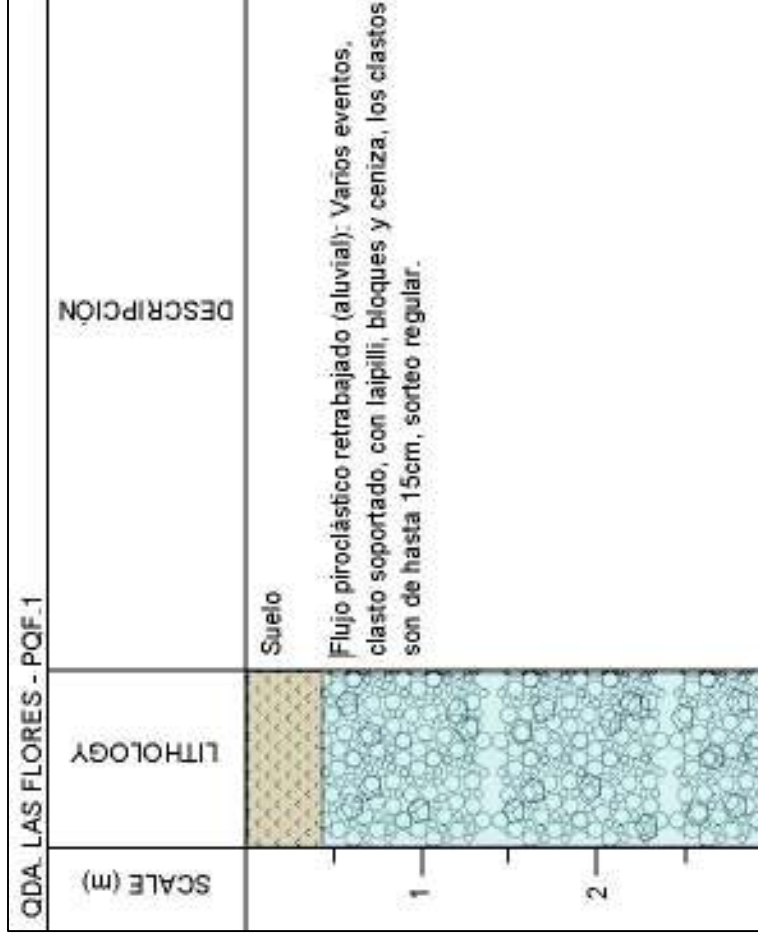
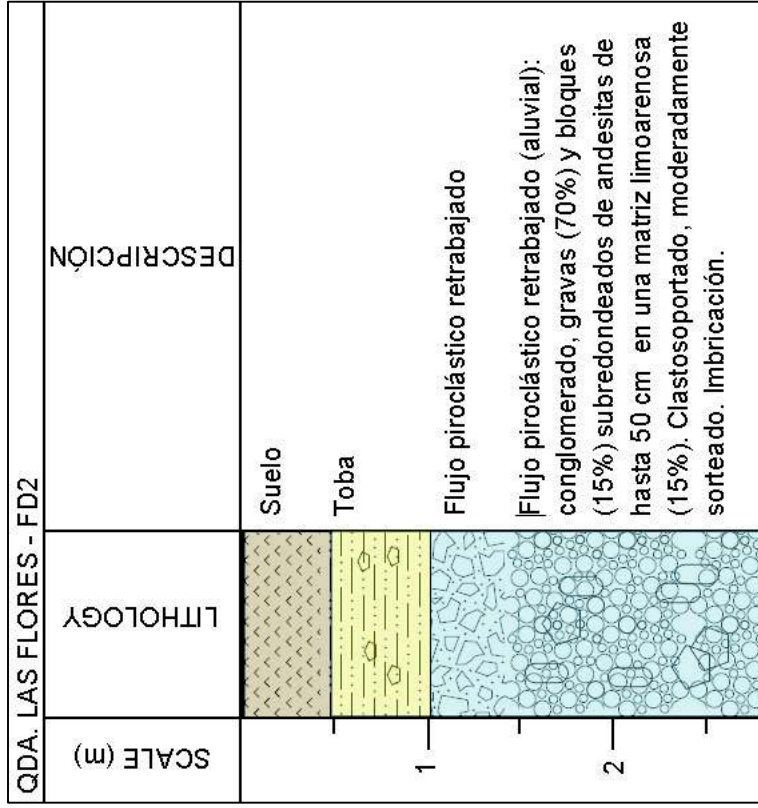
Anexo 3. Columnas estratigráficas de la quebrada Las Flores



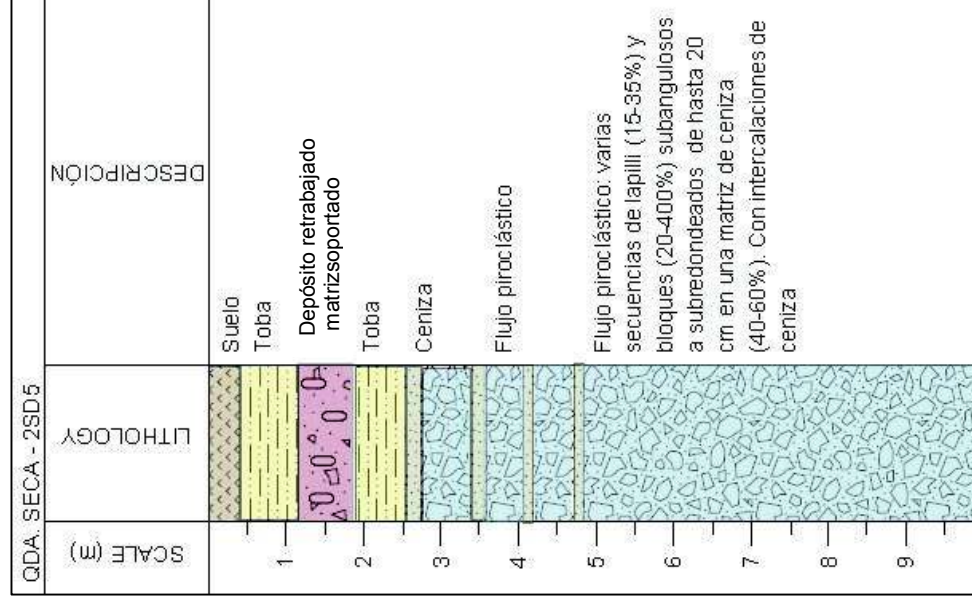
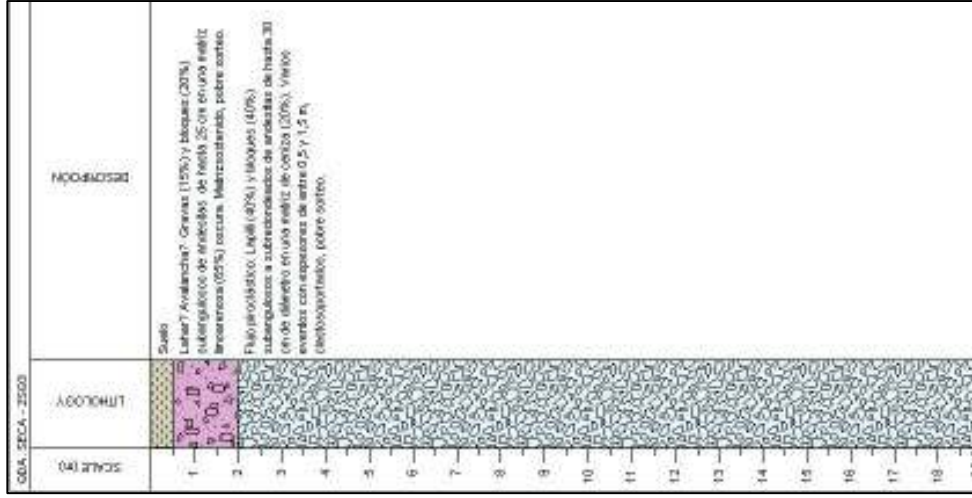


