

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CUTUCHI, PROVINCIA DE COTOPAXI**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO**

**DANIEL SEBASTIÁN VITERI MENA**

daniel.viteri@epn.edu.ec

**DIRECTOR: PhD. SANDRA PROCEL**

sandra.procel@epn.edu.ec

**Quito, agosto 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, Daniel Sebastián Viteri Mena declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**Daniel Sebastián Viteri Mena**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Daniel Sebastián Viteri Mena, bajo mi supervisión.



---

**Sandra Teresa Procel Guerra PhD.**

**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Daniel Sebastián Viteri Mena

Sandra Teresa Procel Guerra PhD.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
RESUMEN.....	V
ABSTRACT .....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.    Objetivo general .....	1
1.3.    Alcance.....	2
1.4.    Área de estudio .....	2
1.5.    Marco Teórico.....	5
1.5.1    Geología.....	5
1.5.1.1    Geodinámica actual.....	5
1.5.1.2    Geología regional .....	6
1.5.1.3    Geología local.....	9
1.5.2    Sistema de acuíferos .....	13
1.5.2.1    Tipos de acuíferos .....	13
1.5.2.2    Acuíferos en sistemas volcánicos .....	15
1.5.3    Conceptos básicos para la cartografía hidrogeológica local.....	15
1.5.3.1    Nivel freático y piezométrico .....	15
1.5.3.2    Porosidad .....	15
1.5.3.3    Caudal y retención específica .....	17
1.5.3.4    Potencial hidráulico.....	17
1.5.3.5    Carga hidráulica .....	17
1.5.3.6    Gradiente hidráulico.....	18
1.5.3.7    Conductividad hidráulica.....	18
1.5.3.8    Transmisividad .....	19
1.5.3.9    Ley de Darcy .....	19
1.5.3.10    Inventario de puntos de agua .....	20
1.5.3.11    Zonas de recarga y descarga .....	20
1.5.3.12    Líneas equipotenciales y líneas de flujo.....	21



2.	METODOLOGÍA.....	22
2.1	Recopilación de información preexistente de puntos de agua subterránea: pozos y vertientes.....	22
2.2	Medición del nivel estático del agua de los puntos de agua .....	23
2.3	Muestreo de rocas y sedimentos del área de estudio.....	24
2.4	Trabajo de laboratorio.....	25
3.	RESULTADOS .....	28
3.1	Resultados .....	28
3.1.1	Inventario de puntos de agua de la cuenca alta del río Cutuchi.....	28
3.1.2	Análisis granulométrico.....	32
3.1.3	Mapa piezométrico .....	35
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	36
4.1	Conclusiones.....	36
4.2	Recomendaciones.....	37
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
6.	ANEXOS.....	45

## RESUMEN

Este estudio presenta una caracterización hidrogeológica del flujo subterráneo en la cuenca alta del río Cutuchi, provincia de Cotopaxi. El análisis se basó en el levantamiento de un inventario de puntos de agua (pozos y vertientes) y muestras de roca y sedimentos. A partir de esta información se determinó las cargas hidráulicas, gradientes hidráulicos, transmisividad, velocidad del flujo subterráneo y granulometría con el objetivo de caracterizar las principales unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos del área de estudio. Se registró un total de 11 vertientes y 17 pozos. En los pozos se realizaron mediciones del nivel estático del agua. Además, se tomó un total de 6 muestras de sedimentos de los depósitos del volcán Cotopaxi, volcán Iliniza Sur y Formación Chalupas para analizar su distribución granulométrica. El análisis de resultados determinó la existencia de diferentes niveles acuíferos en el área de estudio considerando que los niveles estáticos del agua más profundos se localizan en un rango de 14 a 25 m de profundidad constituyendo un nivel piezométrico 1, mientras que los pozos más someros presentan un nivel estático del agua de hasta 6 m representando el nivel freático. La correlación entre la ubicación de los pozos y la geología indica que la mayor cantidad de pozos se distribuyen sobre los afloramientos de la Formación Chalupas. Estos depósitos se clasificaron como arenas limpias mal gradadas y arenas con alto contenido de finos. La intercalación de estos materiales daría lugar a la ocurrencia de diferentes niveles acuíferos.

**PALABRAS CLAVE:** hidrogeología, nivel estático del agua, acuíferos, pozos, vertientes.

## **ABSTRACT**

This study presents a hydrogeological description of the groundwater flow in the upper watershed of the Cutuchi River (Cotopaxi province). The analysis was based on an inventory of water points (wells and springs) and the sampling of rock and sediments. The hydraulic loads, hydraulic gradients, transmissivity, groundwater flow velocity and granulometry were determined to characterize the main hydrogeological units and types of aquifers in the study area. A total of 11 springs and 18 wells were recorded. Measurements of the static water level were made in the wells. In addition, a total of 6 sediment samples were taken from the deposits of the Cotopaxi volcano, the Iliniza Sur volcano and the Chalupas Formation to analyze their granulometric distribution. The analysis of results determined the existence of different aquifer levels. The deepest static water levels are in a range of 14 to 25 m deep (piezometric level 1), while the shallowest wells present a static water level of up to 6 m representing the water table. The correlation between the location of the wells and the geology indicates that the greatest number of wells are distributed over the outcrops of the Chalupas Formation. These deposits were classified as poorly graded sand and silty-clayey sand. The intercalation of these materials would result in the occurrence of different aquifer levels.

**KEYWORDS:** hydrogeology, static water level, aquifers, wells, springs

# 1. INTRODUCCIÓN

La parroquia rural de Mulaló se localiza en la zona noroccidental de la provincia de Cotopaxi, con un rango altitudinal de 3000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). Entre los límites de la parroquia reside una población aproximada de 15 mil habitantes siendo su actividad económica principal, la agropecuaria (INEC, 2010). Las zonas sur y oeste constituyen áreas enfocadas a la producción de cultivos de ciclo corto de maíz, papas, habas, fréjol, zanahoria, y chocho; en zonas de baja pendiente priman los cultivos en invernadero de flores y hortalizas, mientras que, la ganadería predomina sobre el uso de suelo en la zona oriental de la parroquia (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Mulaló, 2020).

Esta parroquia se encuentra dentro de la cuenca alta del río Cutuchi que representa el área de estudio y pertenece al sistema hídrico del río Cutuchi, el cual confluye con el río Patate constituyendo la cuenca alta de la demarcación hidrográfica del río Pastaza (SENAGUA, 2014). Esta cuenca se distribuye en la zona central del Valle Interandino, limitada en la parte noreste por el volcán Cotopaxi, noroeste por el Iliniza Sur, al oeste limita con el río Pumacunchi, al este con el borde occidental de la Cordillera Real y al sur con el río Illuchi. El sistema de acuíferos dentro de la cuenca tiene principalmente una recarga regional producto del deshielo del glaciar del volcán Cotopaxi, y constituye el principal recurso hídrico de la parroquia rural.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar el movimiento del flujo subterráneo en la cuenca alta del río Cutuchi partiendo del inventario georreferenciado de puntos de agua (superficial y subterráneo) y el registró *in situ* de los niveles estáticos de agua. Con esta información se calculó las cargas hidráulicas, gradientes hidráulicos y niveles freáticos y piezométricos locales que sirvieron de base para la elaboración del perfil hidrogeológico y el mapa piezométrico. A la vez, se determinó la granulometría de los depósitos volcánicos para clasificar el suelo, estimar la velocidad del flujo, la transmisividad y caracterizar las principales unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos en el área de estudio.

## 1.1. Objetivo general

Caracterizar el movimiento del flujo subterráneo en la cuenca alta del río Cutuchi, provincia de Cotopaxi.

## **1.2. Objetivos específicos**

1. Realizar un inventario georreferenciado de los puntos de agua subterránea de la cuenca alta del río Cutuchi;
2. Caracterizar las principales unidades hidrogeológicas y tipos de acuíferos en el área de estudio;
3. Determinar las cargas hidráulicas, gradientes hidráulicos y velocidad del flujo subterráneo;
4. Realizar la piezometría del área de estudio.

## **1.3. Alcance**

El presente trabajo se desarrolló como parte del proyecto de investigación PIM-20-03: “Recursos hídricos subterráneos en la zona de Mulaló: Estudio hidrodinámico e hidrogeoquímico, identificación de zonas potencialmente críticas de contaminación y remoción de metales pesados utilizando materiales nanoestructurados y compuestos”. Para alcanzar los objetivos planteados, se caracterizó el flujo subterráneo mediante la elaboración y análisis de i) mapas temáticos: topográfico, geológico, piezométrico a escala 1:250.000, ii) elaboración de un inventario de puntos de agua actualizado y georreferenciado, iii) medición de niveles estáticos del agua, y iv) determinación de parámetros hidrogeológicos.

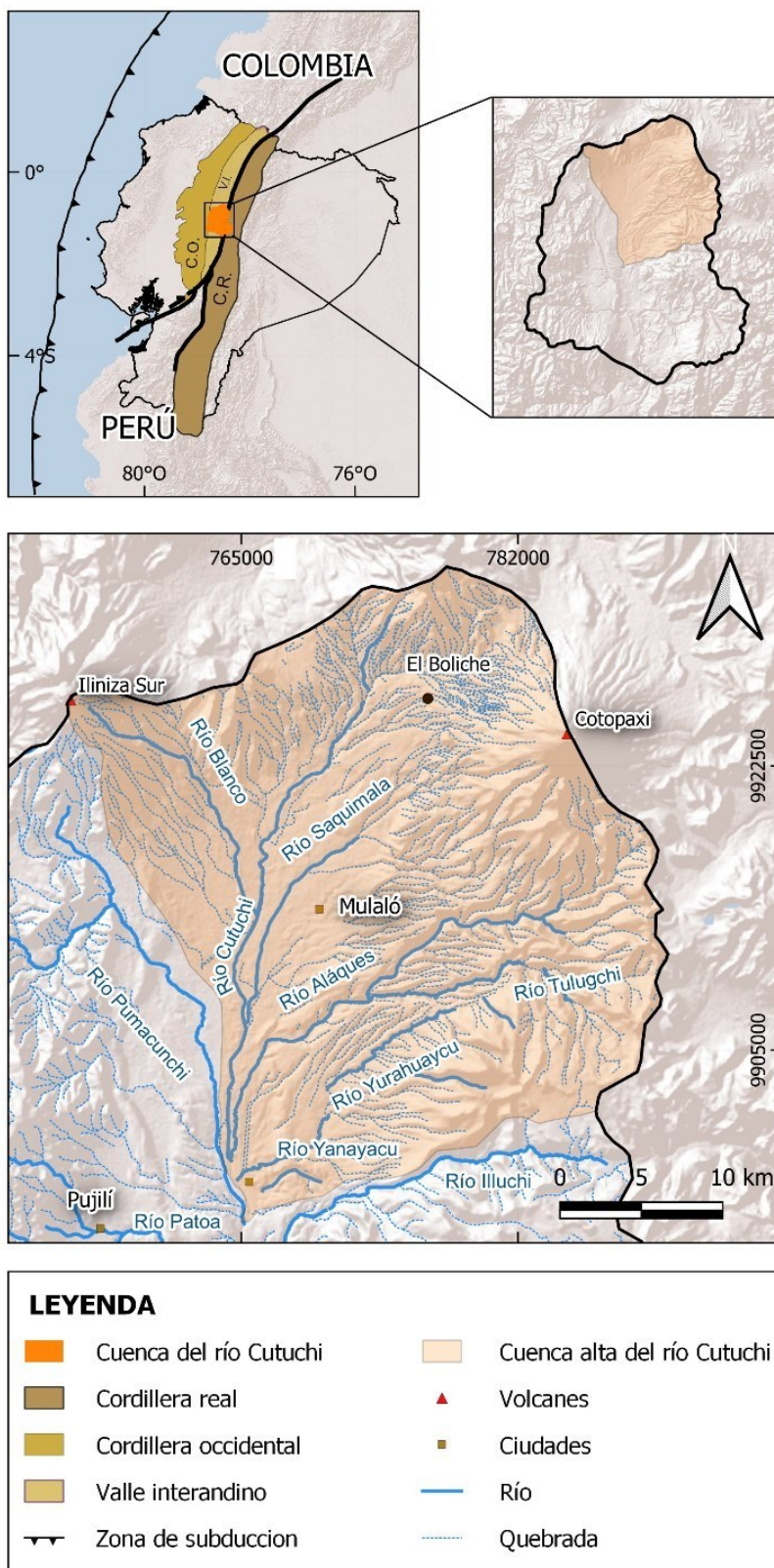
El levantamiento bibliográfico se basó en el análisis de proyectos de titulación (Dávila, 1990; Lozada, 2019; Taco, 2000), informes técnicos (Dirección General de Geología y Minas-DGGM, 1980; Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, 2014) y libros (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 2001; Woessner & Poeter, 2020).

Se realizaron 7 salidas de campo que contemplaron i) georreferenciación de pozos y vertientes, ii) mediciones de niveles estáticos de agua en pozos distribuidos en la zona de estudio, y iii) muestreo de sedimentos para análisis en laboratorio (granulometría).

## **1.4. Área de estudio**

El área de estudio corresponde a la cuenca alta del río Cutuchi ubicada al noreste de la Provincia de Cotopaxi. Esta cuenca forma parte del sistema hídrico del río Cutuchi que

nace del producto del deshielo del glaciar del volcán Cotopaxi y confluye con el río Patate formando el sistema hídrico de la demarcación hidrográfica del río Pastaza (Figura 1.1).

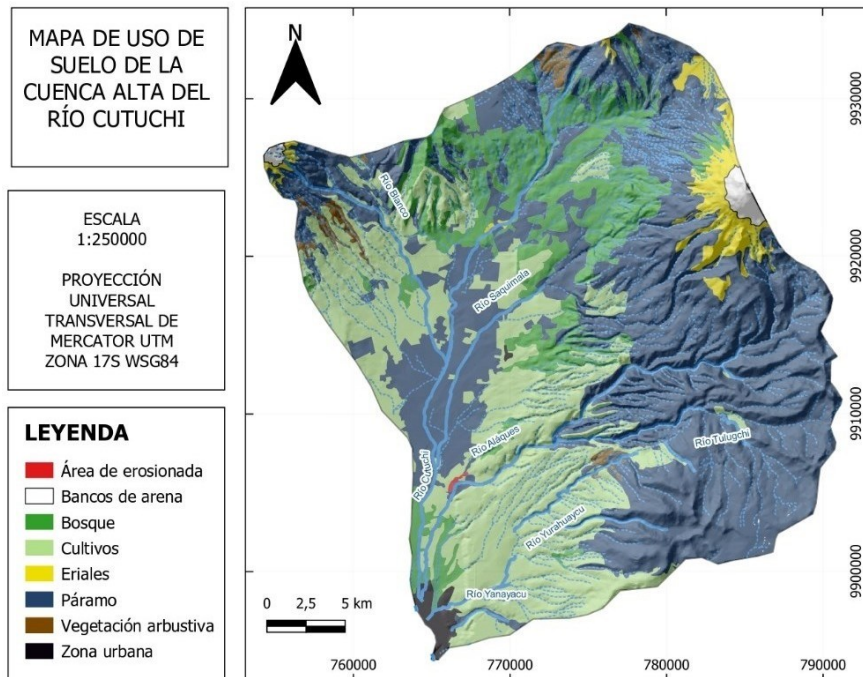


**Figura 1.1** Ubicación de la zona de estudio en el contexto hidrográfico.

La delimitación de la cuenca alta del río Cutuchi se realizó considerando los principales divisores de agua, el drenaje principal y secundario, así como las cotas máximas y mínimas, y punto de cierre de la cuenca. El límite norte recae sobre el Área Nacional de Recreación El Boliche, el noreste en el volcán Cotopaxi, y al noroeste en el volcán Iliniza Sur. El límite oeste de la cuenca separa los ríos Cutuchi y Pumacunchi, mientras que el sur y este de la cuenca está limitada por el borde occidental de la Cordillera Real y el río Illuchi. El área de estudio presenta una extensión de 925 km<sup>2</sup>. Su red hidrográfica está conformada por los ríos Blanco, Saquimala, Alaquez, Tulugchi, Yurahuaycu y Yanayacu afluentes del río Cutuchi (Figura 1.1).

Su fisiografía se caracteriza por un relieve montañoso con pendientes que oscilan entre 0° y 66° y con presencia de laderas, terrazas, valles y llanuras rellenas de productos y materiales procedentes de una intensa actividad volcánica y procesos erosivos que han actuado y actúan sobre los relieves preexistentes. Su clima es característico de los Andes Tropicales, variable de acuerdo con el cambio de altura. Bajo los 3000 m.s.n.m, el clima es seco sin exceso de agua, mesotérmico templado frío a semifrío con una temperatura de 8° a 14°C, y sobre los 3000 m.s.n.m, mesotérmico templado frío con una temperatura de 8° a 4°C, cercana a 0°C en las zonas próximas a los volcanes Cotopaxi e Iliniza Sur (INAMHI, 2017).

Dentro de la cuenca se localiza la parroquia rural de Mulaló por lo que se considerada como una cuenca rural. La parroquia cuenta con una población aproximada de 15 mil habitantes y una extensión de 509 km<sup>2</sup>, siendo su actividad económica principal, la agropecuaria (INEC, 2010). Las zonas sur y oeste del área de estudio están focalizadas a la producción de cultivos de ciclo corto de maíz, papas, habas, fréjol, zanahoria, y chocho; las actividades agrícolas se distribuyen en las áreas de menor altitud y con poca pendiente, además en estas zonas se localiza gran parte de la industria florícola del cantón de Latacunga y en menor proporción invernaderos dedicados a la producción de hortalizas (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Mulaló, 2020). La ganadería se concentra en la parte oriental donde existen grandes extensiones de pastizales (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Mulaló, 2020). En las zonas mayor altitud, predominan sobre el uso de suelo las zonas naturales de bosques, páramos, vegetaciones arbustivas, eriales y bancos de arena (SIGTIERRAS, 2017) (Figura 1.2).



**Figura 1.2** Uso de suelo de la cuenca alta del río Cutuchi. Modificado de SIGTIERRAS (2017).

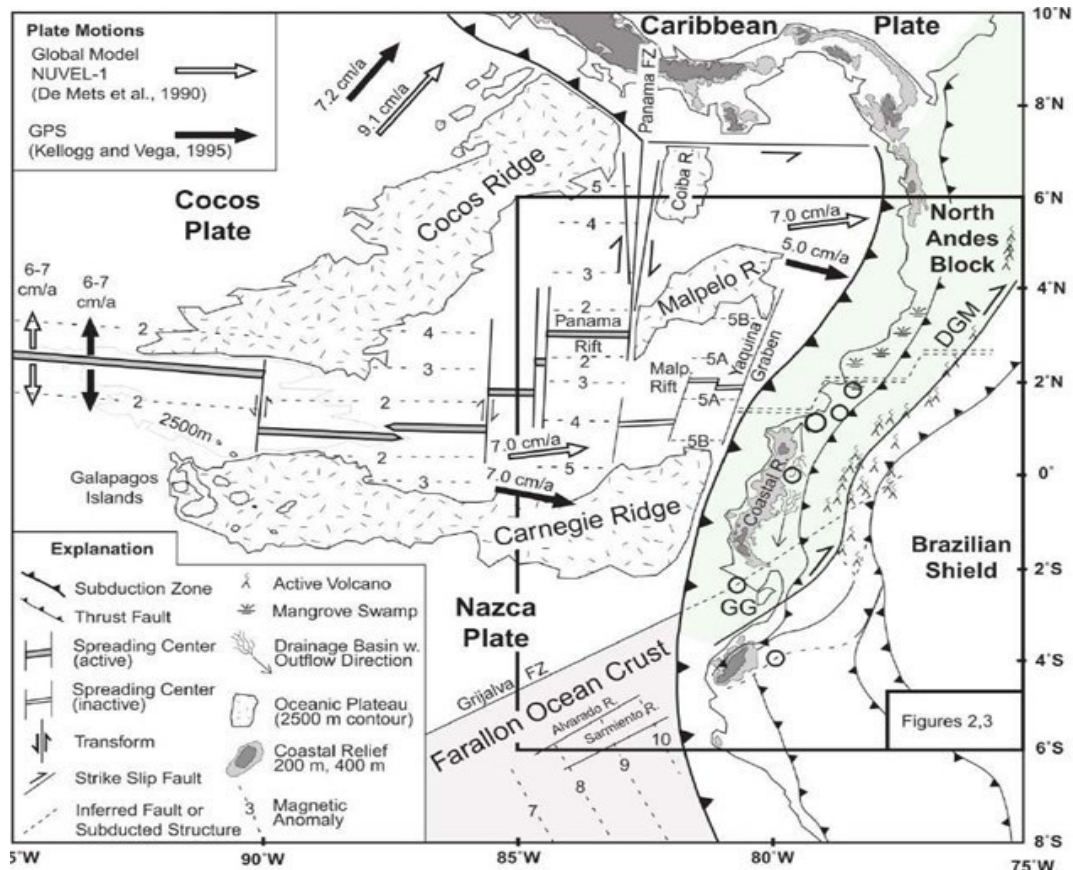
## 1.5. Marco Teórico

### 1.5.1 Geología

#### 1.5.1.1 Geodinámica actual

El Ecuador continental se encuentra bajo un régimen de subducción activo desde hace 190 millones de años (Ma) que caracteriza al país con una intensa actividad volcánica y sísmica (Alvarado et al., 2016). En el contexto actual, este régimen tectónico es producto de la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana desde hace 20 a 12 Ma con un promedio de 58 mm/año en dirección N83°E y una inclinación de 25° a 35° (Gutscher et al., 1999; Lonsdale, 1978; Trenkamp et al., 2002). Este sistema se estableció hace 25 Ma con la fragmentación de la placa Fallarón en las placas Nazca y Cocos a través de la zona de fractura Grijalva (Gutscher et al., 1999) y la presencia de la Cordillera Asísmica de Carnegie (CAC) sobre la placa Nazca (Figura 1.3).





**Figura 1.3** Configuración tectónica del Ecuador mostrando las fallas mayores, movimiento relativo de placas con datos de GPS, modelo cinemático, anomalías magnéticas y volcanes activos. GG = Golfo de Guayaquil; DGM= Mega falla Dolores Guayaquil. Tomado de Gutscher et al. (1999).

Debido a esta geodinámica, a 2°S se genera un cambio en la dirección de la zona de subducción de NS a NNE provocando el desplazamiento del bloque Norandino (NAB) a 1 cm/año a lo largo del sistema de fallas Chingual – Cosanga – Pallatanga - Puná (CCPP) (Alvarado et al., 2014) que se extiende desde Ecuador a Colombia, y probablemente hasta Venezuela (Witt & Bourgois, 2010).

### 1.5.1.2 Geología regional

Geológicamente, el Ecuador se distribuye en cinco divisiones litoestratigráficas: Costa, Cordillera Occidental, Cordillera Real, Valle Interandino y Cuenca Oriente (Witt et al., 2006). Estas divisiones son resultado de la compleja evolución geológica del país, y su interacción entre ciclos de depósito, acreción y generación de terrenos oceánicos y continentales tanto alóctonos como autóctonos.

La Costa está constituida por cuencas sedimentarias de edad Paleógena - Neógena construidas sobre la corteza oceánica de los bloques Piñón, San Lorenzo y Pallatanga, derivados de la Gran Provincia ígnea del Caribe (Reyes, 2013; Vallejo, 2007; Vallejo et al., 2009); La Cordillera Occidental está compuesta por un basamento alóctono de composiciones básicas a intermedias tanto volcánicas como intrusivas y cubiertas por secuencias sedimentarias del Cretácico al Eoceno (Vallejo et al., 2009); El valle Interandino se encuentra ubicado entre las cordilleras Real y Occidental, limitada al oeste por la falla CCPP y al este por la falla Peltetec. Está conformado por secuencias de volcano-sedimentos del Mioceno al Holoceno Tardío procedentes de las cordilleras aledañas (Villagómez, 2003); La Cordillera Real constituye rocas metamórficas y meta-volcano-sedimentarias de edades Jurásicas y Paleozoicas intruidas por granitoides del Mesozoico (Litherland et al., 1994; Spikings et al., 2015). La Cuenca Oriente es una cuenca de trasarco conformada por un relleno marino Cretácico acumulado sobre el Cratón Guayanés (Jaillard et al., 1995).

### **Cordillera Real**

La Cordillera Real en el Ecuador tiene alrededor de 650 km de longitud y 60 km de ancho, se localiza en la región Sierra y al este del valle Interandino. Está constituida por cinturones de rocas metamórficas orientadas con una dirección NNE que involucran 5 grupos tectono-stratigráficos de naturaleza autóctona y alóctona, con edades Paleozoicas hasta del Cretácico Inferior e instruidas por batolitos tipo I y tipo S (Litherland et al., 1994). Estos 5 grupos litotectónicos ordenados de este a oeste son: Zamora, Salado, Loja, Alao y Guamote, limitados entre ellos por fallas regionales que ordenadas de igual manera son: Falla Cosanga-Méndez, Falla Llanganates, Frente Baños y Falla Peltetec (Litherland et al., 1994).

El terreno Guamote está conformado por las unidades Punín, Cebadas y Ambuqui. Litológicamente, el terreno presenta rocas de muy bajo grado metamórfico con un clivaje pizarroso en las unidades pelíticas. Está constituido por cuarcitas rojas a grises, pizarras y filitas negras de origen continental metamorfizadas en el Jurásico-Cretácico Inferior (Litherland et al., 1994), representando una cuña de acreción.

El terreno Alao se caracteriza por las unidades Maguazo y Alao-Paute, divididas por la falla San Antonio. Litológicamente, la Unidad Maguazo está conformada por metaturbiditas de grano fino de muy bajo grado metamórfico, mientras que la Unidad Alao-Paute está

compuesta por meta-andesitas, tobas y aglomerados de facies de esquistos verde tipo Barroviano (Litherland et al., 1994)

En el terreno Loja se encuentran las unidades Chiguinda, Sabanilla, Monte Olivo y los granitoides tipo S de Tres Lagunas. Litológicamente, la Unidad Chiguinda se caracteriza por filitas y cuarcitas negras a grises; la Unidad Monte Olivo presenta anfibolitas, la Unidad Tres lagunas está conformada por granitos gnéisicos con fenocristales de cuarzo azul en granitos tipo S; y la Unidad Sabanilla por facies migmatíticas de estos granitos tipo S.

El terreno Salado está conformado por las formaciones Azafrán, Upano, Cerro Hermoso, Cuyuja y Pucarón. Litológicamente, la Formación Azafrán corresponde a granitoides calco alcalinos tipo I (Litherland et al., 1994); la Formación Upano está conformada por andesitas y volcansedimentos foliados (Litherland et al., 1994); la Formación Cerro Hermoso por metasedimentos y mármoles (Litherland et al., 1994); la Formación Cuyuja por esquistos pelíticos, grafitosos; y la Formación Pucarón está conformada por metasedimentos.

Finalmente, el terreno Zamora conformado por el Complejo Intrusivo Zamora se caracteriza por la presencia de granitoides tipo I y las Unidades Mishauquí, Piuntza, Isimanchi, Santiago. Litológicamente, la Formación Misahuallí está conformada por lavas calcoalcalinas; la Formación Piuntza corresponde a sedimentos metavolcánicos skarnificados; la Formación Isimanchi se compone por filitas y mármoles negros y verdes; y la Formación Santiago por calizas y lutitas negras.

### **Cordillera Occidental**

La Cordillera Occidental consta de un basamento alóctono de origen oceánico, conformado por los terrenos Pallatanga y Machuchi, cubiertos por secuencias sedimentarias, volcánicas, volcanoclásticas del Oligoceno-Holoceno (Vallejo et al., 2009). El terreno Pallatanga de edad Cretácico Temprano-Tardío está expuesto al E de la cordillera Occidental, se compone de turbiditas y rocas ígneas de *plateau* oceánico. (Hughes & Pilatasig, 2002; Lapierre et al., 2000; Reynaud et al., 1999). El terreno Macuchi de edad Paleoceno Tardío-Eoceno (Hughes & Pilatasig, 2002) está expuesto al borde occidental de esta cordillera comprende *pillow* lavas, hialoclastitas, brechas y areniscas turbidíticas de grano grueso con afinidad a arco de isla (Egüez, 1986; Vallejo, 2007).

## **Valle Interandino**

El Valle Interandino representa una depresión topográfica con dirección norte-sur ubicada entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real. Esta depresión presenta un alto control estructural debido a fallas reactivadas que representan los límites estructurales, formadas en un comienzo durante eventos de acreción en el margen continental ecuatoriano (Hall et al., 2008). El Valle interandino se encuentra limitado hacia el E y O por la falla Peltetec y la CCPP, respectivamente. Existen fallas inversas y tipo *strike slip* en la depresión, asociadas con el levantamiento de la cordillera a lo largo del Mioceno y fallas normales como una posible respuesta a la relajación tectónica local (Winkler et al., 2005).

Desde 6-5 Ma (Mioceno Tardío), durante la formación del Valle Interandino se desarrollaron de forma sucesiva de norte hacia el sur las cuencas de Chota, Quito-Guayllabamba, Ambato-Latacunga y Riobamba-Alausí (Winkler et al., 2005).

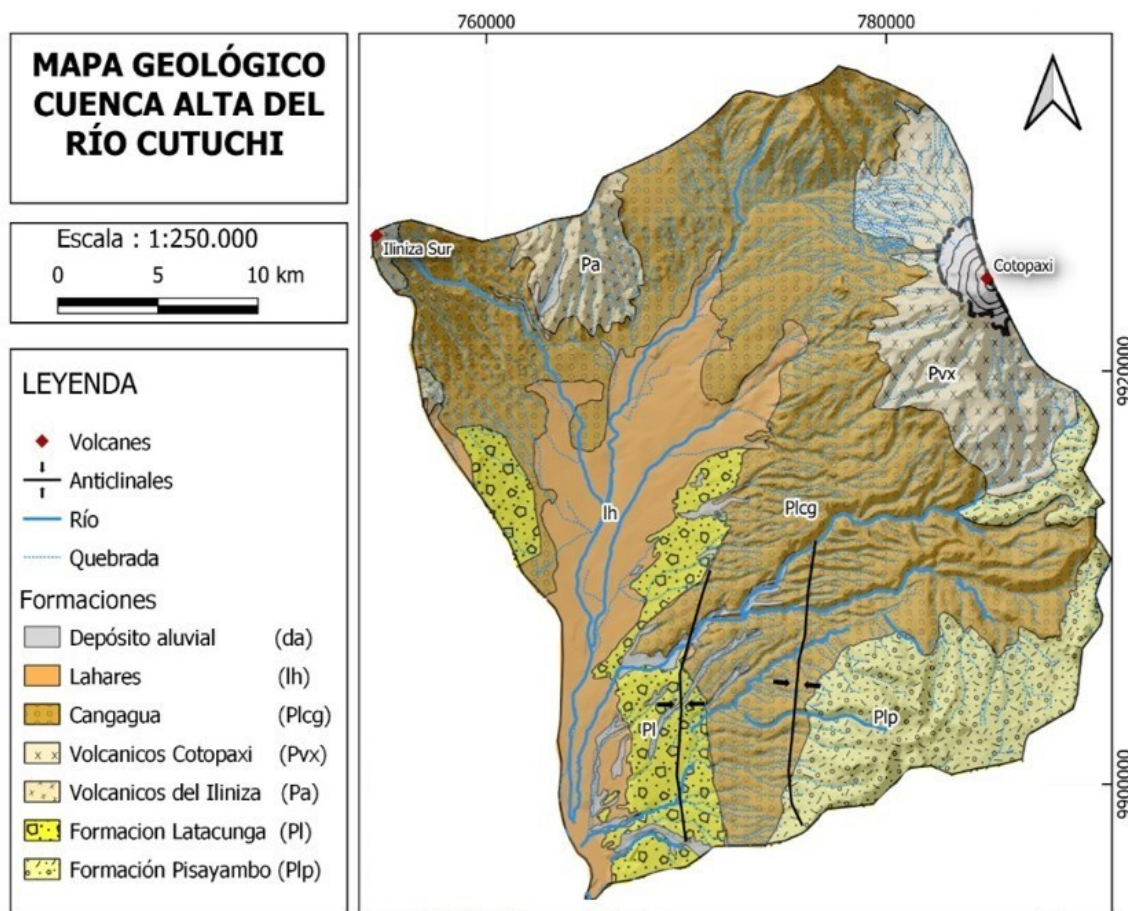
La Geología de estas cuencas está determinada por un relleno sedimentario compuesto de sedimentos de abanico aluvial, fluviales, lacustres y depósitos volcánicos contemporáneos ocurridos a lo largo del arco volcánico en donde existen varios estratovolcanes Plio-Pleistocénicos hasta Holocénicos (Hall et al., 2008). Por lo que, el material volcánico depositado desde hace 5 Ma (Plioceno Inferior) es el que controla la geomorfología del Valle Interandino. Esta cobertura volcánica tiene entre 30 y 40 km de ancho y 360 km de longitud (Alvarado, 1996).

El basamento del Valle Interandino no se encuentra bien definido, ya que por la gran cobertura de sedimentos y volcanosedimentos no se tiene buenos afloramientos o contactos tectónicos que ayuden a interpretarlo, solo existen afloramientos aislados de rocas similares tanto a las de la Cordillera Occidental como a las de la Cordillera Real, que representarían el basamento. Por lo que el basamento podría ser tectónicamente complejo involucrando rocas de la Cordillera Occidental y Real ubicadas en una cuña de acreción dado por el desmembramiento de un pedazo de la Cordillera Real durante el Jurásico Tardío al Cretácico Temprano (Egüez & Aspden, 1993).