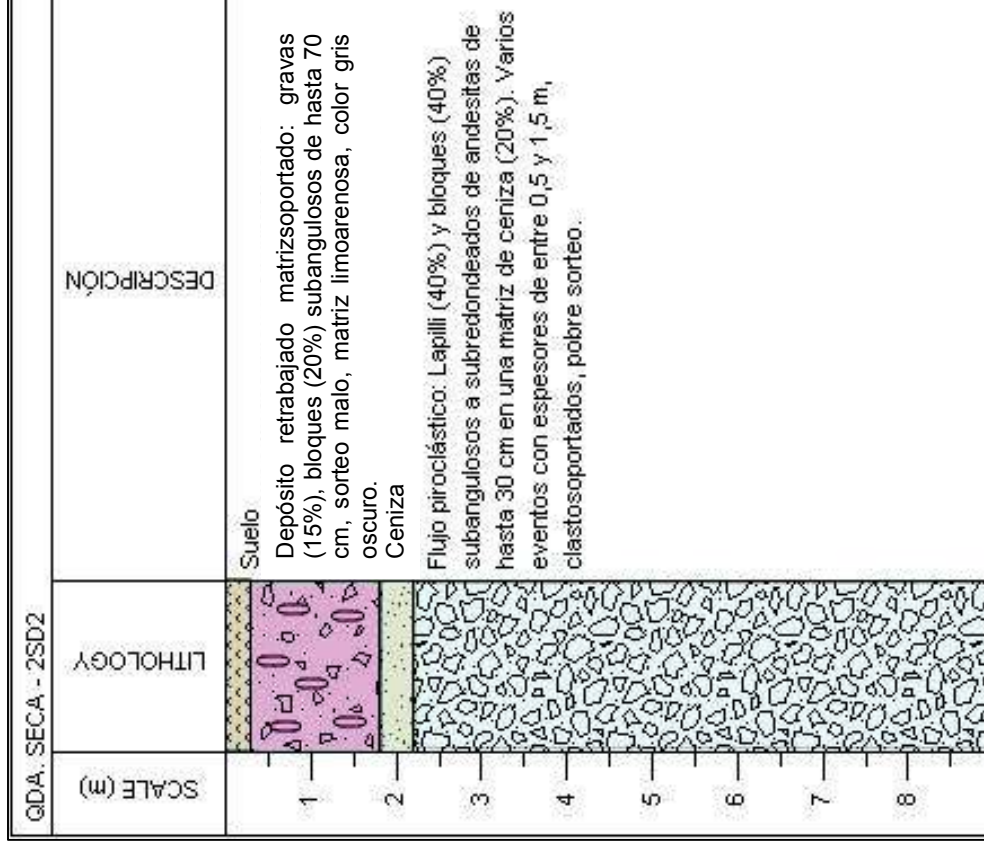
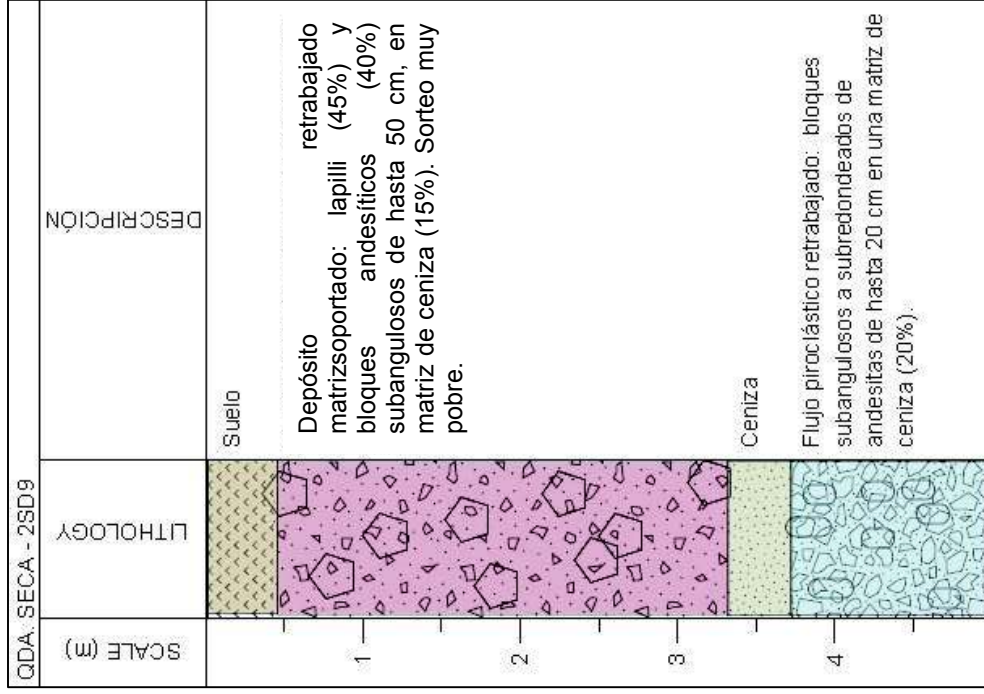