### **1.5.1.3 Geología local**

La cuenca alta del río Cutuchi se encuentra dentro de la cuenca geológica Ambato-Latacunga. Esta cuenca presenta un basamento metamórfico indiferenciado Pre-Cretácico

y un relleno volcánico (Figura 1.3). En el área de estudio aflora la Formación Pisayambo, Formación Latacunga, Formación Cangagua, Volcánicos Cotopaxi e Iliniza y depósito de lahares (Figura 1.4).



**Figura 1.4** Geología de la cuenca alta del río Cutuchi. Modificado de las Hojas Geológicas Número 66, 67, 68, 85, 86, 87 realizado por la Dirección General de Geología y Minas-DGGM (1978a, 1978b, 1980, 1981, 1982, 1983).

### Formación Pisayambo

La Formación Pisayambo fue descrita por Kennerley (1971), se encuentra en la parte este de la cuenca Ambato-Latacunga, representa el basamento volcánico de la zona de estudio y está restringida a las zonas altas de la Cordillera Real (Dávila, 1990). Su material volcánico se asocia a un posible origen en fisuras presentes a lo largo de la Cordillera Real (Kennerley, 1971). Presenta una extensión de 111 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca alta del río Cutuchi.

La Formación sobreyace rocas del Cretácico de la Unidad Macuchi o Yungilla y se encuentra superpuesta por la Formación Latacunga con un contacto discordante erosivo (Lozada, 2019). Según Dávila (1990), la edad de la Formación es del Mioceno, esto coincide con dataciones K-Ar realizadas en andesitas por Lavenu et al. (1992). Fue descrita por Hall & Beate (2000) como lavas de composición andesítica a basalto andesítica.

### **Formación Latacunga**

La Formación Latacunga se encuentra presente en toda la cuenca Ambato-Latacunga, sus mejores afloramientos según Lavenu et al. (1992) se encuentran en el flanco izquierdo del río Cutuchi y en los sectores de Salcedo y Píllaro, y la describe como una secuencia de depósitos fluvio-lacustres. La Formación presenta una extensión de 15 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca alta del río Cutuchi y se encuentra sobre la Formación Pisayambo mediante una discordancia angular erosiva (Dávila, 1990).

Según Dávila (1990), la Formación Latacunga se divide en las Unidades: Latacunga, Pilaló de San Andrés-Nagsiche, Yanayacu y Chalupas. La Unidad Latacunga corresponde en la base a una facie volcánica y en la parte superior a una sedimentaria, separadas por una zona transicional; la Unidad Pilaló de San Andrés-Nagsiche son sedimentos lacustres, con cambios de proximal a distal y de nuevo a proximal; la Unidad Yanayacu es un conglomerado de un ambiente fluvial proximal, y la Unidad Chalupas representa un flujo piroclástico de la caldera de Chalupas (Dávila, 1990).

Para Dávila (1990) y la Dirección General de Geología y Minas-DGGM (1980), el techo de la Formación Latacunga está representado por el flujo piroclástico de la caldera de Chalupas, sin embargo, Lavenu et al. (1992) clasifica a la Formación en dos unidades: la Unidad U1 que representa los volcano-sedimentos y la Unidad U2 representada por los depósitos fluvio-lacustres, cambiando a la Unidad Chalupas de Dávila (1990) por la Formación Ignimbrita de Chalupas. Para este estudio se utilizará la clasificación de Lavenu et al. (1992).

Según la clasificación de Dávila (1990), las unidades Pilaló de San Andrés-Nagsiche, Yanayacu y Chalupas son buenas para el transporte de agua subterránea debido a que presentan una alta porosidad. Mientras que, la Unidad Latacunga tiene un alto grado de compactación por lo que no es un buen medio de almacenamiento, ni transporte de agua subterránea.

## **Formación Chalupas**

Según Beate (1985), la Formación Chalupas es definida como un flujo piroclástico subdividido en 3 litofacies: a la base lapilli de pómez; en la parte media un flujo piroclástico de tipo flujo de ceniza poco compactado y no soldado, masivo con fragmentos líticos subangulares a angulares y bloques de pómez dentro de una matriz de ceniza fina; al tope una intercalación monótona de capas centimétricas a decimétricas de ceniza fina y lapilli de pómez con líticos.

Lavenu et al. (1995) definen a la Formación como una toba piroclástica no consolidada. La Formación Chalupas se encuentra sobreyaciendo a la Formación Latacunga y está por debajo de la Formación Cangahua y de los depósitos Cuaternarios. Posee un espesor aproximado de 500 m (Beate & Urquiza, 2015).

## **Formación Cangahua**

La Formación Cangahua es considerada un producto volcánico retrabajado ubicado sobre las Unidades del Valle Interandino y la Cordillera Real. Está compuesta por cenizas volcánicas retrabajadas, sedimentos fluvio-lacustres, y suelos incipientes (Hall & Beate, 2000). Dentro de la cuenca alta del río Cutuchi presenta una extensión de 271 km<sup>2</sup>.

Según Dávila (1990), dentro de la cuenca Ambato-Latacunga esta Formación está compuesta por areniscas tobáceas y depósitos piroclásticos generados durante el volcanismo del Pleistoceno al Holoceno-presente. De acuerdo con Clapperton (1993), se le otorga una edad a la Formación Cangahua del Pleistoceno Medio a Superior.

## **Depósitos cuaternarios**

### **Volcánicos Iliniza**

El complejo volcánico Iliniza localizado en la Cordillera Occidental al noroeste del cantón Latacunga, lo conforman el Iliniza Norte e Iliniza sur, de los cuales el Iliniza Norte es el más antiguo. El Iliniza Norte se formó por dos flujos sucesivos de lava, teniendo un periodo corto de actividad efusiva entre  $123 \pm 6$  y  $116 \pm 2$  ka (Santamaría, et al., 2022), lo que dio origen a rocas andesíticas, flujos de lava dacítica y brechas (Hidalgo et al., 2007).

El Iliniza Sur comenzó su actividad hace 45 ka aproximadamente (Santamaría, et al., 2022). Las partes más altas de este edificio volcánico fueron destruidos por un evento explosivo con un índice de explosividad volcánica de 5, esto formó flujos de lava andesítica y dacítica y grandes depósitos de flujo piroclástico ubicados en los flancos exteriores nombrados como Ignimbrita Jatuncama por Hidalgo et al. (2007).

### **Volcánicos Cotopaxi**

Los depósitos del volcán Cotopaxi constituyen un magmatismo periódico ocurrido durante los últimos 0,5 Ma (Hall & Mothes, 2008). Representan varias coladas de lava con emisión de flujos piroclásticos producidos por la actividad efusiva del Volcán Cotopaxi. En la zona suroriental se tiene algunos flujos de lava jóvenes circundado al volcán, al igual que flujos piroclásticos ácidos de pómez rellenando la parte norte de la caldera de Chalupas (Dirección General de Geología y Minas-DGGM, 1981).

### **Lahares**

Corresponden a los depósitos de lahares recientes provenientes del Volcán Cotopaxi y que han bajado por los paleocanales del río Cutuchi, rellenando el centro de la cuenca (Mothes, 1991).

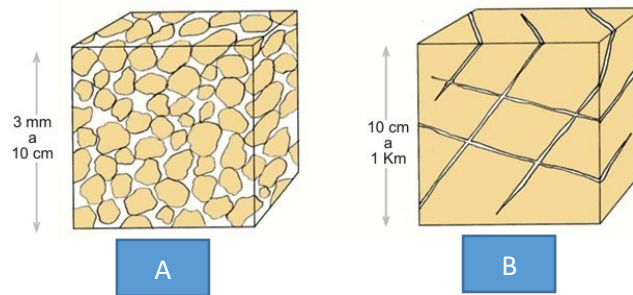
## **1.5.2 Sistema de acuíferos**

Se denomina acuífero al estrato o Formación geológica permeable y saturada que permite el almacenamiento, transmisividad y circulación del agua subterránea por sus poros o fracturas (Freeze & Cherry, 1979).

### **1.5.2.1 Tipos de acuíferos**

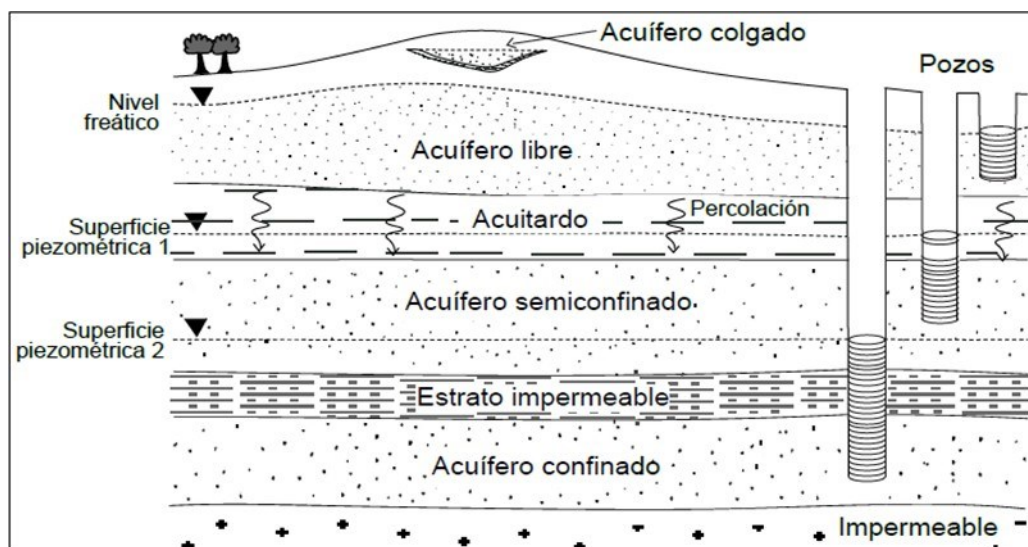
Los acuíferos se clasifican según su porosidad y la presión hidrostática. Según su porosidad, se encuentran los acuíferos con porosidad primaria y secundaria (Figura 1.5). Los acuíferos con porosidad primaria están relacionados a materiales sueltos no consolidados (gravas y arenas, generalmente), el agua circula por los poros o espacios que dejan entre sí las partículas sólidas. Los acuíferos con porosidad secundaria están sujetos a rocas consolidadas, en donde el agua circula por las fisuras y grietas formadas en las mismas (Fuentes, 1993).





**Figura 1.5** A) Porosidad primaria. B) Porosidad secundaria. Tomado de Sánchez (2022)

Según la presión hidrostática los acuíferos se clasifican en libres, confinados y semiconfinados (Figura 1.6). En los acuíferos libres la superficie del agua (nivel freático) está a presión atmosférica, debido a que no tienen encima ningún terreno que actúe como capa confinante, para los acuíferos confinados el techo del acuífero está limitado por una capa de terreno impermeable, con lo cual el agua está sometida a mayor presión que la atmosférica (nivel piezométrico). En los acuíferos semiconfinados el techo del acuífero está limitado por un terreno semipermeable, por lo que permiten un paso vertical del agua y se somete a una presión mayor que la atmosférica. Un caso particular son los acuíferos colgados que se forman por lentes aislados de materiales impermeables, que almacenan de manera local las aguas de infiltración formando un nivel de agua encima del nivel freático de la zona.



**Figura 1.6** Tipos de acuíferos según la presión hidrostática: libre, semiconfinado y confinado. Tomado de Núñez (2021)

### **1.5.2.2 Acuíferos en sistemas volcánicos**

Los acuíferos alojados en rocas volcánicas constituyen un caso muy específico, por lo que es difícil establecer si constituyen o no buenos acuíferos, puesto que depende de las características físicas y químicas de las rocas y de la erupción volcánica que las originó. La naturaleza y estructura de estas rocas en una zona puede variar por lo que se puede disponer de rocas muy compactas con baja porosidad hasta rocas con una porosidad mayor a 50% (Custodio & Llamas, 1976). Los materiales volcánicos engloban rocas de diferente naturaleza alrededor del edificio volcánico; las lavas, piroclastos, tobas y otros elementos forman los depósitos volcánicos condicionados por factores diversos como la edad, distancia al centro de emisión, la tectónica posterior, la erosión, entre otros. Por lo que, las características estructurales y texturales iniciales de los materiales volcánicos pueden ser alteradas por procesos posteriores a su emplazamiento, produciendo alteraciones, colmataciones y compactaciones que disminuyen su porosidad y permeabilidad y, paralelamente, también existen procesos de lixiviado, descompresión y fracturación que aumentarían estas características (Cabrera & Custodio, 2004). Debido a esto sus propiedades hidrogeológicas sean muy variables, presentado una alta heterogeneidad y anisotropía (Custodio & Llamas, 1976).

### **1.5.3 Conceptos básicos para la cartografía hidrogeológica local**

#### **1.5.3.1 Nivel freático y piezométrico**

El nivel freático es la superficie donde la presión del agua en los poros del material poroso corresponde a la presión atmosférica, este nivel de agua corresponde a los acuíferos libres o acuíferos colgados. Mientras que, el nivel piezométrico representa la altura que alcanza el agua en el interior de un pozo medido respecto a un Datum o punto de referencia hasta que se iguala con la presión atmosférica, esto es en acuíferos semiconfinados y confinados, mientras que en acuíferos libres el nivel piezométrico es igual al nivel freático (Freeze & Cherry, 1979; Woessner & Poeter, 2020).

#### **1.5.3.2 Porosidad**

La porosidad es el porcentaje de vacíos de un material y está representada por la relación entre el volumen total de la roca y el volumen de vacíos.

La porosidad efectiva es la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen total de la roca, en ciertos casos la porosidad efectiva puede ser igual o menor a la porosidad total (Tabla 1). Esta porosidad es un factor importante en la permeabilidad de la roca (Woessner & Poeter, 2020).

**Tabla 1.** Rangos de valores de porosidad total y efectiva. Modificado de Woessner y Poeter, 2020.

<b>POROSIDAD TOTAL Y EFECTIVA</b>		
<b>Material no consolidado</b>	<b>Porosidad total</b>	<b>Porosidad efectiva</b>
Grava	0.25 - 0.44	0.13 - 0.44
Arena Gruesa	0.31 - 0.46	0.18 - 0.43
Arena Media		0.16 - 0.46
Arena Fina	0.25 - 0.53	0.01 - 0.46
Limo, sedimento eólico	0.35 - 0.50	0.01 - 0.39
Arcilla	0.40 - 0.70	0.01 - 0.18
<b>Rocas cristalinas y sedimentarias</b>		
Calizas de arrecife y karst	0.05 - 0.50	-
Caliza, dolomita	0.00 - 0.20	0.01 - 0.24
Arenisca	0.05 - 0.30	0.10 - 0.30
Limolita	-	0.21 - 0.41
Basalto	0.05 - 0.50	-
Roca cristalina fracturada	0.00 - 0.10	-
Granito meteorizado	0.34 - 0.57	-
Roca cristalina no fracturada	0.00 - 0.05	-

La porosidad se clasifica en porosidad primaria y secundaria según su origen. La porosidad primaria se desarrolla durante el depósito y litificación de la roca. En la porosidad primaria influyen factores como la uniformidad, empaquetamiento, sorteo y porosidad intrínseca de

cada partícula. La porosidad secundaria se genera debido a procesos que ocurren después de la formación de la roca y aumentan la porosidad efectiva de la roca como la meteorización, fracturamiento, y metamorfismo (Freeze & Cherry, 1979; Woessner & Poeter, 2020).

### 1.5.3.3 Caudal y retención específica

El caudal específico se define como la razón entre el volumen de agua que se puede drenar de una roca por gravedad sobre el volumen total de la roca o sedimento. La retención específica representa el volumen de agua retenido en la estructura de la roca después de que el agua es drenada de la roca por gravedad (Woessner y Poeter, 2020). Ambos coeficientes indican valores adimensionales.

### 1.5.3.4 Potencial hidráulico

El potencial hidráulico ( $\Phi$ ) a través de un medio poroso es una cantidad física y escalar que representa la energía mecánica por unidad de masa de un fluido, puede ser medida en cualquier punto dentro del medio poroso y es igual a la carga hidráulica ( $h$ ) en ese punto multiplicado por la aceleración de la gravedad ( $g$ ) como se indica en la ecuación 2.1 (Freeze & Cherry, 1979).

$$\Phi = gh$$

**Ecuación 2.1.** Cálculo del potencial hidráulico

### 1.5.3.5 Carga hidráulica

La carga hidráulica ( $h$ ), llamada también nivel piezométrico es una medida de la altura de una columna de agua tomado desde un datum geodésico que indica en específico la presión del líquido. Puede ser calculada mediante la ecuación 2.2 que es la suma de la elevación del punto de media o la altura del nivel de agua ( $z$ ) medido respecto a un datum más la carga de presión ( $\psi$ ) (Freeze & Cherry, 1979).

$$h = z + \psi$$

**Ecuación 2.2.** Cálculo de la carga hidráulica

### 1.5.3.6 Gradiente hidráulico

El flujo subterráneo siempre ocurre en la dirección en que el potencial hidráulico decrece (Freeze & Cherry, 1979), por lo que el gradiente hidráulico es una medida adimensional que representa la fuerza impulsora del flujo entre dos puntos y es la diferencia de la carga hidráulica de dichos puntos ( $\Delta h$ ) a lo largo de la trayectoria del flujo ( $\Delta L$ ) como muestra la ecuación 2.3 (Woessner & Poeter, 2020).