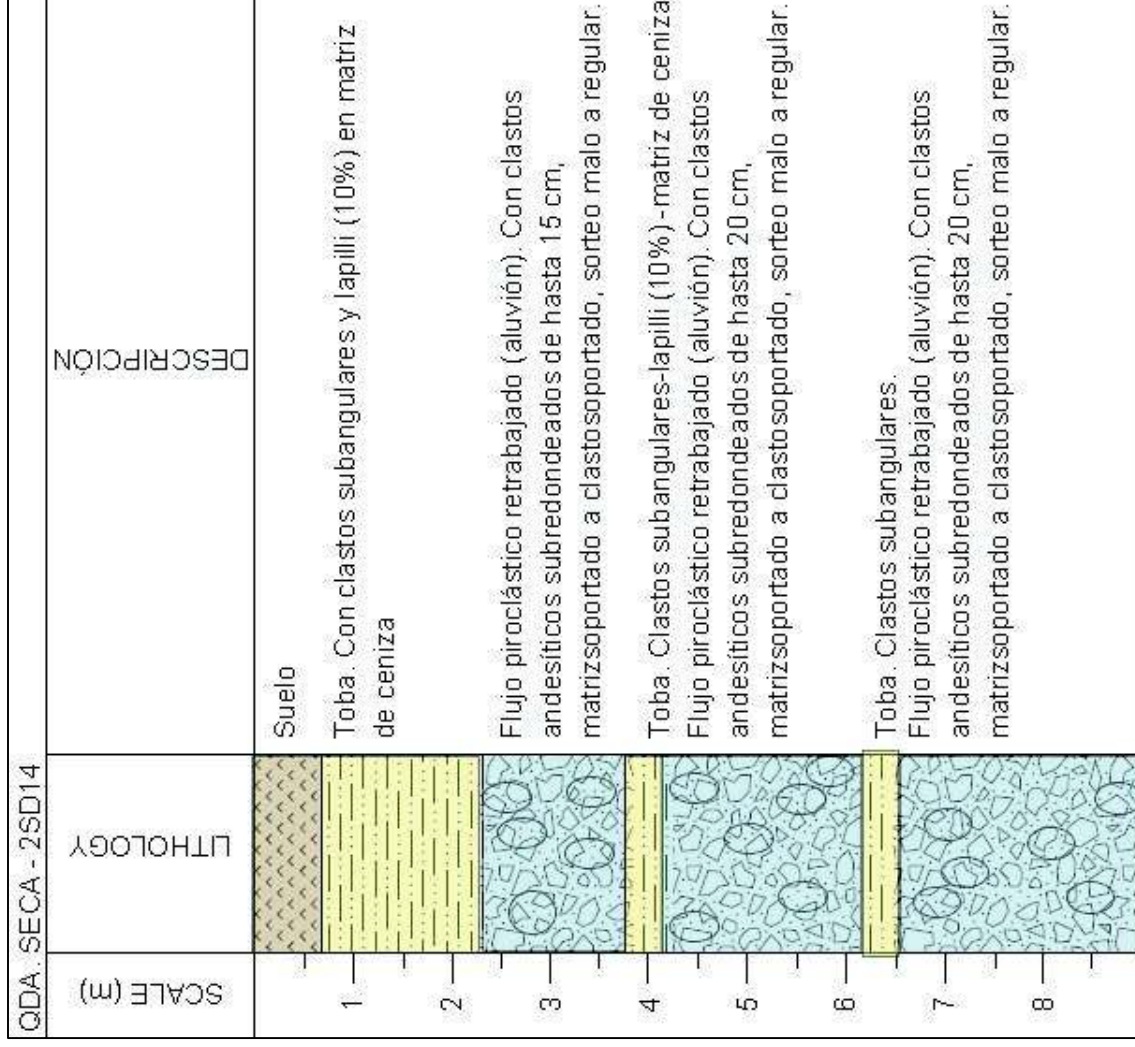
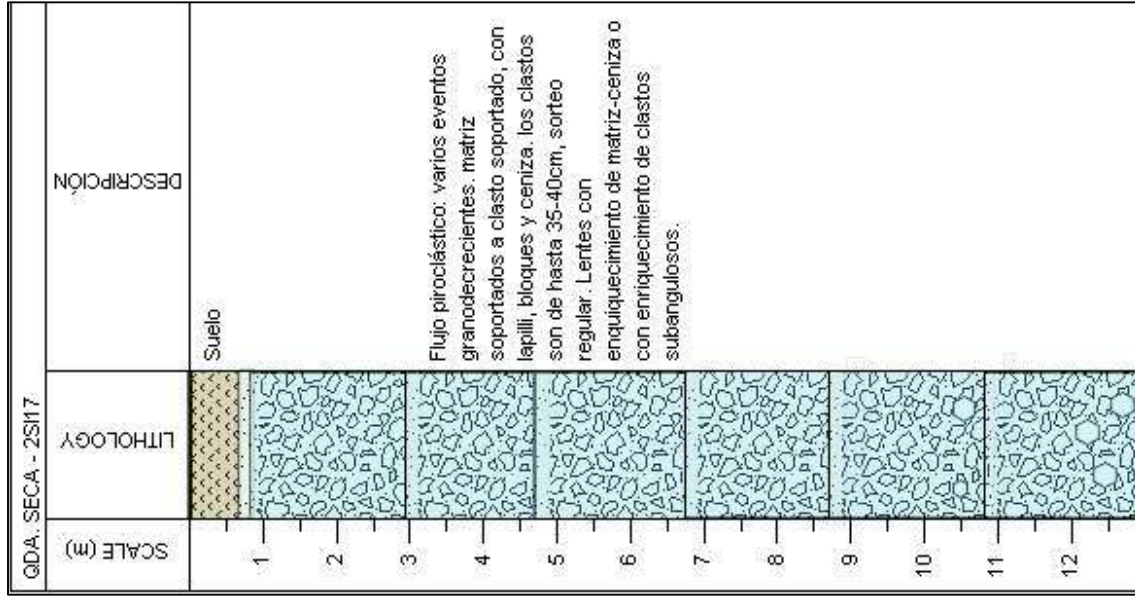


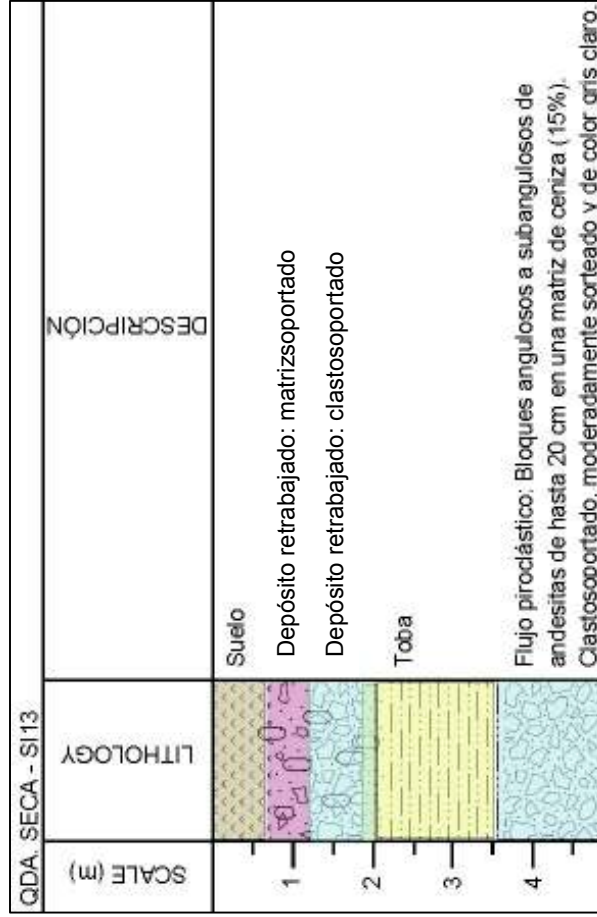
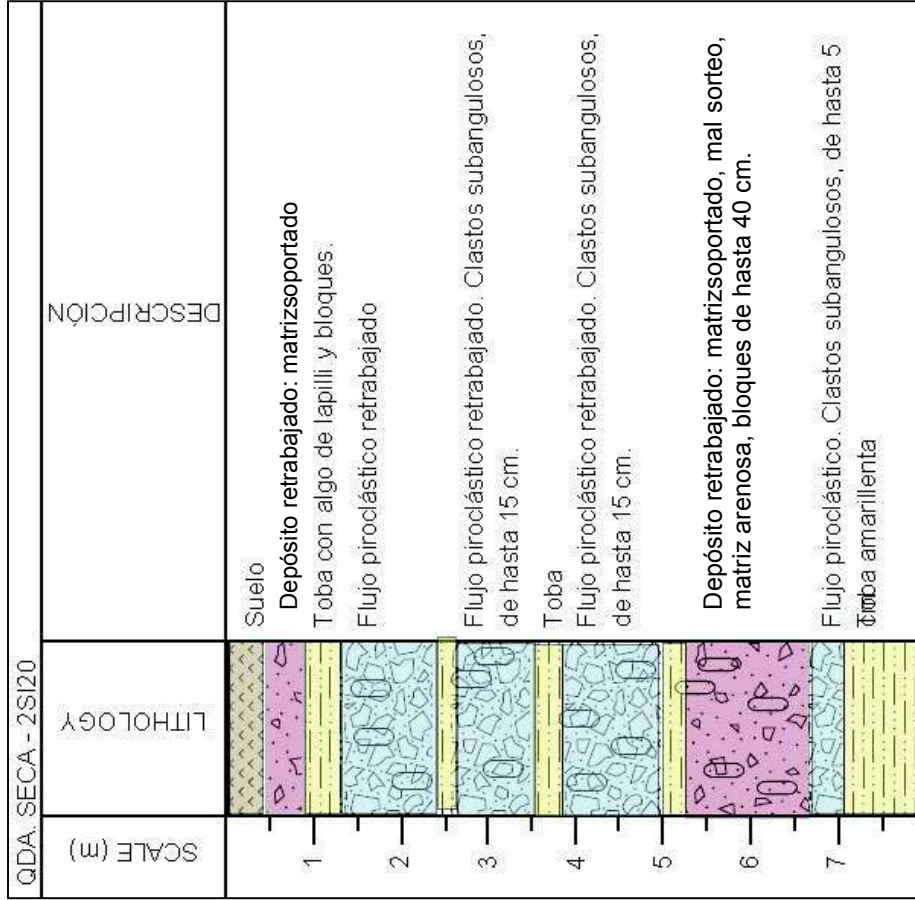