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

**Ecuación 2.3.** Cálculo del gradiente hidráulico

Si el gradiente hidráulico es cero no existe flujo subterráneo, ya que la carga hidráulica tiene el mismo valor en todas las partes del medio poroso lo que se conoce como condiciones hidrostáticas.

### 1.5.3.7 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica ( $k$ ) es un coeficiente de proporcionalidad que representa la capacidad de transmisión de un medio poroso, es decir la facilidad que tiene un fluido para pasar a través del medio poroso (Tabla 2). A pesar de que sus unidades son longitud sobre tiempo (L/T) este parámetro no representa una velocidad (Woessner & Poeter, 2020).

**Tabla 2.** Rangos de conductividad hidráulica y permeabilidad intrínseca de material no consolidado. Modificado de Fetter (2001).

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y PERMEABILIDAD INTRÍNSECA		
MATERIAL NO CONSOLIDADO	PERMEABILIDAD INTRÍNSECA (darcy)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/s)
Arcilla	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Limo, limo arenoso, arena arcillosa	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Arena limosa, arena fina	$10^{-2} - 1$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Arena bien seleccionada	$1 - 10^2$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Grava bien seleccionada	$10 - 10^3$	$10^{-2} - 1$

### 1.5.3.8 Transmisividad

La transmisividad hidráulica representa el caudal o tasa de flujo de agua que atraviesa un acuífero de espesor saturado, bajo un gradiente hidráulico determinado. Se puede calcular como la conductividad hidráulica ( $k$ ) por el espesor del acuífero ( $b$ ) (Freeze & Cherry, 1979).

$$T = k * b$$

**Ecuación 2.4.** Cálculo de la transmisividad

### 1.5.3.9 Ley de Darcy

La ley de Darcy es una ley experimental que sirve para describir de forma cuantitativa al flujo del agua subterránea a través de un medio poroso. Esta ley menciona que el flujo ( $q$ ) es directamente proporcional a la conductividad hidráulica ( $k$ ) del material y a la variación de la carga hidráulica ( $\Delta h$ ) e inversamente proporcional a la longitud del medio filtrante ( $\Delta L$ ), llegando a la ecuación 2.4 (Woessner & Poeter, 2020).

$$q = -k * \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

**Ecuación 2.5.** Cálculo del flujo en un medio poroso

El signo negativo indica que el nivel decrece en el sentido del flujo, ya que este se va a mover de un lugar de mayor carga hidráulica a uno de menor carga, es decir que la carga hidráulica disminuye en la dirección del flujo.

Si en esta ecuación se incluye el área de la sección transversal del material poroso ( $A$ ) por el que atraviesa el fluido se obtiene la ecuación 2.5 que da como resultado el caudal ( $Q$ ).

$$Q = -k * \frac{\Delta h}{\Delta L} * A$$

**Ecuación 2.6.** Cálculo del caudal.

Es posible calcular la velocidad real a la que fluye el agua dentro de un medio poroso estimando que el agua no puede circular por toda el área de la sección transversal, sino que fluye a través de los poros que se encuentran interconectados (porosidad efectiva del material), por lo que la velocidad real como se ve en la ecuación 2.6; es igual al flujo ( $q$ ) sobre la porosidad efectiva ( $n_{ef}$ ). Esta velocidad también es conocida como velocidad de

filtración, velocidad intersticial promedio o velocidad lineal promedio (Woessner & Poeter, 2020).

$$v_r = \frac{q}{n_{ef}}$$

**Ecuación 2.7.** Cálculo de la velocidad real

#### **1.5.3.10 Inventario de puntos de agua**

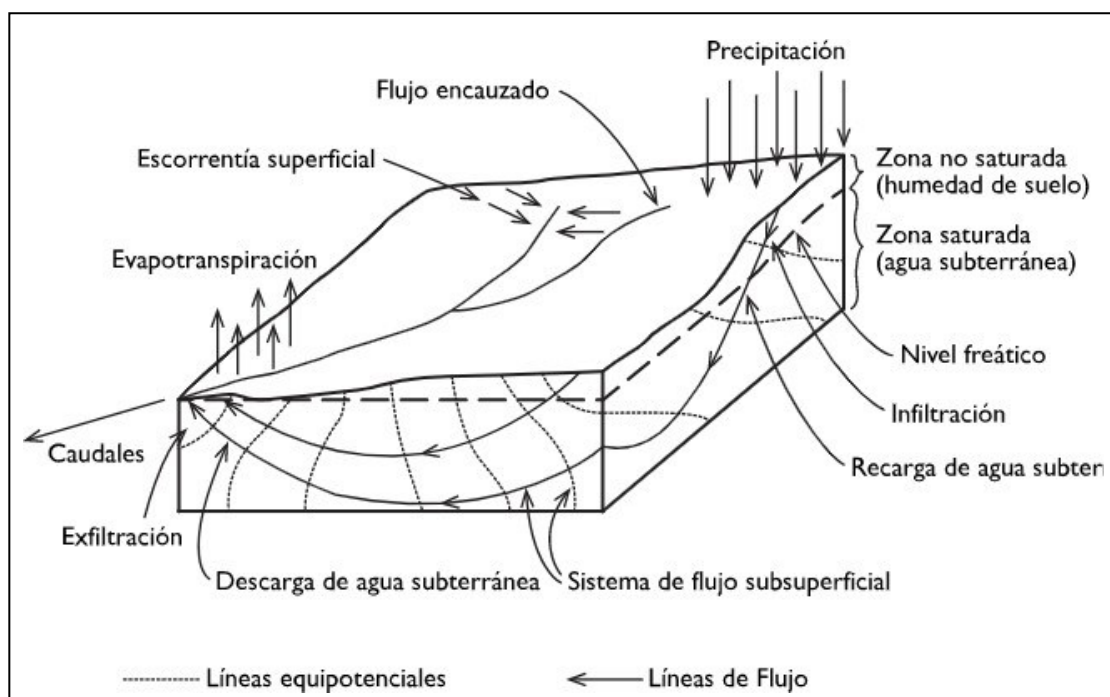
El mapa de inventario de puntos de agua es una herramienta importante dentro de un estudio hidrogeológico en el que se representan los recursos hídricos superficiales y subterráneos de una cuenca como ríos, pozos y vertientes. Esta información es georreferenciada mediante el sistema geodésico de coordenadas WGS84 y diferenciada mediante una leyenda que permita distinguir el tipo de punto de agua para obtener una zonificación de estos recursos dentro del área de estudio. Estos datos son un acceso confiable y rápido a información esencial de los acuíferos de una zona determinada con lo que se puede determinar las áreas de recarga y descarga de la cuenca hidrográfica y las características de flujo del agua subterránea.

Este inventario es fundamental para la valoración de los recursos hídricos, puesto que es la base para un levantamiento hidrogeológico, es decir para la realización de cartografía de agua subterránea (mapas piezométricos, mapas de parámetros fisicoquímicos). La calidad de los mapas van a depender de la escala, la facilidad para llegar a los puntos de agua y los recursos económicos disponibles destinados al estudio (Burbano et al., 2015).

#### **1.5.3.11 Zonas de recarga y descarga**

La zona de recarga se localiza en las zonas altas de una cuenca hidrográfica donde existen las condiciones topográficas y geológicas para que el agua se infiltre y recargue los acuíferos presentes en la cuenca. La recarga en las cuencas hidrográficas se produce de manera regional y local (Freeze & Cherry, 1979). La recarga local es el agua infiltrada producto de la precipitación de la zona. La recarga regional es el agua infiltrada producto del deshielo de los glaciares (Figura 1.7).

La zona de descarga se localiza en las zonas más bajas de las cuencas hidrográficas (Figura 1.7). Estas zonas son evidencias viables para identificar el funcionamiento del agua subterránea, representan el sitio donde el agua aflora (superficie) y la fase final de recorrido del flujo subterráneo (Peñuela & Carrillo, 2013).



**Figura 1.7** Esquema del ciclo hidrológico. Tomado de Freeze & Cherry (1979).

### 1.5.3.12 Líneas equipotenciales y líneas de flujo

Las líneas equipotenciales son trazos de superficies equipotenciales formadas por puntos de igual carga hidráulica. Las líneas de flujo indican el camino seguido por el agua dentro de una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta que el agua se moverá de mayor a menor potencial hidráulico. Estas líneas de flujo van desde la zona de recarga hasta la zona de descarga y siempre son perpendiculares a las líneas equipotenciales como muestra la figura 1.7 (Freeze y Cherry, 1979).

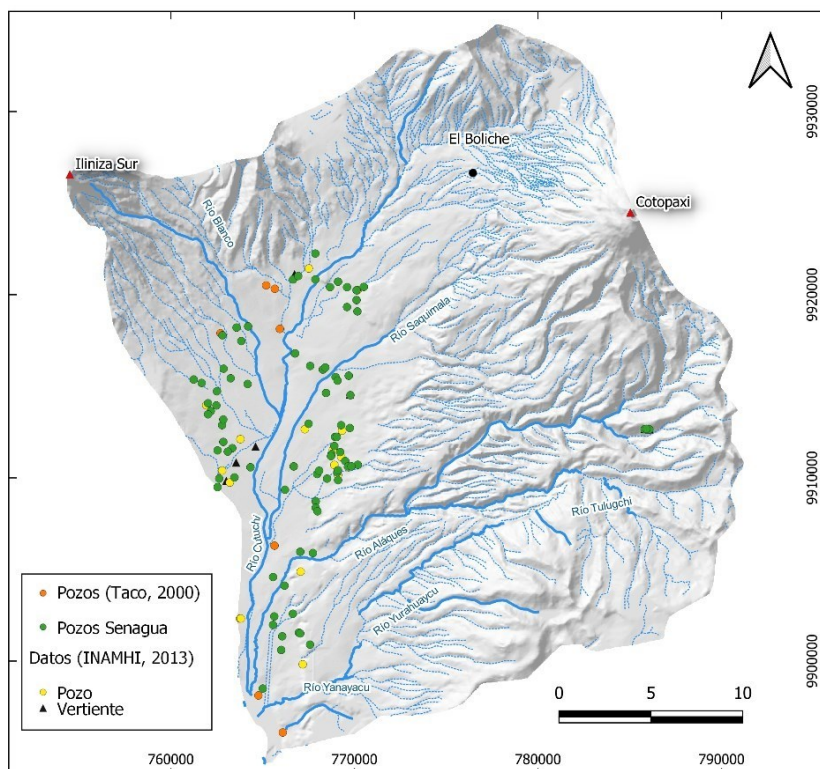


## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Recopilación de información preexistente de puntos de agua subterránea: pozos y vertientes**

Esta fase incluyó el levantamiento bibliográfico y cartográfico de información preexistente disponible para la elaboración de un mapa base para la salida de campo con respecto a la localización de puntos de agua (pozos y vertientes). Se analizó la base de datos de pozos registrados en 2017 por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, actual Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica-MAAE), y el inventario de pozos y vertientes del año 2013 provisto por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Adicionalmente, se consideró el inventario de pozos publicado en el trabajo de titulación de pregrado de Taco (2000) con relación a la cuenca alta del río Cutuchi, provincia de Cotopaxi (Anexo I).

Se comparó la ubicación registrada en cada inventario definiendo los puntos de agua más cercanos y lejanos entre sí con el fin de discriminar pozos o vertientes repetidas pero que presentan proyecciones geográficas diferentes. De esta forma, se determinó el número de puntos de agua factibles de acceso *in situ* y se proyectó su ubicación en el mapa de referencia de la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Ubicación de puntos de agua registrados por la SENAGUA en 2017, INAHMI en 2013, y en el trabajo de titulación de Taco (2000).

## 2.2 Medición del nivel estático del agua de los puntos de agua

Se realizó una campaña de campo para la verificación y muestreo de puntos de agua del 3 al 6 de mayo, 4 al 5 de julio, el 2 y 9 de agosto del 2022. Se organizó la visita técnica a pozos y vertientes según rutas diarias entre los sectores de Aglomerados, Pujilí, Mulaló, José Guango Bajo, y Latacunga. A través de las aplicaciones móviles Avenza Maps, Google Earth y Google Maps, se añadió las rutas a los mapas de referencia para la orientación en espacio según el recorrido programado.

La medición del nivel estático del agua en los pozos se realizó utilizando la sonda piezométrica HT010 (Figura 2.2). Este instrumento consta de un carrete graduado con un electrodo en la punta que se introduce en el pozo, cuando este electrodo entra en contacto con el agua emite un sonido, indicando la profundidad a la que se encuentra el nivel estático del agua.



**Figura 2.2.** Sonda piezométrica para pozos HT010.

### **2.3 Muestreo de rocas y sedimentos del área de estudio**

El muestreo de rocas y sedimentos se realizó durante la campaña de campo del 15 al 17 de julio de 2022, en donde se visitaron distintos afloramientos dentro del área de estudio. El trabajo de campo geológico se desarrolló con base en el mapa geológico bibliográfico a escala 1:250.000 a través de la digitalización de las Hojas geológicas de Machachi, Latacunga, Ambato, Pintag, Chalupas y San José de Polaó realizadas por la Dirección General de Geología y Minas.

En los afloramientos observados se tomó con la ayuda del martillo geológico una muestra representativa de roca de un tamaño aproximado como del puño de la mano, se etiquetó la muestra con un código mediante cinta y se colocó en una bolsa hermética membretada con el nombre del proyecto, código de la muestra, coordenadas, altura y fecha. También se realizó la toma de muestras de sedimentos en Formaciones que no se encontraban consolidadas, en este caso con el martillo se desmoronó la parte de roca y el sedimento se depositó directamente en la bolsa hermética, y se etiquetó con los datos mencionados anteriormente. Para ambas tomas de muestras tanto de rocas como de sedimentos fue importante el evitar las zonas que se encontraban con una alta alteración, para lo cual fue necesario picar la roca hasta encontrar una roca o sedimentos que no presente alteraciones tan marcadas y que sean representativas del afloramiento. Se obtuvieron un total de 12 muestras de rocas y 6 muestras de sedimentos (Anexo II).

Las muestras de roca debido a su grado de consolidación y tipo de roca (ígneas efusivas) fueron empleadas para la elaboración de láminas delgadas a ser utilizadas en las descripciones petrográficas. En las muestras de sedimentos se realizó el análisis

granulométrico que sirvió para detallar las características hidrogeológicas (conductividad hidráulica, porosidad) de las formaciones que posiblemente constituyen acuíferos.

## 2.4 Trabajo de laboratorio

### Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se basó en la toma de muestras de sedimentos de los depósitos de los volcanes Cotopaxi, Ilinizas y Chalupas (Figura 2.3), con el fin de caracterizarlos y relacionarlos con la conductividad hidráulica, porosidad efectiva y velocidad del flujo.



**Figura 2.3.** Muestras tomadas para análisis granulométrico.

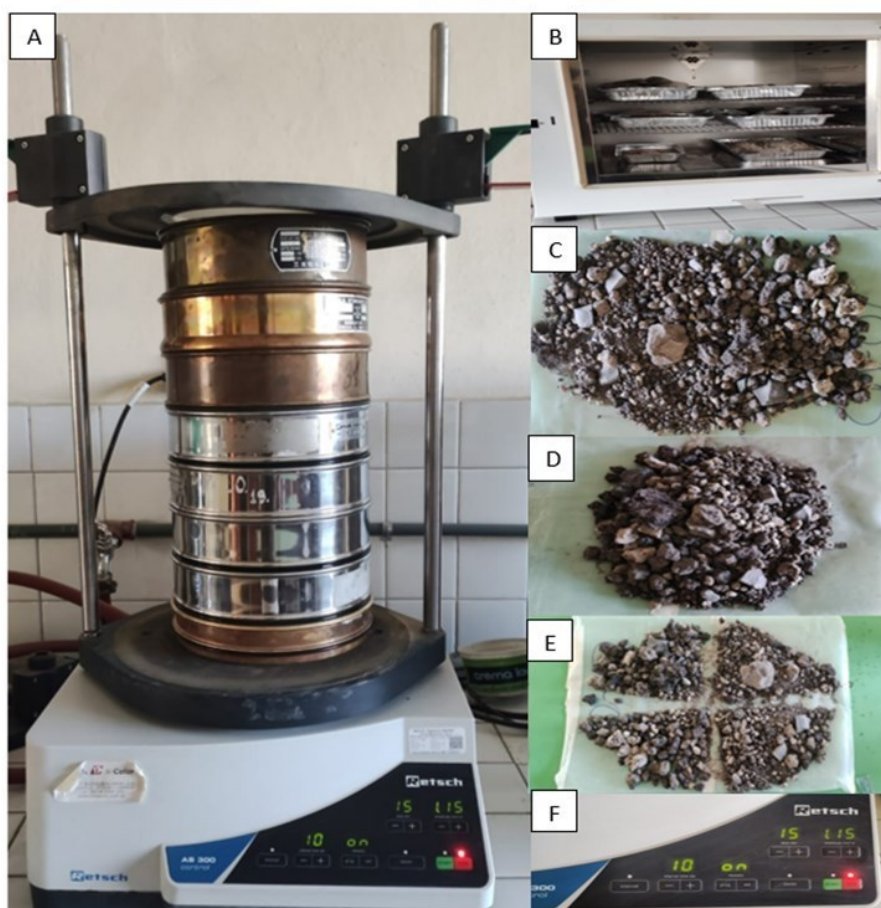
El proceso se basó en la separación y tamizado de cenizas de los depósitos volcánicos muestreados (Figura 2.3). Se partió por secar las muestras colocándolas en un recipiente y sometiéndolas a temperaturas de 80°C por 1 a 2 días hasta que no exista variación de peso. Se disgregó la muestra con el objetivo de obtener una muestra representativa y homogénea a la que se aplicó el siguiente proceso:

- Se colocó toda la muestra tratando de formar un cono sobre una superficie limpia.
- Se aplanó el cono hasta formar un círculo.
- Se dividió el círculo en cuatro partes de manera homogénea.
- Se seleccionó al azar uno de los cuatro cuartos y de igual manera se toma la porción diagonal a este.
- Se tomó los dos cuartos restantes y se seleccionaron como muestra.