Anexo 4. Columnas estratigráficas de la quebrada Seca



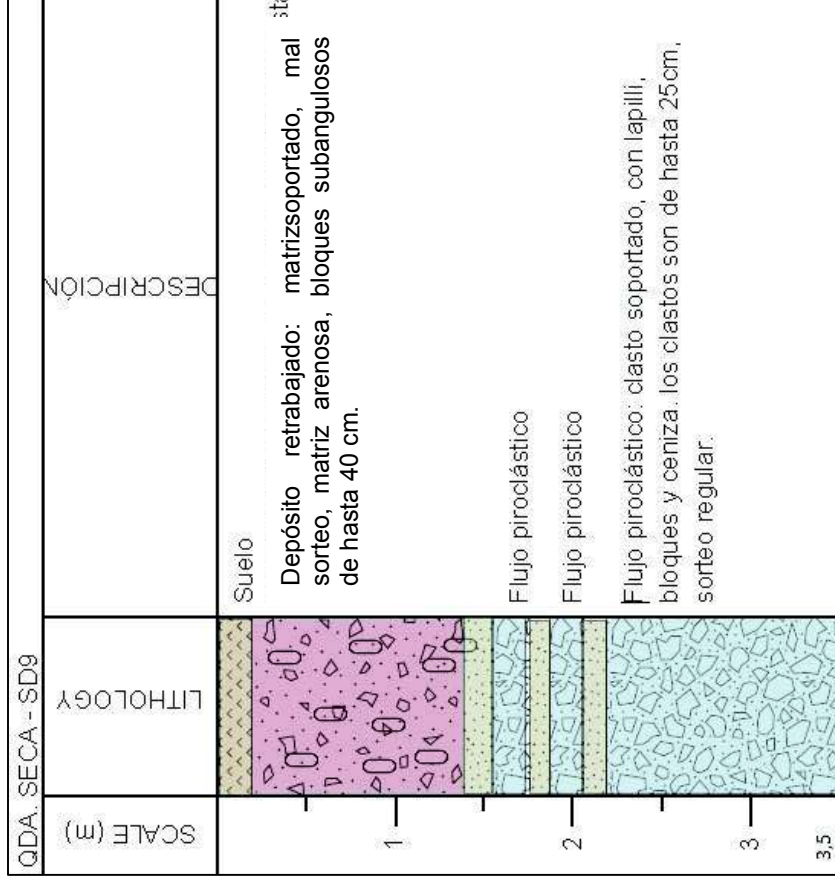
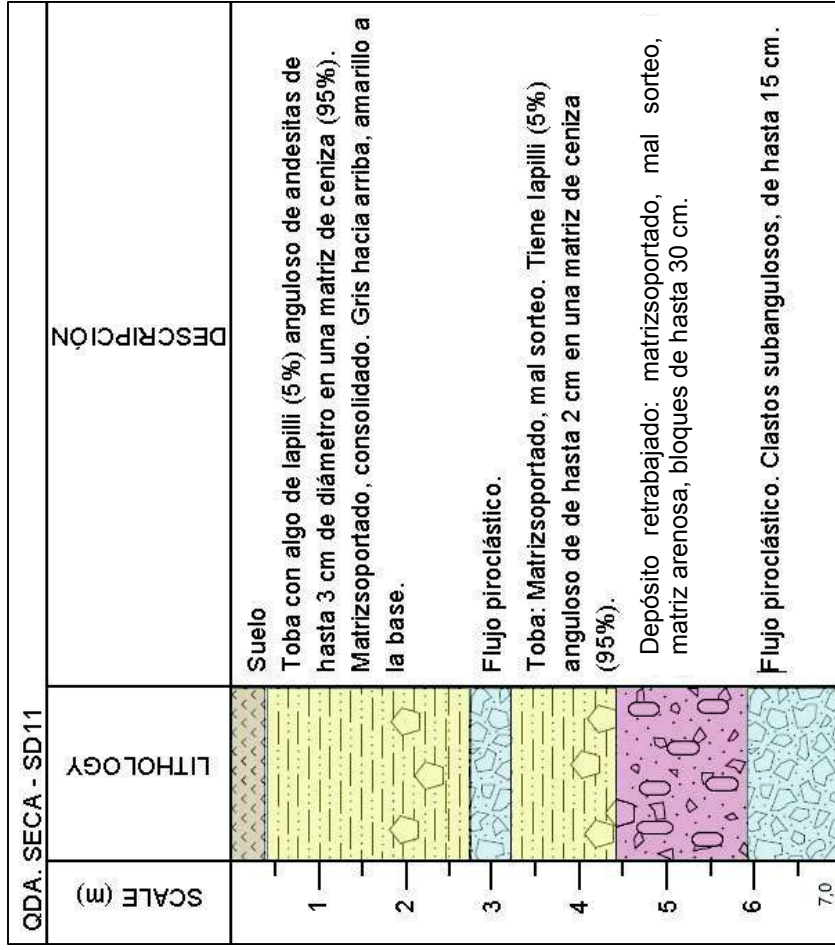




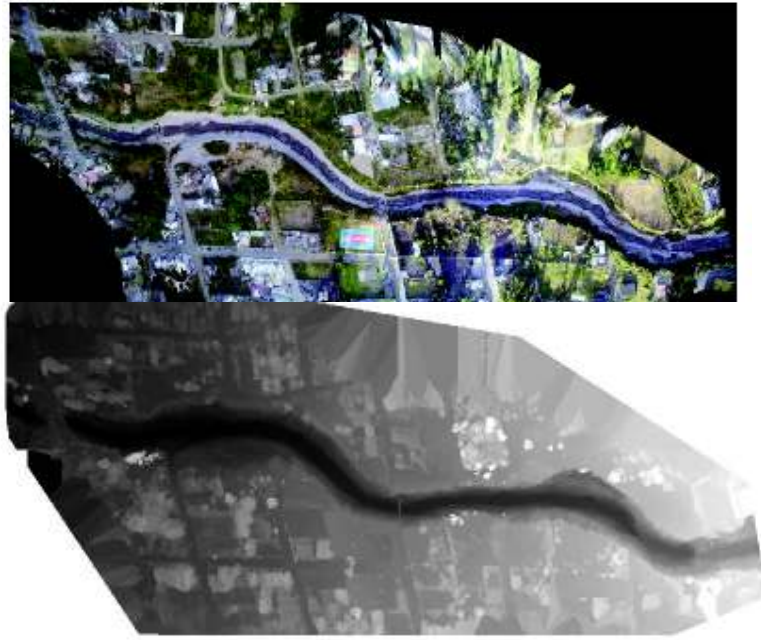


QDA SECA - S19		
SCALE (m)	LITHOLOGY	DESCRIPCIÓN
1		<p>Suelo</p> <p>Toba: 75% de matriz (ceniza-limo), bloques subangulosos.</p> <p>Flujo piroclástico retrabajado (Aluvion?-lahar?) Bloques andesíticos, subredondeados a subangulosos de mal sorteo, de hasta 70 cm, en matriz arenosa, matrizsoportado a clastosoportado</p> <p>Toba: 75% de matriz (ceniza-limo), bloques subangulosos.</p> <p>Flujo piroclástico: de matrizsoportado a clastosoportado. Matriz ceniza - limoarenosa. Clastos subangulosos.</p> <p>Ceniza.</p> <p>Flujo piroclástico: de matriz soportado a clasto soportado. Matriz ceniza - limoarenosa.</p>
2		
3		