Después del cuarteo, se tamizó la muestra con el siguiente proceso:

- Se seleccionó los tamices y se verificó que estos estén limpios, secos y posean el caucho en la parte inferior ya que esto evita perdidas de muestra durante el proceso. Se escogieron un total de 9 tamices con mallas de 15.2 mm (lapilli mediano) a 0.063 (ceniza muy fina) de apertura.
- Se pesó y ordenó los tamices.
- Se vertió la muestra desde la parte superior y se colocó en la tamizadora.
- Se dejó tamizar por 15 minutos y se retiró los tamices de la máquina, considerando evitar pérdidas de muestra y pesar uno por uno.
- Se colocó la muestra de cada tamiz en una funda de plástico o en una bandeja de aluminio.
- Se lavó cada tamiz y se dejó secar para continuar con la siguiente muestra.

En la figura 2.4 se observa partes del procedimiento descrito para la realización de la granulometría de las muestras de sedimentos.



**Figura 2.4.** A) Tamices ordenados. B) secado de muestras. C), D) Y E) Proceso de cuarteo. F) Programación de la máquina tamizadora.

Para el tratamiento de los datos después del tamizado se siguió el siguiente proceso:

- Crear una base de datos en Excel con las respectivas medidas tomadas
- Calcular el peso de la muestra, % retenido y el % que pasa.
- Graficar el peso de la muestra vs % que pasa para obtener nuestra curva granulométrica.
- Calcular los porcentajes de gravas, arenas y limos de la muestra
- Calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura.

En el tratamiento de los datos obtenidos se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.S.C.) para suelos gruesos (Tabla 3).

**Tabla 3.** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos para suelos gruesos. Modificado de Braja (2001)

Criterio para la asignación del símbolo			Símbolo del grupo	Nombres típicos
<b>Suelo de grano grueso</b> Más del 50% retenido en el tamiz núm. 200	<b>Gravas</b> Más del 50% de fracción gruesa retenido en el tamiz núm. 4	<b>Gravas limpias</b> Menos del 5% de finos	<b>GW</b>	Gravas, bien gradadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos
			<b>GP</b>	Gravas, mal gradadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos
		<b>Gravas con finos</b> Más del 12% de finos	<b>GM</b>	Gravas-limosas, mezclas grava-arena-limo
			<b>GC</b>	Gravas-arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla
	<b>Arenas</b> 50% o más de la fracción gruesa pasa por el tamiz núm. 4	<b>Arenas limpias</b> Menos del 5% de finos	<b>SW</b>	Arenas bien gradadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos
			<b>SP</b>	Arenas mal gradadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos
		<b>Arenas con finos</b> Más del 12% de finos	<b>SM</b>	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
			<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Inventario de puntos de agua de la cuenca alta del río Cutuchi

Con base en los datos obtenidos de las campañas de mediciones de niveles estáticos y muestro desde junio a agosto del 2022, se registraron 11 vertientes y 17 pozos en la cuenca alta del río Cutuchi. Se reconocieron 3 pozos taponados, 2 secos y 13 de bombeo. Se midió *in situ* el nivel estático del agua de 10 pozos en la zona de Mulaló (Vt-1, Vt-2, Vt-3, Vt-4, Pz-1, Pz-2, Pz-3, Pz-4, Vt-5, Pz-11, Pz-12, Pz-16, Pz-17) Joseguango Alto y Bajo (Pz-5, Pz-6, Vt-9, Vt-10, Pz-18), Quisínche Bajo, San Agustín de Callo (Pz-13, Pz-14, Pz-15, Vt-11) y Ticatilín (Vt-6, Vt-7, Vt-8). Estos datos se observan en la tabla 4 y están representados en la figura 3.1 (todos los pozos y vertientes registrados dentro y fuera de la cuenca alta del río Cutuchi se encuentran en el Anexo III). Los pozos y vertientes que se localizaron fuera de la cuenca alta del río Cutuchi, fueron registrados y georreferenciados, para completar la base de datos de toda la cuenca del río Cutuchi para posteriores análisis.

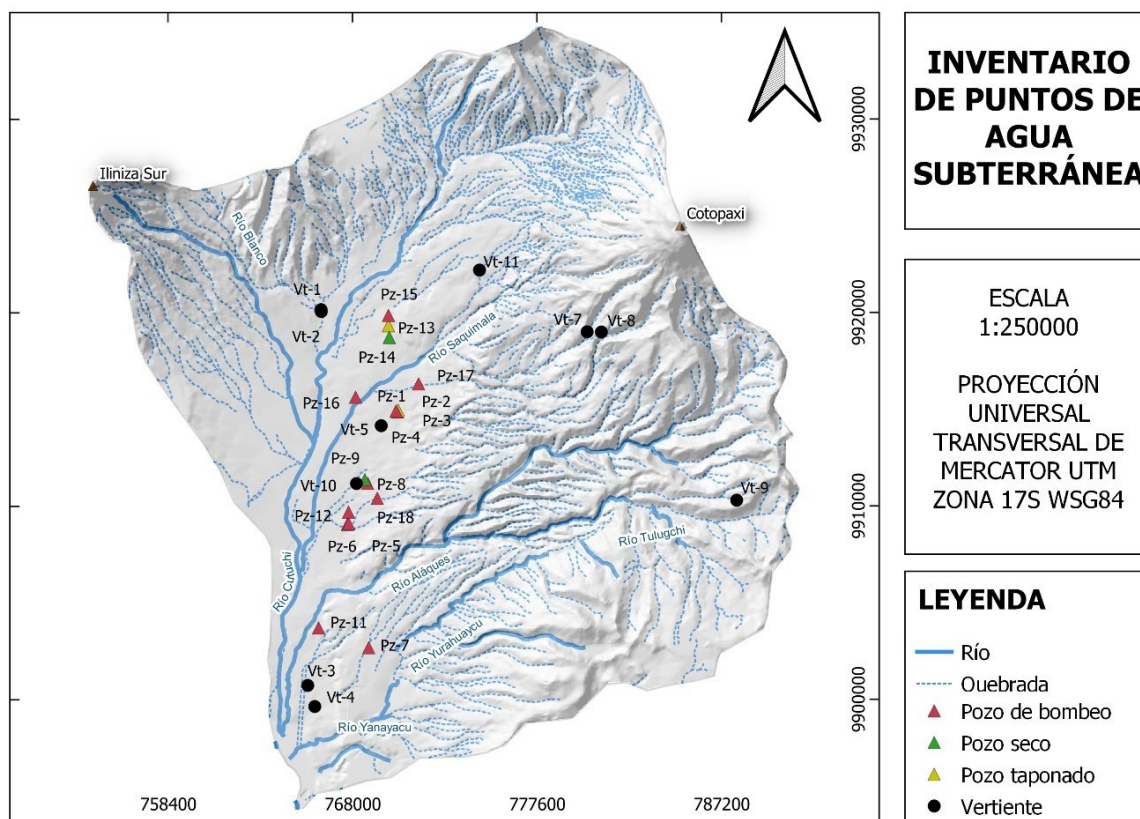


Figura 3.1 Inventario de puntos de agua subterránea de la cuenca alta del río Cutuchi.

La totalidad de los pozos registrados se localizan en zonas relativamente bajas y planas de la cuenca, hacia el margen derecho del río Cutuchi. El nivel estático del agua presenta un valor medio de 13.48 m, con un máximo de 25 m (PZ-12) y un mínimo de 3.3 m (Pz-5).

El pozo Pz-15 ubicado en la parte más alta se encuentra a 3124 m, el pozo Pz-12 se encuentra en la parte más baja a 2855 m. Las 6 vertientes registradas se ubican en las partes altas sobre los 3050 m, 2 en la parte noroeste, 3 en las faldas del Cotopaxi y una en la parte este de la cuenca. Las vertientes restantes se ubican cercanas a los pozos registrados y están por debajo de los 3000 m hasta casi el cierre de la cuenca, a una altura de 2800 m (Figura 3.1).



**Tabla 4.** Datos registrados de los pozos y vertientes dentro de la cuenca alta del río Cutuchi.

<b>Código</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD</b>	<b>Tipo</b>	<b>Nivel estático medido (m)</b>
Vt-1	766359	9920159	3064	Vertiente	-
Vt-2	766368	9920061	3062	Vertiente	-
Pz-1	770347	9914872	3054	Pozo de bombeo	21.14
Pz-2	770365	9914959	3055	Pozo taponado	-
Pz-3	770259	9914910	3054	Pozo taponado	-
Pz-4	770258	9914920	3050	Pozo de bombeo	15.28
Pz-5	767723	9909064	2926	Pozo de bombeo	3.3
Pz-6	767792	9909094	2933	Pozo de bombeo	4.64
Vt-3	765655	9900739	2789	Vertiente	-
Vt-4	766019	9899648	2806	Vertiente	-
Pz-7	768825	9902690	2872	Pozo de bombeo	24.31
Pz-8	768782	9911179	2989	Pozo de bombeo	21.52
Pz-9	768631	9911368	2993	Pozo seco	-
Vt-5	769486	9914160	3033	Vertiente	-
Vt-6	780048	9818561	3629	Vertiente	-
Vt-7	780203	9919008	3715	Vertiente	-
Vt-8	780943	9918996	4002	Vertiente	-
Vt-9	787980	9910296	3951	Vertiente	-
Pz-11	766217	9903712	2855	Pozo de bombeo	6
Pz-12	767781	9909695	2923	Pozo de bombeo	25
Vt-10	768196	9911170	2935	Vertiente	-
Pz-13	769863	9919330	3101	Pozo taponado	-
Vt-11	774603	9922200	3318	Vertiente	-
Pz-14	769906	9918726	3095	Pozo seco	-
Pz-15	769863	9919863	3124	Pozo de bombeo	14.6
Pz-16	768152	9915635	3044	Pozo de bombeo	3.6
Pz-17	771430	9916323	3108	Pozo de bombeo	-
Pz-18	769277	9910408	2992	Pozo de bombeo	-

### 3.1.2 Análisis granulométrico

El trabajo de laboratorio (análisis granulométrico) tuvo como objetivo clasificar a las muestras de sedimentos, así como correlacionarlas con los parámetros de porosidad, conductividad hidráulica, gradiente hidráulico y velocidad del agua subterránea.

Se realizaron las curvas de distribución granulométrica (Anexo IV) y se clasificó el sedimento según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) obteniendo los siguientes resultados (tabla 5).

**Tabla 5.** Clasificación de suelos según S.U.C.S.

Depósito		Muestra	% Grava	% Arena	% Limos	Nombre del suelo según S.U.C.S.	Símbolo
Depósitos volcán Cotopaxi	Cotopaxi 1	CA-06	86	13.9	0.05	Grava Limpia mal gradada	GP
	Cotopaxi 2	CA-01	49.4	48.4	2.2	Grava Limpia bien gradada	GW
Depósitos volcán Iliniza	Iliniza 1	CA-49	66.37	32.65	0.98	Grava Limpia mal gradada	GP
	Iliniza 2	CA-46	46.85	53.08	0.07	Arena Limpia bien gradada	SW
Depósitos volcán Chalupas		CA-19	29.61	67.82	2.57	Arena Limpia mal gradada	SP
		CA-23	31.69	51.82	15.49	Arena limosa o arcillosa	SM o SC

Se determinó que los depósitos del volcán Cotopaxi e Iliniza Sur corresponden a gravas y arenas bien y mal gradadas, por lo que su conductividad hidráulica variaría entre  $1$  a  $10^{-3}$  cm/s y porosidad efectiva entre  $0.16$  a  $0.44$  (Fetter, 2001; Woessner & Poeter, 2020). Por lo tanto, se interpreta que estos materiales constituyen acuíferos detríticos con porosidad primaria en materiales no consolidados. Al aflorar en superficie y estar en contacto con la presión atmosférica formando acuíferos libres.

Los depósitos del volcán Chalupas según la clasificación S.U.C.S. corresponden a una arena limpia mal gradada con un rango de conductividad hidráulica entre  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  cm/s y porosidad efectiva de  $0.16$  a  $0.46$ , y a una arena limosa o arcillosa con rango de conductividad hidráulica entre  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s y porosidad efectiva de  $0.01$  a  $0.46$  (Fetter, 2001; Woessner & Poeter, 2020). La arena limpia mal gradada representa el material poroso en donde fluye y se almacena el agua, mientras que la arena limosa o arcillosa

representaría estratos menos conductivos que servirían como capas semiconfinantes que darían lugar a acuíferos semiconfinados. Los acuíferos dentro de estos depósitos serían acuíferos detríticos con porosidad primaria.

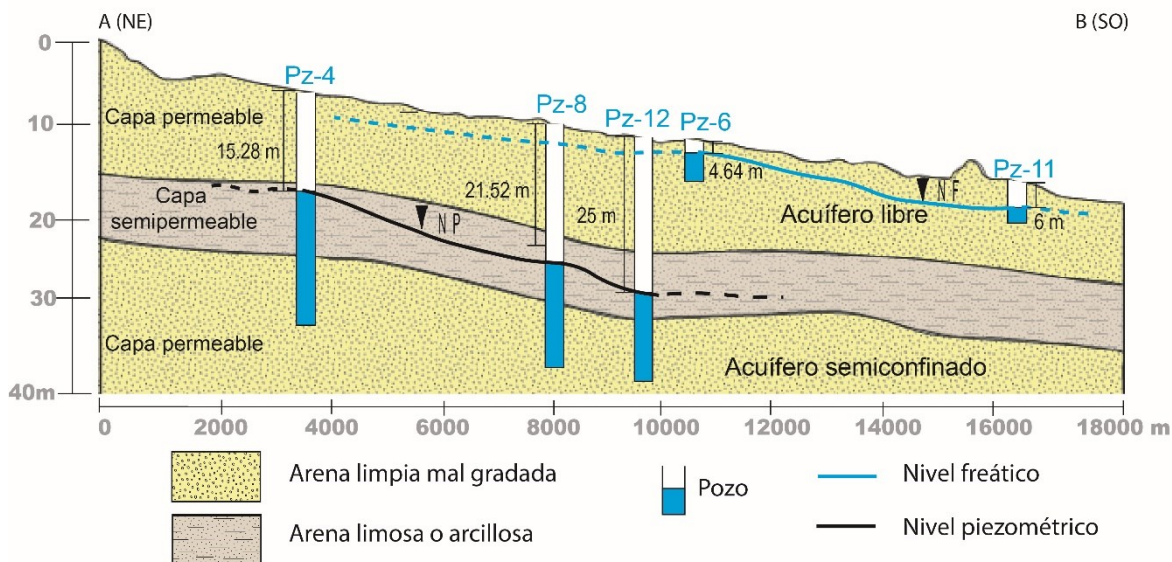
El valor de la carga hidráulica se determinó estimando la diferencia entre la altitud del pozo y su nivel estático (tabla 6). Para las vertientes el valor de la carga hidráulica es igual a su altura. La carga hidráulica presenta un valor medio de 2885.3m, alcanzando valores máximos de 3109.4 m (PZ-7) en zonas de mayor altitud y disminuyendo a 2847.6m en las zonas cercanas al cierre de la cuenca (PZ-15).

**Tabla 6.** Carga hidráulica de los pozos dentro de la Cuenca alta del Cutuchi.

<b>Código</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altura</b>	<b>Nivel estático</b>	<b>Carga hidráulica</b>
Pz-1	770347	9914872	3054	21.14	3032.86
Pz-4	770258	9914920	3050	15.28	3034.72
Pz-5	767723	9909064	2926	3.3	2922.7
Pz-6	767792	9909094	2933	4.64	2928.36
Pz-7	768825	9902690	2872	24.31	2847.69
Pz-8	768782	9911179	2989	21.52	2967.48
Pz-10	769365	9912368	3017	108	2909
Pz-11	766217	9903712	2855	6	2849
Pz-12	767781	9909695	2923	25	2898
Pz-15	769863	9919863	3124	14.6	3109.4
Pz-16	768152	9915635	3044	3.6	3040.4
Vt-1	766359	9920159	3064	-	3064
Vt-2	766368	9920061	3062	-	3062
Vt-3	765655	9900739	2789	-	2789
Vt-4	766019	9899648	2806	-	2806
Vt-5	769486	9914160	3033	-	3033
Vt-6	780048	9818561	3629	-	3629
Vt-7	780203	9919008	3715	-	3715
Vt-8	780943	9918996	4002	-	4002
Vt-9	787980	9910296	3951	-	3951
Vt-10	768196	9911170	2935	-	2935
Vt-11	774603	9922200	3318	-	3318

El perfil hidrogeológico fue elaborado sobre el mapa geológico de la cuenca alta del río Cutuchi con una dirección NE-SO, casi paralela al río Cutuchi y una longitud de 18 km (Anexo V). Los pozos proyectados que atraviesan la línea del perfil son PZ-4, Pz-8, Pz-12, Pz-6 y Pz-11. Todos los pozos se ubican dentro de la Formación Chalupas y sus profundidades no superan el espesor de esta Formación (500m, Beate & Urquizo, 2015), por lo tanto, los acuíferos (libre y semiconfinado) estarían en la Formación Chalupas.

Se agruparon los pozos que presentaron un nivel estático somero menor a 6 (Pz-5, Pz-6, Pz-11, Pz-16) obteniendo un nivel estático medio de 4.39 m, que representaría el nivel freático del acuífero libre. Los pozos con nivel piezométrico (acuífero semiconfinado) mayor a 6 m presentaron una media de 19,37 m (Pz-1, Pz-4, Pz-7, Pz-8, Pz-12, Pz-15). (Figura 3.2).



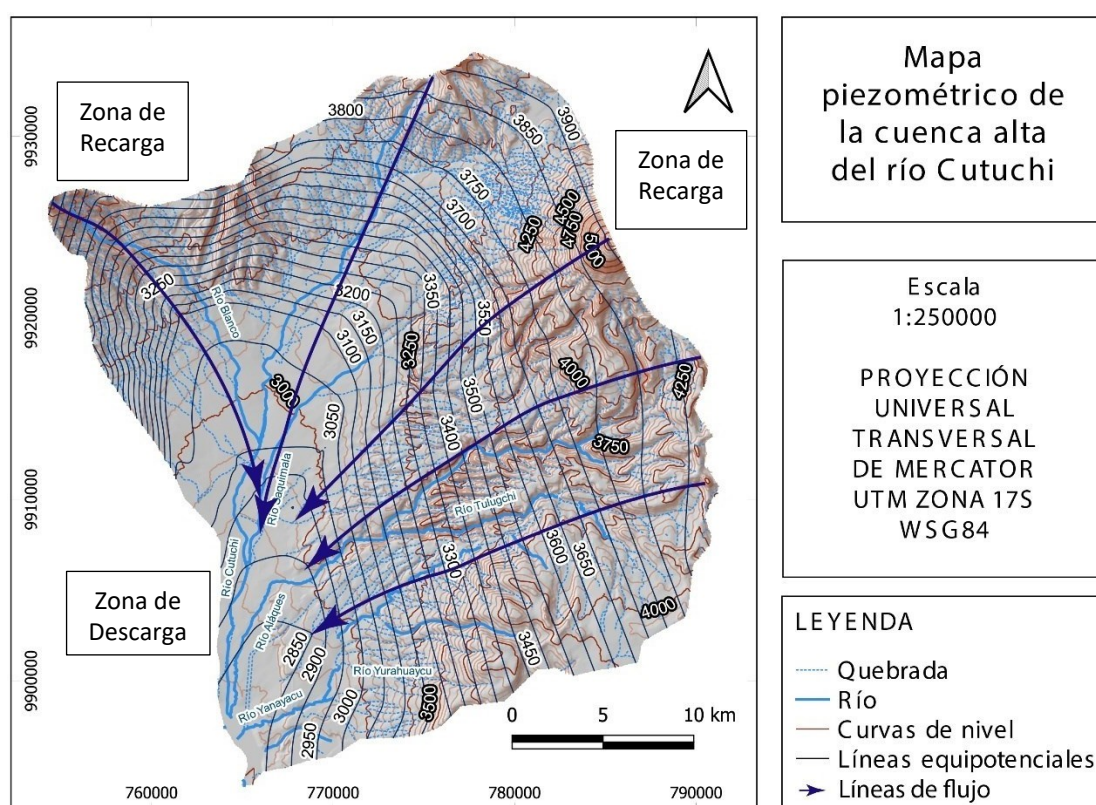
**Figura 3.2.** Perfil hidrogeológico con nivel freático NF; nivel piezométrico NP.

Considerando que los niveles estáticos del agua medidos en campo se registran dentro de la Formación Chalupas, se determinó la velocidad aproximada del flujo subterráneo en esta Formación. Se utilizó los valores de porosidad efectiva (0.16 a 0.46) y conductividad hidráulica ( $10^{-3}$  a  $10^{-1}$ ) presentados por Fetter (2001) y Woessner y Poeter (2020), para una arena limpia mal gradada. Como gradiente hidráulico se tomó el valor calculado entre el pozo Pz-15 al pozo Pz-12 (-0.02037819). Mediante las ecuaciones 2.5 y 2.7 de la ley de Darcy, se obtuvo un rango de la velocidad del flujo entre  $1.27 \times 10^{-4}$  y  $4.43 \times 10^{-3}$  cm/s.

La transmisividad de la Formación Chalupas se calculó tomando los valores de conductividad hidráulica mencionados, con un espesor máximo bibliográfico de 500 m (Beate & Urquiza, 2015) a través de la ecuación 2.4. Como resultado, se obtuvo un rango de transmisividad de  $5.08 \times 10^{-4}$  a  $1.77 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s. Según Freeze & Cherry (1979), una transmisividad superior a  $1.5 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s representa un acuífero apto para la explotación de pozos de agua. Por tanto, se concluye que la Formación Chalupas presenta potencial acuífero.

### 3.1.3 Mapa piezométrico

El mapa piezométrico se realizó con base en los niveles de agua registrados en los pozos que forman el nivel piezométrico (Pz-1, Pz-4, Pz-7, Pz-8, Pz-12, Pz-15). Para el cálculo, se consideró el área de estudio como un medio homogéneo (conductividad hidráulica igual en todos los puntos) e isotrópico (conductividad hidráulica igual en todas las direcciones). Para la triangulación se tomaron en cuenta los valores de las cargas hidráulicas calculadas y se trazó líneas equipotenciales con cargas hidráulicas entre 2850 m y 3850 m, y perpendicular a estas las líneas de flujo. De esta forma, se determinó que el flujo va desde las zonas altas (zonas de recarga) como el Cotopaxi y el Iliniza Sur hacia las zonas más bajas (zonas de descarga) donde confluyen los ríos en el río Cutuchi (Figura 3.3).



**Figura 3.3** Distribución de las líneas equipotenciales y las líneas de flujo de la cuenca alta del río Cutuchi.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- Se registraron y georreferenciaron un total de 11 vertientes y 17 pozos ubicados dentro del área de estudio. Los pozos están distribuidos en las partes relativamente bajas y planas de la cuenca con una tendencia paralela al río Cutuchi, por debajo de los 3125 m hasta los 2855 m. Las vertientes registradas se encuentran en las partes altas, intermedias y bajas de la cuenca.
- Según la granulometría y la clasificación S.U.C.S., los depósitos del Cotopaxi e Iliniza Sur están constituidos por gravas y arenas limpias bien y mal gradadas. Por lo que, tienen características y propiedades favorables para la formación de acuíferos libres. Los depósitos del Chalupas se clasificaron como arena limpia mal gradada y arena limosa o arcillosa. La intercalación de estos materiales daría lugar a la formación de acuíferos semiconfinados.
- Las cargas hidráulicas se encuentran entre 2847.69 m y 3040.4 m, y los gradientes hidráulicos calculados fueron diferentes de cero, lo que indica que existe un movimiento del agua subterránea desde las zonas de recarga (partes más altas de la cuenca) hacia las zonas de descarga (partes más bajas de la cuenca).
- Se registraron niveles de agua someros entre 3.3 m y 6 m los cuales pertenecen al nivel freático de la zona, bajo este se registraron niveles entre 14 m y 25 m dando el nivel piezométrico de un acuífero semiconfinado. La velocidad del flujo y transmisividad fue calculada para el nivel piezométrico dentro de arenas limpias mal gradadas de la Formación Chalupas dando un rango de  $1.27 \times 10^{-4}$  cm/s a  $4.43 \times 10^{-3}$  cm/s para la velocidad y  $5.08 \times 10^{-4}$  a  $1.77 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s de transmisividad. Con el rango de transmisividad se interpreta que en esta formación pueden existir acuíferos explotables.
- El mapa piezométrico fue realizado con base en los pozos que representan al nivel piezométrico. En el mapa, perpendicular a las líneas equipotenciales, se observan las líneas de flujo que tienen una tendencia desde las zonas de recarga representadas por el glaciar del volcán Cotopaxi, Iliniza sur y la Cordillera Real hacia las zonas de descarga donde los ríos confluyen alimentando al río Cutuchi y formando el cierre de la cuenca.

## 4.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio sobre la posible contaminación del agua subterránea en esta cuenca, ya que existe un gran porcentaje del uso de suelo destinado a actividades agropecuarias.
- Realizar pruebas de bombeo en los distintos pozos para generar una caracterización apropiada del sistema de acuíferos pudiendo determinar su almacenamiento y transmisividad.
- Realizar un estudio de los isotopos estables (oxígeno 18 y deuterio) para determinar de forma precisa las principales zonas de recarga del sistema de acuíferos del sector.
- Tener un mejor control sobre las concesiones registradas y los caudales que se ocupan por parte de los organismos de control y regulación públicos, para que exista una base de datos actualizada constantemente y abierta a todo el público para facilitar la realización de proyectos de investigación sobre estos temas.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, A. (1996). *Evolución geológica cuaternaria y paleosismicidad de la cuenca de Quito-Ecuador*.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia, M., Rolandone, F., & Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador: EASTERN LIMIT OF THE NORTH ANDEAN SLIVER. *Tectonics*, 35(5), 1048-1065. <https://doi.org/10.1002/2016TC004117>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., & Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83. <https://doi.org/10.1002/2012TC003224>
- Beate, B. (1985). *El flujo piroclástico de Chalupas como causante de un desastre natural en el Cuaternario de los Andes Septentrionales del Ecuador*.
- Beate, B., & Urquiza, M. (2015). Geothermal Country Update for Ecuador: 2010-2015. *Proceedings, World Geothermal Congress*, 19-25.
- Braja, D. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica—Braja M. Das*.  
<https://www.libreriaingeniero.com/2017/11/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica-braja-m-das.html>
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la hidrogeología del Ecuador* (Segunda). INAMHI. <https://studylib.es/doc/9176398/introducción-a-la-hidrogeología-del-ecuador-2da-edición>



- Cabrera, M. C., & Custodio, E. (2004). Groundwater flow in a volcanic sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12(3).  
<https://doi.org/10.1007/s10040-003-0316-y>
- Clapperton, C. (1993). Quaternary geology and geomorphology of South America. *Undefined*.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Quaternary-geology-and-geomorphology-of-South-Clapperton/6371a05b1eab16b73f1fd8d8c3d9c088f211a7cd>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (Eds.). (1976). *Hidrología subterránea* (1. ed). Omega.
- Dávila Alarcón, F. (1990). *Geodinámica Plio-Cuaternaria de la cuenca de Latacunga-Ambato. Callejón Interandino: Sector entre Salcedo y Píllaro*. EPN.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1978a). *Hoja 66. Hoja geológica Machachi- escala 1:100.000*.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1978b). *Hoja 68. Hoja geológica Ambato- escala 1:100.000*.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1980). *Hoja 67. Hoja geológica Latacunga—Escala 1:100.000*.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1981). *Hoja 86. Hoja geológica Chalupas—Escala 1:100.000*.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1982). *Hoja 87. Hoja geológica San José de Poaló- escala 1:100.000*.
- Dirección General de Geología y Minas-DGGM. (1983). *Hoja 85. Hoja geológica Pintag- escala 1:100.000*.
- Egüez, A. (1986). *Evolution Cénozoïque de la Cordillere Occidentale Septentrionale d'Equateur (0o 15'S – 1o 10'S), les Minéralisations Associeés*.
- Egüez, A., & Aspdén, J. A. (1993). *The mesozoic-cenozoic evolution of the ecuadorian andes*.

- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology* (Fourth).  
[https://arjzaidi.files.wordpress.com/2015/09/unimasr-com\\_e7ce669a880a8c4c70b4214641f93a02.pdf](https://arjzaidi.files.wordpress.com/2015/09/unimasr-com_e7ce669a880a8c4c70b4214641f93a02.pdf)
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*.
- Fuentes, J. L. (1993). *AGUAS SUBTERRANEAS*.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Mulaló. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Mulaló*. 297.
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J.-Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., & Beate, B. (2000). *El volcanismo plio cuaternario en los Andes del Ecuador*. Instituto Geofísico, Departamento de geología EPN.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., & Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 1-6.
- Hall, M., & Mothes, P. (2008). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 675-702. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0161-2>
- Hidalgo, S., Monzier, M., Martin, H., Chazot, G., Eissen, J.-P., & Cotten, J. (2007). Adakitic magmas in the Ecuadorian Volcanic Front: Petrogenesis of the Iliniza Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(4), 366-392.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.007>
- Hughes, R. A., & Pilatasig, L. F. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345(1-4), 29-48.  
[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00205-0)

- INAMHI, I. N. de M. e H. (2017). *Mapa de Isothermas medias anuales de la serie histórica 1981-2010*. . <https://www.inamhi.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/>
- INEC, I. N. de E. y C. (2010). *Censo Nacional Agropecuario (CNA)*.  
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jaillard, É., Ordoñez, M., Benitez, S., Berrones, G., Jiménez, N., Montenegro, G., & Zambrano, I. (1995). *Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: Southern coastal Ecuador during late Cretaceous-late Eocene time*.
- Kennerley, J. B. (1971). *Geology of the Llanganates area, Ecuador*. Prince Gate.
- Lapierre, H., Bosch, D., Dupuis, V., Polvé, M., Maury, R. C., Hernandez, J., Monié, P., Yeghicheyan, D., Jaillard, E., & Tardy, M. (2000). Multiple plume events in the genesis of the peri-Caribbean Cretaceous oceanic plateau province. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B4), 8403-8421.
- Lavenu, A., Noblet, C., Bonhomme, M. G., Egüez, A., Dugas, F., & Vivier, G. (1992). New K-Ar age dates of Neogene and Quaternary volcanic rocks from the Ecuadorian Andes: Implications for the relationship between sedimentation, volcanism, and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 5(3-4), 309-320. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90028-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(92)90028-W)
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jemielita, R. A. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador*.
- Lonsdale, P. (1978). Ecuadorian subduction system. *AAPG Bulletin*, 62(12), 2454-2477.
- Lozada, J. A. (2019). *Análisis de la estratigrafía del Neógeno de la cuenca Latacunga-Ambato, secciones en los valles del río Nagsiche y río Yanayacu*. EPN.
- Mothes, P. (1991). *Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador: Hazard and risk evaluation* | SpringerLink. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2310-5\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-2310-5_7)
- Núñez Caiza, Gabriela Raquel (2021). *Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de la Cuenca baja del río Chambo, Provincia de Chimborazo*.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21335>

- Peñuela Arévalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (2013). DEFINICIÓN DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA A PARTIR DE INDICADORES SUPERFICIALES: CENTRO-SUR DE LA MESA CENTRAL, MÉXICO. *Investigaciones Geográficas*, 81, Article 81.  
<https://doi.org/10.14350/rig.30518>
- Reyes, P. (2013). *Relief evolution along the active margins: Study of the Plio Quaternary Deformation in the coastal Cordillera of Ecuador*. 312.
- Reynaud, C., Jaillard, É., Lapierre, H., Mamberti, M., & Mascle, G. H. (1999). Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: Their place in the geodynamic evolution of northwestern South America. *Tectonophysics*, 307(3-4), 235-254.
- Sánchez, J. (2022). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*.
- Santamaría, S., Quidelleur, X., Hidalgo, S., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Liorzou, C., Lahitte, P., Córdova, M., & Espín, P. (2022). Geochronological evolution of the potentially active Iliniza Volcano (Ecuador) based on new K-Ar ages. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 424, 107489. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107489>
- SENAGUA. (2014). *Mapa de Demarcaciones Hidrográficas del Ecuador Continental, escala 1:250.000, año 2014*.  
<http://qaide.ambiente.gob.ec:8080/geonetwork/srv/api/records/6ccc15d1-5846-4d47-b38e-ed683e31e18e>
- SIGTIERRAS, S. N. de I. y G. de T. R. e I. T. (2017). *Memoria explicativa del Mapa de ordenes del suelo del Ecuador*.  
[http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA\\_MAPA\\_DE\\_ORDENES\\_DE\\_SUELOS\\_MAG\\_SIGTIERRAS.pdf](http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA_MAPA_DE_ORDENES_DE_SUELOS_MAG_SIGTIERRAS.pdf)
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., & Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139.