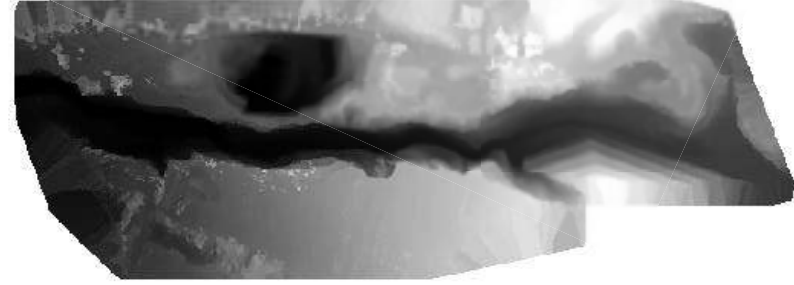
QDA SECA - SD10		
SCALE (m)	LITHOLOGY	DESCRIPCIÓN
1		<p>Suelo</p> <p>Depósito retrabajado matrizsoportado: mal sorteo, matriz arenosa, bloques andesíticos de hasta 50 cm.</p> <p>Toba: con bloques subangulosos (15%) de hasta 15 cm, lapilli (10%) y matriz (75%). Matrizsoportado, mal sorteo.</p> <p>Lente de un flujo piroclástico.</p> <p>Toba: Matrizsoportado, mal sorteo.</p> <p>Flujo piroclástico retrabajado (aluvión) Conglomerado: bloques, matriz limoarenosa (15%). Clastosoportado.</p> <p>Flujo piroclástico retrabajado (Lahar?-aluvión?): matriz arenosa, mal sorteo, bloques andesíticos de hasta 30 cm.</p>
2		
3		



Anexo 5. Ortofotos generadas con el programa Pix4D



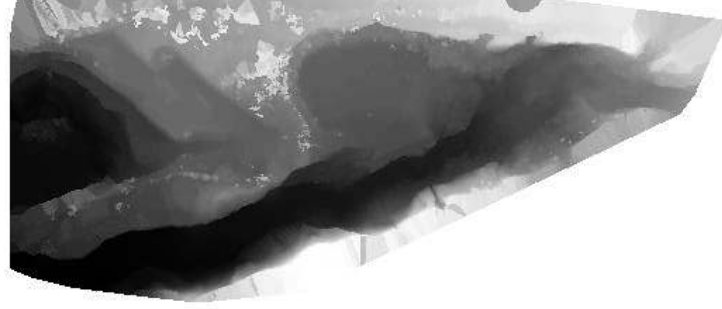
Tramo 3



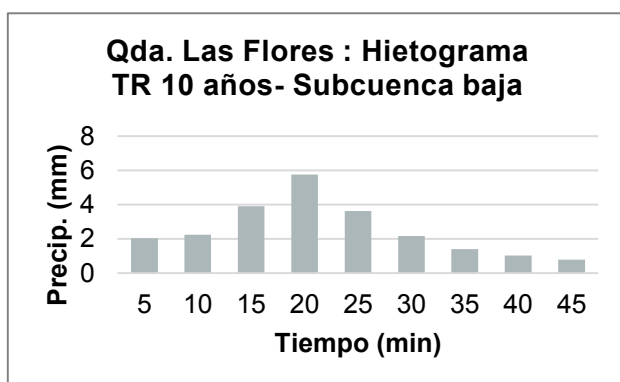
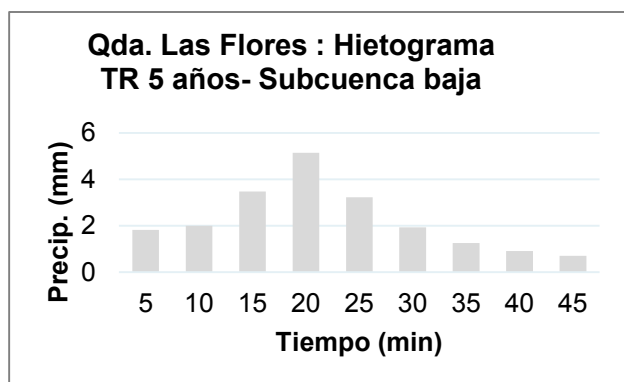
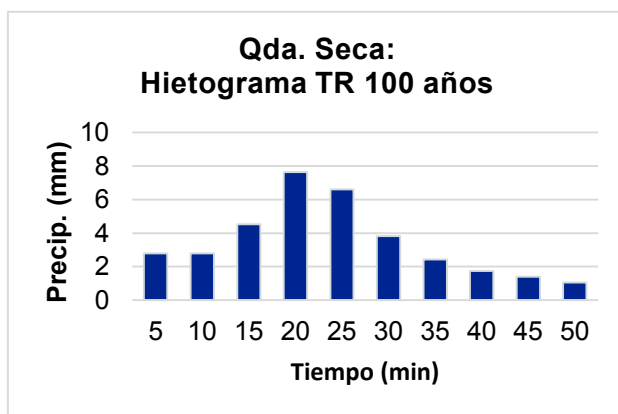
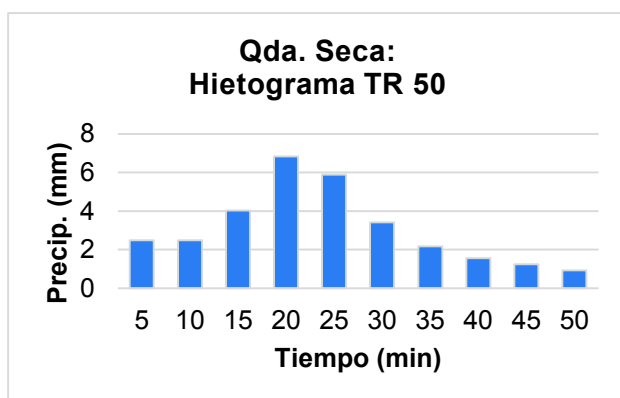
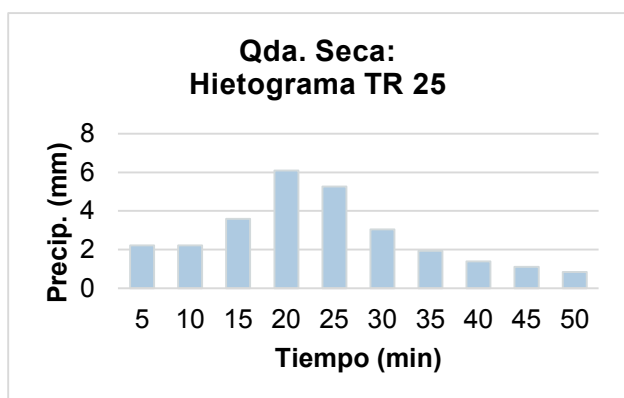
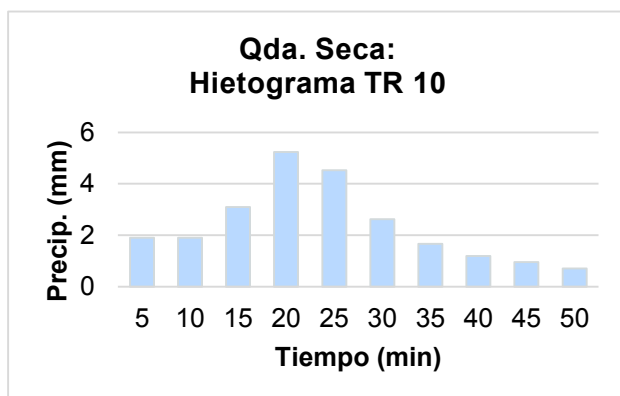
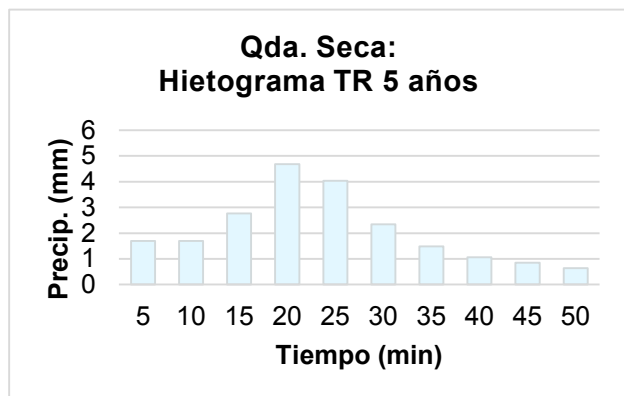
Tramo 2