- Taco Cañizares, L. G. (2000). *Estudio hidrológico de la cuenca del río Cutuchi, aguas arriba de la estación hidrométrica Cutuchi A. J. Yanayacu*. EPN.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)* [PhD Thesis]. ETH Zurich.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. A., Luzieux, L., Heller, F., & Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. En S. M. Kay, V. A. Ramos, & W. R. Dickinson, *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America.
- [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(09\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(09))
- Villagómez, D. (2003). *EVOLUCIÓN GEOLÓGICA PLIO-CUATERNARIA DEL VALLE INTERANDINO CENTRAL EN ECUADOR (ZONA DE QUITO- GUAYLLABAMBA-SAN ANTONIO)*. 148.
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., & 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 Sciences*, 19(1), 5-19.
- <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006>
- Witt, C., & Bourgois, J. (2010). Forearc basin formation in the tectonic wake of a collision-driven, coastwise migrating crustal block: The example of the North Andean block and the extensional Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin (Ecuador-Peru border area). *Bulletin*, 122(1-2), 89-108.
- Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordonez, M., Jimenez, N., & Sosson, M. (2006). *Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape*. 23.

Woessner, W., & Poeter, E. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow*. The Groundwater Project. <https://books.gw-project.org/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>

## 6. ANEXOS

### ANEXO I

Datos SENAGUA

<b>Id</b>	<b>Pozo</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Cond. eléctrica (s/cm)</b>
53	Hacienda Chiag	748999	9921949	2800	7.1	14	180
7	Quebrada Boliche	766660	9920834	3070	5.5	15.5	420
62	Alao Ilactapamba	763373	9898433	2380	5	10	560
3	Cuchihuaicu	769110	9920711	3070	5.5	12.6	230
20	Cashucan	767875	9922249	3760	5.5	8	380
24	San Sebastián	762546	9911499	2918	7	17	2100
749	Las américas	762478	9909353	953	0	0	0
56	Tilipulo	758973	9897518	2880	5.5	12	1500
6	San Agustín	766939	9921022	3085	5.5	12	230
4	San Agustín de callo	769600	9920412	3095	5	12.4	280
22	Preciado Alto	747952	9921861	3420	6.7	13	130
8	Hacienda Boliche	762514	9914729	3075	5	13	450
58	San buenaventura	765636	9902437	2815	5	13.6	240
59	Barrio silvestre	766194	9904118	2830	5.5	13.6	290
35	La comuna de San Agustín	769599	9919328	3095	5	13.8	190
19	Cajon	764338	9910580	3202	5	14	480
27	La libertad	762858	9911963	2959	6	14	1050
37	Jose guaymi buyo	767889	9908365	2938	6	14	590

66	Frente aeropuerto	767050	9901507	2780	7	14.2	750
2	Hacienda Antonio José	768676	9920412	3070	6.5	14.2	405
9	Santa clara	761679	9915183	3010	6	14.4	570
40	Hacienda José guango	768514	9909958	2930	6	14.4	360
10	Barrio goteras	761245	9915372	3035	6	14.5	500
62	Colaya	765571	9904583	2895	6	14.6	290
34	Quisinche	768726	9911186	2975	6	14.6	380
11	Goteras	762179	9913645	3050	5.5	14.8	650
12	Goteras 2	762024	9914077	3015	5.5	14.8	590
18	Rayo de la cruz	764185	9915127	3010	5	14.8	245
39	José guango bajo	767989	9908177	2930	6	14.8	1300
43	Quisinche	767593	9916109	3005	5.5	14.8	900
60	Laigua bellavista	767053	9905965	2925	5.5	15	340
61	Tandalevi	767743	9905898	2900	5	15	340
38	Hacienda San juan	762480	9913955	2890	5	15	545
16	San Pedro	762791	9912882	2970	6	15	780
20	San Sebastián	762544	9909497	2940	5	15	760
31	Pupana Norte	760372	9908547	2930	5.5	15	780
33	Quisinche	768950	9912236	2945	5.5	15	280
41	Jose guango alto	769840	9910632	2955	6	15	740
42	Jose guango alto2	769752	9912723	2995	6	15	800
52	Mariscal sucre	759077	9902441	2925	6	15.4	1040
13	El Calvario	762023	9913468	3000	5.5	15.4	650
15	Tanicuchi 3	762858	9913191	3090	5.5	15.4	490



30	Pupana norte	760317	9908856	2925	6	15.5	900
50	Cucurucho	757998	9904897	2945	6	15.6	920
63	Laigua de Salgado	766649	9902580	2860	5	15.6	390
64	Hacienda Las monjas	767584	9900898	2845	5	15.6	360
70	Patoa Isurietas	758449	9895892	2915	5	15.6	500
17	Piracoto	763261	9915437	2969	6	15.8	788
26	Pilacoto	763347	9911620	2958	6	15.8	1160
46	Cuatro esquinas	762171	9900127	2797	6	16	1450
45	La calera	763029	9900679	2790	5.5	16	770
55	San Gerardo	760780	9901267	2870	5.5	16	1250
57	Cristo rey	765569	9901972	2920	5	16	1500
67	Colatos	760921	9895526	2825	6	16	1720
14	El Calvario	766219	9909351	3005	5.5	15	770
35	Quisinche	769227	9911407	2965	7	16	740
36	Quisinche	768080	9910389	2990	5.5	16	525
53	Poalo	759999	9899055	2918	7	16.2	1040
54	San Gerardo	760500	9898590	2880	5.5	16.2	900
25	Pilacoto	763102	9911432	2965	5.5	16.2	1020
29	Pupana norte	760562	9908668	2935	6	16.2	900
32	Pupana norte	769039	9912236	2920	5	16.2	950
65	Recinto El Carmen	765010	9898499	2805	6	16.6	780
78	Rumipamba en carretera	762171	9900127	2718	6.5	16.6	1310
71	Cashapamba	756600	9895529	2920	6	16.8	2700
28	Pilacoto	760996	9908579	2962	6	16.8	1080
22	Pozo	762634	9909961	2933	6	17	850
51	Hacienda La Compañía	758298	9903758	2955	5.5	17.2	940

49	Chantilin Narvaes	758611	9906280	2922	6	17.4	1460
23	San sebastian	763469	9910027	2945	6	17.4	850
48	La Calera	761396	9907041	2878	6.5	17.8	1320
72	Guápulo	759530	9896755	2955	6	18	1450
47	La Calera	762629	9902129	2860	7	18.2	880
73	Cristo rey (carretera)	760309	9897053	2900	5	18.6	1050
47	Hacienda Villamar	759840	9894442	897	5.5	17.2	100
48	La primavera	767874	9920833	931	5.5	22	200
4280	Colegio Evangélico Tabernáculo	763053	9896435	2744	7.39	23.1	0
4281	Cristo rey	758895	9897633	2922	0	0	0
4282	San Gerardo	760213	9898787	2680	0	0	0
4283	Barrio La Libertad (Pozo N 1)	759766	9900524	2889	8.15	18.3	0
4284	San Gerardo (Pozo N 2)	760024	9899552	2880	0	0	0
4285	Poaló	759085	9902251	2917	0	0	0
4290	La y pozo 2 (Pujilí)	756052	9893665	2968	0	0	0
4292	Barrio 5 de Junio	759293	9907115	2938	7.26	20.4	0
4293	San José de Yanayacu	762812	9917788	3099	6.86	15.2	0
4294	Dali roses (Calvache)	763582	9918206	3088	6.98	18.3	0
4295	San José de Yanayacu (Pastocalle)	762877	9915961	3028	6.98	16.5	0
4296	Calvache Laura (Pastocalle)	763837	9917472	3062	6.94	16.7	0
4297	Hacienda Laurita (Pastocalle)	764210	9918272	3073	6.69	15.1	0

4299	Pijilí	755718	9893682	2950	6.5	0	0
4305	Guápulo	757204	9895832	2941	8.3	0	0
4306	San Gerardo Inchapo	759990	9899210	2869	7.7	0	0
4307	Marquez de Maenza	757827	9902131	2984	7.8	0	0
4308	Cuniquinte	759376	9907200	2923	7.8	0	0
4309	Pujilí	756585	9894541	2950	0	0	0
4310	Polaó	759219	9902130	2845	8.5	17	0
4311	11 de Noviembre	759990	9899517	2840	8.1	17	0
4312	11 de Noviembre	759372	9899671	2860	7.5	18	0
4313	La calera	762156	9900130	2790	0	0	0
4314	Cuatro esquinas	763361	9898440	2797	6	16	0
4315	La calera	763022	9900683	2860	6	18	0
4316	La calera	762621	9902127	2878	6	17	0
4317	Chantilín Narváez	761387	9907045	2922	6	17	0
4318	Mollepamba	759067	9906432	2945	6	15.6	0
4319	Hacienda La Compañía 2	757983	9904896	2955	5.5	15	0
4320	Mariscal sucre	757828	9903974	2925	6	15.4	0
4321	Polaó	759064	9902744	3017	7	16.2	0
4322	San Gerardo 11 nov.	758134	9899058	2880	5	15	0
4323	San Gerardo	760763	9898902	2870	6	16	0
4324	Tilipulo	760765	9901268	2880	6	13	0
4325	San Alfonso	758968	9897521	2920	6	16	0
4326	Inchapo	760916	9895522	2890	6	18	0
4327	Hacienda Patoa	759832	9894447	2990	6	16	0
4329	Cashapamba	758441	9895892	2920	6	17	0

4330	Guápulo	756592	9906587	2955	6	18	0
4331	Cristo rey	759525	9896906	2900	6	19	0
4332	Cristo rey (censo)	760762	9897274	2910	5.5	15	0
4339	San buenaventura	766068	9901352	2806	6.7	0	0
4340	Santa Bárbara	766016	9900606	2803	7	0	0
4341	Barrio Chila de Colatoa	766978	9901548	2822	6.7	0	0
4342	José guango bajo	767898	9908722	2932	6.7	0	0
4343	José guango bajo	767971	9910212	2940	6.7	0	0
4344	Barrio Espinoza	767510	9912956	2922	6.3	0	0
4345	San Isidro	768462	9914634	2958	6.5	0	0
4346	Mulaló	769783	9914516	2965	6	0	0
4347	El Rosal	769279	9912880	2945	6.8	0	0
4348	Quisinche bajo	768909	9911740	2932	6.4	0	0
4349	Quisinche bajo 2	768755	9911296	2910	7	0	0
4350	Guango alto	769502	9910924	2935	6.8	0	0
4351	Guango alto 1	769662	9910628	2945	7	0	0
4352	Guango alto 2	770187	9910716	2980	0	0	0
4353	Guango alto 3	769112	9909876	2939	7	0	0
4354	Guango alto 4	769069	9910304	2940	0	0	0
4355	Guango alto 5	769104	9910418	2940	6.9	0	0
4356	San Agustín	770118	9919708	3060	0	0	0
4357	San Agustín 1	770119	9920244	3062	0	0	0

4358	San Agustín 2	770516	9920426	3070	0	0	0
4359	San Agustín 3	770166	9919090	3055	0	0	0
4360	Hacienda La Serranía	769079	9915310	2976	6.9	0	0
4361	Hacienda La Serranía 2	768974	9915504	2976	0	0	0
4362	Hacienda Rumipamba	769695	9915576	3002	6.7	0	0
4363	Callo boyero	768414	9916024	2992	6.5	0	0
4364	Callo donoso	768281	9915916	2992	6.7	0	0
4365	Rumipamba	766772	9916796	2982	6.8	0	0
4366	Hacienda Baños	785813	9912662	3581	7	32	0
4367	Hacienda Baños 1	785913	9912676	3591	6.4	37	0
4368	Hacienda Baños 2	786071	9912652	3609	6.6	27	0
4369	Agua clara	766695	9910628	3920	7.1	0	0

Datos INAMHI

ID	SECTOR	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	TIPO	NIVEL DEL AGUA (m) (13-04-2013)	NIVEL DEL AGUA (m) (13-11-2013)	DIFERENCIA DE NIVEL (m)	NIVEL PIEZOMÉTRICO HÚMEDO (m)	NIVEL PIEZOMÉTRICO SECO (m)
P2	Barrio Santa Bárbara	766016	9900606	2803	Pozo	1,95	1,80	0,15	2801,05	2801,20
P3	Barrio Chile de Colat	766978	9901548	2822	Pozo	0,35	0,45	-0,10	2821,65	2821,55
P4	José Guango Bajo	767898	9908722	2932	Pozo	5,80	5,90	-0,10	2926,20	2926,10
P5	José Guango Bajo	767971	9910212	2940	Pozo	0,50	0,50	0,00	2939,50	2939,50
P6	Barrio Espinoza	767305	9912655	2922	Pozo	3,40	3,10	0,30	2918,60	2918,90
P7	San Isidro	768451	9914634	2958	Pozo	2,15	2,30	-0,15	2955,85	2955,70
P8	Mulaló	769750	9914539	2965	Vertiente	2965,00	2965,00			
P9	El Rosal	769333	9912580	2945	Pozo	19,10	21,35	-2,25	2925,90	2923,65
P10	Quisinche Bajo	768832	9911540	2932	Pozo	14,90	15,00	-0,10	2917,10	2917,00
P11	Quisinche Bajo	768755	9911296	2910	Pozo	3,50	3,70	-0,20	2906,50	2906,30

P12	José Guango Alto	769283	9911142	2935	Pozo	18,75	18,80	-0,05	2916,25	2916,20
P13	José Guango Alto	769653	9910592	2945	Pozo	25,60	25,55	0,05	2919,40	2919,45
P15	José Guango Alto	769106	9910158	2939	Pozo	10,40	10,25	0,15	2928,60	2928,75
P17	José Guango Alto	768908	9910708	2940	Pozo	12,50	12,65	-0,15	2927,50	2927,35
P22	Hacienda La Serranía	769079	9915310	2976	Pozo	4,25	4,20	0,05	2971,75	2971,80
P24	Hacienda Rumipamba	769695	9915576	3002	Pozo	10,65	11,40	-0,75	2991,35	2990,60
P25	Barrio Callo Boyero	768414	9916024	2992	Pozo	4,05	3,81	0,24	2987,95	2988,19
P26	Barrio Callo Donoso	768281	9915916	2992	Pozo	3,80	3,70	0,10	2988,20	2988,30
P27	Barrio Callo Mancheno	766758	9916794	2982	Pozo	15,10	14,27	0,83	2966,90	2967,73
P28	Hacienda Baños	785813	9912662	3581	Vertiente	3581,00	3581,00			
P29	Hacienda Baños	785913	9912676	3591	Vertiente	3591,00	3591,00			
P30	Hacienda Baños	786071	9912652	3609	Vertiente	3609,00	3609,00			
P31	Barrio Agua Clara	766695	9910628	3020	Pozo	2,30	2,00	0,30	3017,70	3018,00

P32	El Chasqui	767517	9921434	3096	Pozo	5,22	5,60	-0,38	3090,78	3090,40
P33	El Salado	766741	9921114	3076	Vertiente	3076,00	3076,00			
P34	San Agustín del Callo	770180	9920248	3125	Pozo	15,80	15,90	-0,10	3109,20	3109,10
P35	Avelina	764616	9911708	3111	Vertiente	3111,00	3111,00			
P36	Hacienda San Mateo	763792	9912116	2951	Pozo	1,60	1,60	2949,40	2949,40	
P37	El Calvario	761929	9913972	3010	Pozo	14,30	3010,00	2995,70		
P38	San Sebastián	762795	9910402	2940	Pozo	7,40	7,10	0,30	2932,60	2932,90
P39	Guaytacama	762970	9908874	2921	Vertiente	2921,00	2921,00			
P40	Santa Inés	763556	9910836	2947	Vertiente	2947,00	2947,00			
P41	Santa Inés	763022	9909834	2940	Vertiente	2940,00	2940,00			
P42	Santa Inés	763214	9909746	2926	Pozo	2,90	3,20	-0,30	2923,10	2922,80
P43	Pupana Norte	760657	9908516	2944	Pozo	10,70	10,30	0,40	2933,30	2933,70
P44	La Calera	763768	9902318	2847	Pozo	0,10	0,10	0,00	2846,90	2846,90
P45	La Calera	763812	9902322	2836	Pozo	2,00	2836,00	2834,00		
P46	Patután	762841	9902640	2871	Pozo	26,70	26,60	0,10	2844,30	2844,40
P47	Barrio San José	767187	9899822	2823	Pozo	20,50	2802,50			