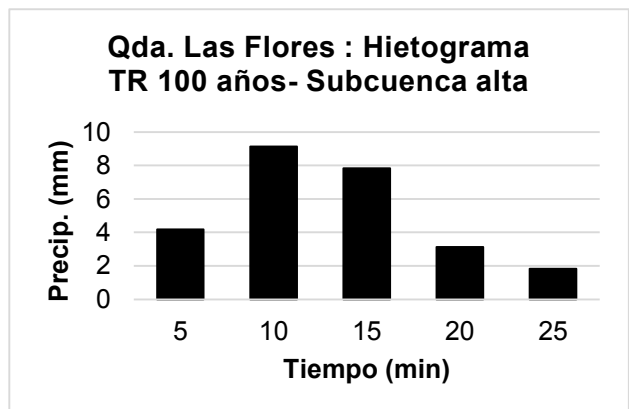
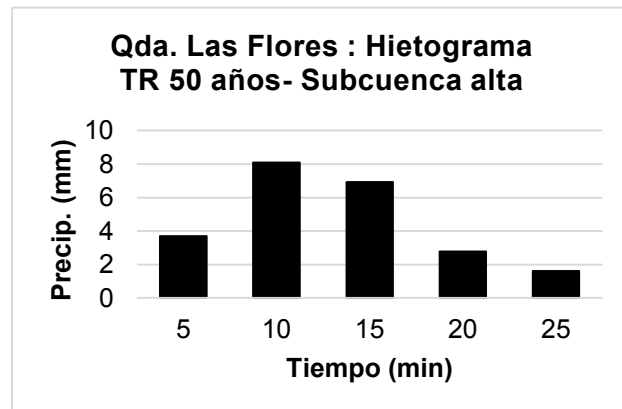
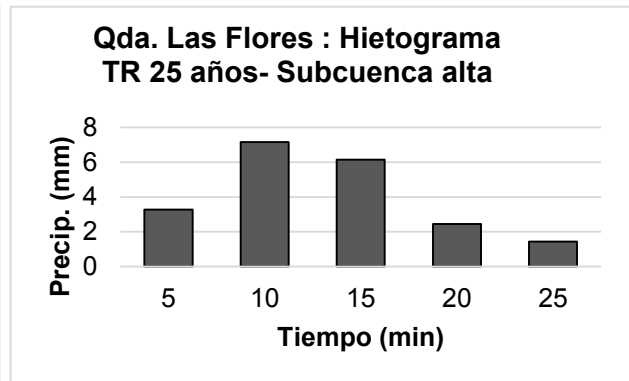
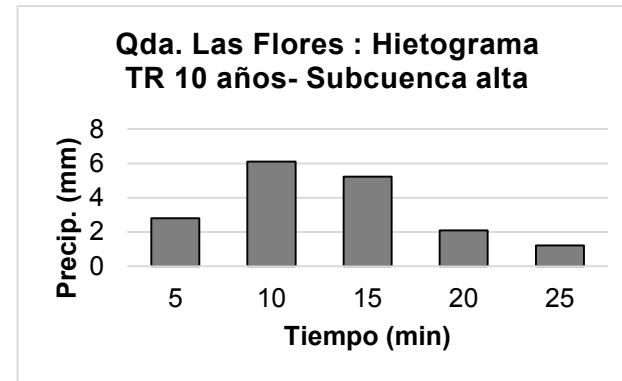
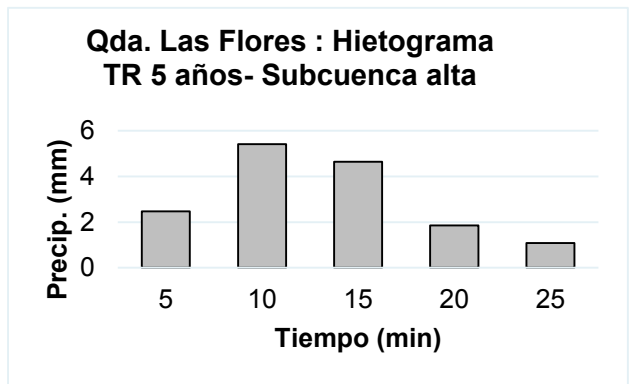
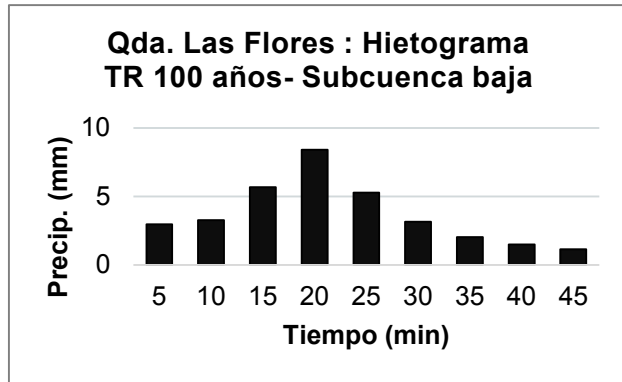
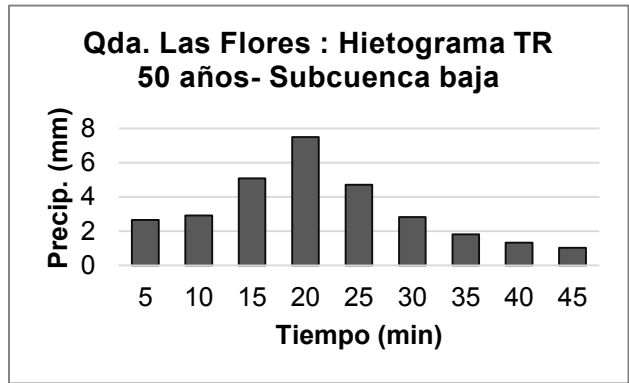
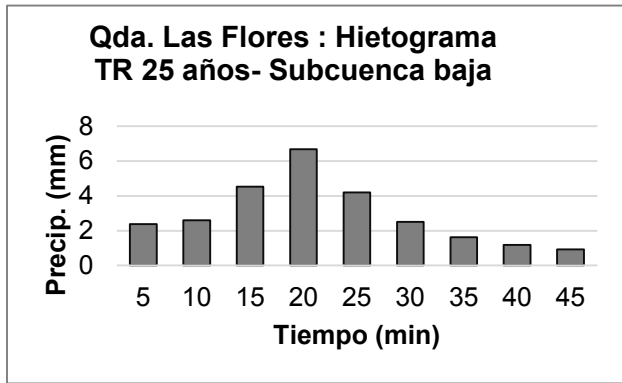


Tramo 1

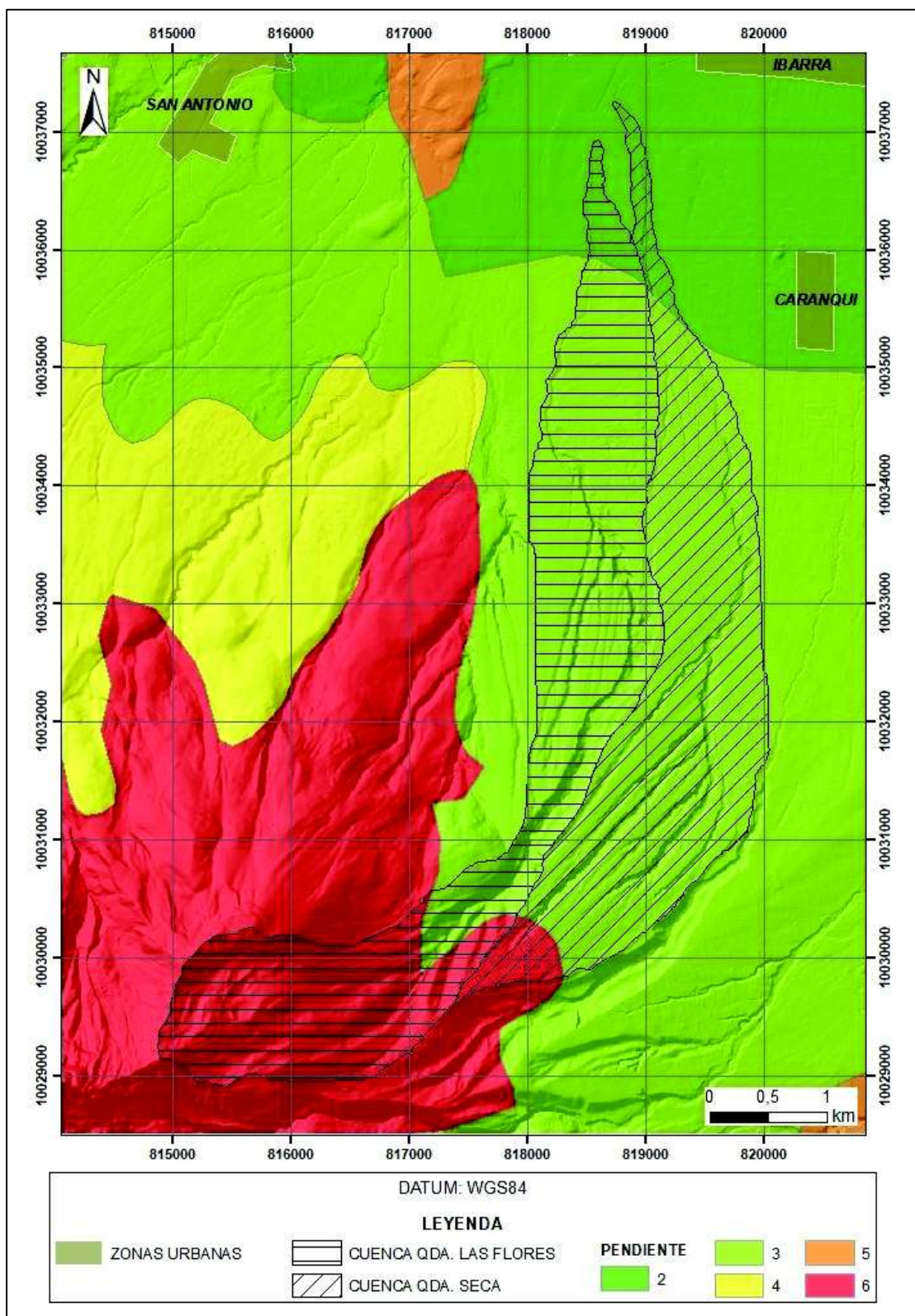


Anexo 6. Hietogramas de distribución de tormentas: método de Huff-mediana-segundo cuartil para cuencas puntuales.





Anexo 7. Mapa de clasificación de suelo según su pendiente. Clasificación desde 1 hasta 6. Modificado de GAD San Antonio de Ibarra, 2015.



Anexo 8. Mapa de clasificación de suelo según su drenaje. Clasificación desde 1 hasta 4. Modificado de GAD San Antonio de Ibarra, 2015.