P48	Las cabañas Alaquez	767072	9904886	2914	Pozo	23,00	22,90	0,10	2891,00	2891,10
P49	Mollepamba	758212	9906188	2955	Pozo	25,15	2929,85			
P50	San Antonio Cruz Loma	762223	9904204	2882	Pozo	10,40	10,50	-0,10	2871,60	2871,50

Datos (Taco, 2000)

ID	Pozo	Longitud	Latitud	Altitud	NIVEL DEL AGUA (m)	NIVEL ESTÁTICO (m)	BASE (m)	Espesor zona saturada (m)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	Conductividad hidráulica (m/día)
1	Nuevo5	762710	9917900	3085	43	3042	2956	86	224.64	2.61
3	19-INE	765195	9920513	3112	52	3060	2974	86	1200	13.95
4	SN-1	765667	9920323	3090	23.6	3066.4	2958	108.4	603	5.56
5	1-PER	765940	9918136	3033	18.2	3014.8	2941	73.8	169.7	2.3
6	17-INE	759103	9906859	2922	7.6	2914.4	2716	198.4	400	2.02
7	4-A	765650	9906300	2867	0.6	2866.4	2450	416.4	67	0.16
8	3-ANO	759053	9902198	2905	16.82	2888.18	2679	209.18	351	1.68
9	7-INE	756650	9896150	2965	79.37	2885.63	2826	59.63	44	0.74
10	15-INE	760321	9898718	2869	11.83	2857.17	2709	148.17	240	1.62
11	6-SSA	764770	9898120	2768	4.84	2763.16	2633	130.16	227.1	1.74
12	6-INE	759860	9895000	2933	71.85	2861.15	2815	46.15	380	8.23
13	2-PER	766100	9896100	2765	5.22	2759.78	2596	163.78	1284	7.84
14	2-SSA	756250	9894395	2954	69.6	2884.4	2836	48.4	347.3	7.18
15	1-INE	757550	9893025	2914	33	2881	2810	71	67.94	0.96
16	1-SSA	756260	9893820	2957	57.59	2888.41	2831	68.41	458.7	6.71

17	5-INE	755444	9893522	2987	84.1	2902.9	2894	8.9	140	15.73
18	3-SSA	756200	9892475	2955	59.2	2895.8	2836	59.8	491.5	8.22
19	10-INE	755769	9891987	2967	62.1	2904.9	2844	60.9	200	3.28
20	2-INE	755200	9891450	2971	63.95	2907.05	2833	74.05	82	1.11
21	4-INE	757040	9891475	2950	52.52	2897.48	2860	37.48	380	10.14
22	3-INE	758800	9892040	2934	71.28	2862.72	2835	27.72	243	8.77
23	13-INE	758974	9886538	2977	82.1	2894.9	2846	48.9	164	3.354

## ANEXO II

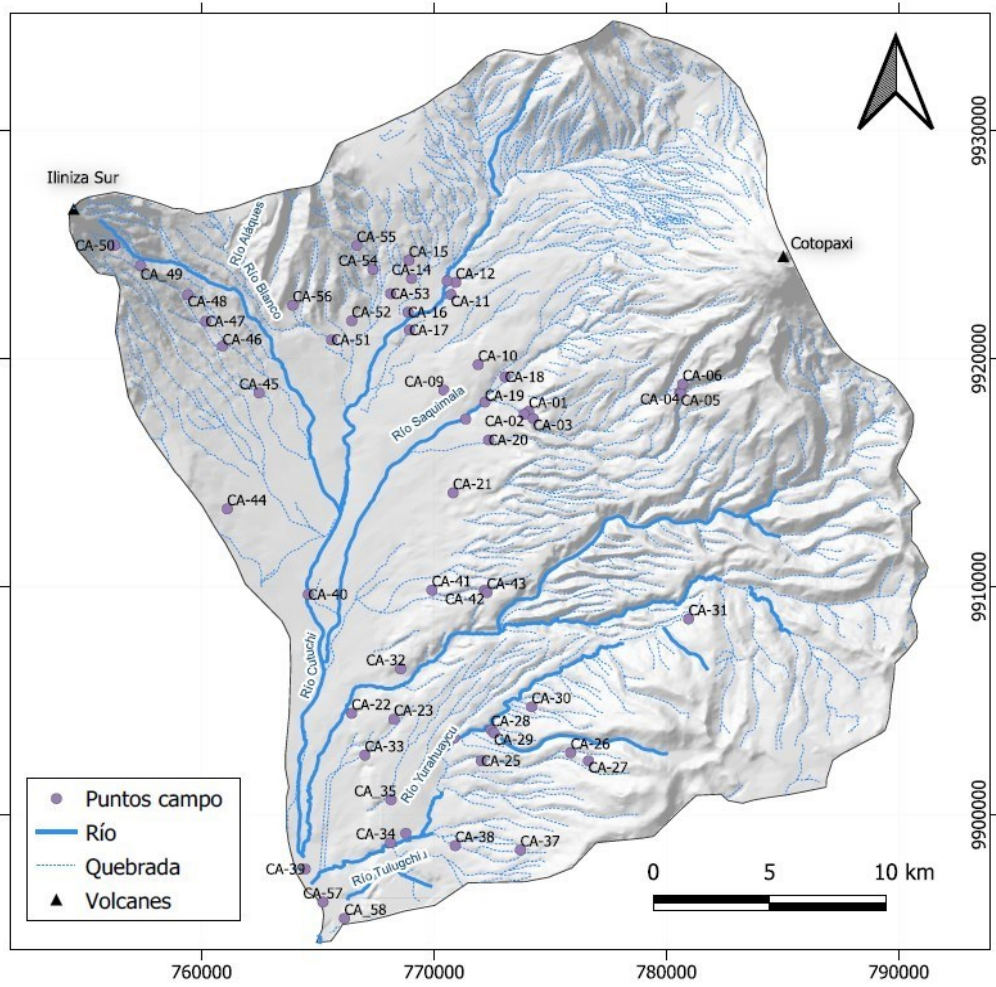
### Ubicación de los afloramientos

Código	UTM y	UTM X	Formación
CA-01	9917685.41	774083.676	Cotopaxi 2
CA-02	9917550.66	773887.498	Lahar Cotopaxi
CA-03	9917371.38	774273.784	Ignimbrita de chalupas
CA-04	9918512	780574	Cotopaxi 2
CA-05	9918459.9	780632.196	Ignimbrita de chalupas
CA-06	9918876.19	780707.585	Cotopaxi 1
CA-07	9919103.09	781433.743	Cotopaxi 1
CA-08	9917342.55	771365.898	Lahar Cotopaxi
CA-09	9918610.62	770427.965	Ignimbrita de chalupas
CA-10	9919732.9	771904.814	Cotopaxi 2
CA-11	9922807.11	770737.153	Cotopaxi 2
CA-12	9923341.24	770939.937	Lahar Cotopaxi
CA-13	9923401.7	770572.263	Ignimbrita de chalupas
CA-14	9923515.09	769037.495	Ignimbrita de chalupas
CA-15	9924309.17	768922.655	Ignimbrita de chalupas
CA-16	9922032.78	768882.166	Lahar Cotopaxi
CA-17	9921253.01	768941.352	Ignimbrita de chalupas
CA-18	9919198.93	773062.787	Ignimbrita de chalupas
CA-19	9918092.6	772194.697	Ignimbrita de chalupas
CA-20	9916431.22	772356.743	Lahar Cotopaxi
CA-21	9914112.54	770822.883	Ignimbrita de chalupas
CA-22	9904443.15	766458.543	Ignimbrita de chalupas
CA-23	9904188.15	768282.412	Ignimbrita de chalupas

CA-24	9903358.97	770869.447	Ignimbrita de chalupas
CA-25	9902361.91	772037.883	Cangahua
CA-26	9902716.53	775886.283	Formación Latacunga
CA-27	9902360.19	776654.263	Formación Latacunga
CA-28	9903719.31	772457.413	Cangahua
CA-29	9903584.88	772585.072	Formación Latacunga
CA-30	9904727.07	774205.246	Formación Latacunga
CA-31	9908580.37	780957.647	Formación Latacunga
CA-32	9906392.16	768571.367	Lahar Cotopaxi
CA-33	9902606.55	767028.834	Ignimbrita de chalupas
CA-34	9898768.67	768129.694	Ignimbrita de chalupas
CA_35	9900651	768155	Cangahua
CA-36	9899176.9	768794.458	Contacto Ignimbrita con Cangahua
CA-37	9898452.23	773723.031	Formación Latacunga
CA-38	9898640.14	770918.599	Cangahua
CA-39	9897611.24	764457.932	Lahar Cotopaxi
CA-40	9909656.77	764592.538	Lahar Cotopaxi
CA-41	9909848.93	769912.112	Ignimbrita de chalupas
CA-42	9909838.48	772176.083	Ignimbrita de chalupas
CA-43	9909739.25	772281.733	Contacto Ignimbrita, Cangahua y Lahar del Cotopaxi
CA-44	9913409.48	761103.455	Iliniza 2
CA-45	9918497.06	762473.891	Iliniza 2
CA-46	9920548.32	760903.332	Iliniza 2
CA-47	9921635.55	760176.481	Iliniza 2
CA-48	9922798.31	759406.175	Iliniza 1
CA_49	9924082.89	757375.569	Iliniza 1

CA-50	9924964.87	756262.406	Iliniza 1
CA-51	9920822.4	765595.579	Ignimbrita de chalupas
CA-52	9921656.2	766465.229	Ignimbrita de chalupas
CA-53	9922844.63	768136.091	Ignimbrita de chalupas
CA-54	9923913.27	767375.253	Ignimbrita de chalupas
CA-55	9924961.46	766681.853	Ignimbrita de chalupas
CA-56	9922340.18	763926.691	Ignimbrita de chalupas
CA-57	9896169.11	765224.061	Lahar Cotopaxi
CA_58	9895450.68	766149.287	Ignimbrita de chalupas

Mapa de ubicación de los afloramientos



## ANEXO III

Tabla de los puntos de agua

FECHA	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	SECTOR	TIPO	Nivel del agua (m)	Tamb (°C)	pH	CE (?S/cm)	T (°C)	Oxigeno disuelto	Eh (mV)
3/05/2022	766359	9920159	3064	Hacienda El Salado	Vertiente		13.9	7.01	450.3	13.5		2.8
								10.31	447.3	13.52	2.97	
3/05/2022	766368	9920061	3062	Hacienda El Salado	Vertiente		18.9	7.23	608.2	14.1		-9.6
									587	14.09	3.25	
3/05/2022	766374	9919897	3062	Hacienda El Salado	Río (descarga)							
4/05/2022	760040	9892271	2857	Chugchilán (Inchapo-Guambaló)	Vertiente		15.9	7.26	853.7	16.1		-11.4
									854.2	16		
4/05/2022	760152	9892247	2857	Chugchilán (Inchapo-Guambaló)	Vertiente		18.5	6.65	1028	18.8		22.6
4/05/2022	759576	9894549	2951	Inchapo	Pozo abierto	76.7	23.8	6.96	1513	19.3		5.3
									1595	17.44	5.32	
4/05/2022	758002	9898005	2953	Barrio San José, La Victoria	Pozo abierto	69						
4/05/2022	756748	9897086	2962	La Victoria vía Pujilí	Pozo taponado							
4/05/2022	756566	9897992	2988	La Victoria	Pozo taponado							
	756182	9898230	3010	La Vitoria Centro								
4/05/2022	756762	9896569	2966	La Victoria vía Pujilí	Pozo abierto		23	7.98	1224	20.9		-51.7



4/05/2022	755173	9893128	2999	Pujilí, vía Isinche	Pozo abandonado								
4/05/2022	755016	9891056	2976	Pujilí	Pozo abandonado								
5/05/2022	770347	9914872	3054	Mulaló	Pozo abierto	21.14							
5/05/2022	770365	9914959	3055	Mulaló	Pozo taponado								
5/05/2022	770259	9914910	3054	Mulaló	Pozo taponado								
5/05/2022	770258	9914920	3050	Mulaló	Pozo abierto	15.28		6.69	216.7	16.1			20.8
5/05/2022	767723	9909064	2926	José Guango Bajo	Pozo abierto	3.3	13	7.76	1993	14.4			-40.3
									1387	14.9			
5/05/2022	767792	9909094	2933	José Guango Bajo	Pozo abierto	4.64	13.3	7.4	723.1	13.8			-18.6
6/05/2022	765364	9898508	2735	La Cocha-Latacunga	Pantano								
6/05/2022	765655	9900739	2789	Bellavista	Vertiente		19	7.16	932.7	17.1			-5.8
								7.22	762	17.1			-2.8
6/05/2022	766019	9899648	2806	Bellavista	Vertiente		20.7	8.24	1492	17.1			-65.5
6/05/2022	768825	9902690	2872	Quisínche Bajo	Pozo abierto	24.31	21.8	6.64	737.6	16			23.7
6/05/2022	768782	9911179	2989	Quisínche Bajo	Pozo abierto	21.52							
6/05/2022	768631	9911368	2993	Quisínche Bajo	Pozo seco								
6/05/2022	769365	9912368	3017	El Rosal - Mulaló	Pozo abierto	108	27.8	6.89	595.1	17.8			9
5/07/2022	769486	9914169	3033	Mulaló	Vertiente		15.8	6.36	232	15.2			45.6
6/07/2022	780048	9918561	3629	Mulaló	Vertiente		13.4	7.01	47.9	10.4			9.2

6/07/2022	780203	9919008	3784	Mulaló	Vertiente		14.7	7.2	50.3	9.1		-1.6
6/07/2022	780943	9918996	4002	Mulaló	Vertiente		12.7	7	51.8	10.6		9.7
6/07/2022	767980	9910296	3951	Mulaló	Vertiente		17.9	7.71	445	16.7		-30.8
2/08/2022	766217	9903712	2855	Mulaló	Pozo abierto	6						
2/08/2022	767781	9909695	2923	Mulaló	Pozo abierto	25	16.4	7.12	604	17.2		2.9
2/08/2022	768196	9911170	2935	José Guango Bajo	Vertiente		19.5	7.86	556	19.9		-39.6
9/08/2022	769863	9919330	3101	San Agustin de Callo	Pozo taponado							
9/08/2022	774603	9922200	3318	Chiri yacu Colcas	Vertiente			6.65	140.1	10.4		26
9/08/2022	769906	9918726	3095	San Agustin de Callo	Pozo seco							
9/08/2022	769863	9919863	3124	San Agustin de Callo	Pozo abierto	14.6		6.95	221	15.1		5
9/08/2022	768152	9915635	3044	Mulaló	Pozo abierto	3.6		6.69	288	14.6		19.1
9/08/2022	771430	9916323	3108	Mulaló	Pozo con bomba			6.13	297	14.7		49.6
9/08/2022	769277	9910408	2992	José Guango Alto	Pozo con bomba			7.71	521			-38.3

Fotografía de los pozos y vertientes muestreados

## Vertiente El Tambo









# Vertiente El Purgatorio









Vertiente Cóndor Sacha



## Vertiente Rasulaca





## Vertiente Hacienda Yeroví





## Pozo Avícula Maricela



## ANEXO IV

### Tablas granulometría

<b>CA-23</b>			
Unidad	Ignimbrita de Chalupas		
UTM	9904188 / 768282		
Peso muestra seca (g)	541.9		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	122.33	22.5742757	77.4257243
9.5	13.94	2.57243034	74.853294
4.75	35.45	6.54179738	68.3114966
2	53.09	9.79701052	58.5144861
1	41.87	7.72651781	50.7879683
0.5	56.78	10.477948	40.3100203
0.25	43.22	7.97564126	32.334379
0.125	45.64	8.42221812	23.9121609
0.063	45.65	8.42406348	15.4880974
Fondo	83.93	15.4880974	0
	541.9	100	

CA-46			
Unidad	Iliniza 2		
UTM	9920548 / 760903		
Peso muestra seca (g)	396.39		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	8.04	2.02830546	97.9716945
9.5	13.42	3.38555463	94.5861399
4.75	49	12.3615631	82.2245768
2	115.26	29.0774237	53.1471531
1	89.06	22.4677716	30.6793814
0.5	108.52	27.3770781	3.30230329
0.25	8.22	2.07371528	1.22858801
0.125	4.11	1.03685764	0.19173037
0.063	0.47	0.1185701	0.07316027
Fondo	0.29	0.07316027	0
	396.39	100	

CA-19			
Unidad	Ignimbrita de Chalupas		
UTM	9918092 / 772194		
Peso muestra seca (g)	473.61		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	56.65	11.9613184	88.0386816
9.5	14.74	3.11226537	84.9264162
4.75	24.41	5.15402969	79.7723866
2	44.43	9.38113638	70.3912502
1	37.02	7.81655793	62.5746923
0.5	77.64	16.3932349	46.1814573
0.25	59.18	12.4955132	33.6859441
0.125	69.63	14.70197	18.9839742
0.063	77.74	16.4143494	2.5696248
Fondo	12.17	2.5696248	1.5099E-14
	473.61	100	

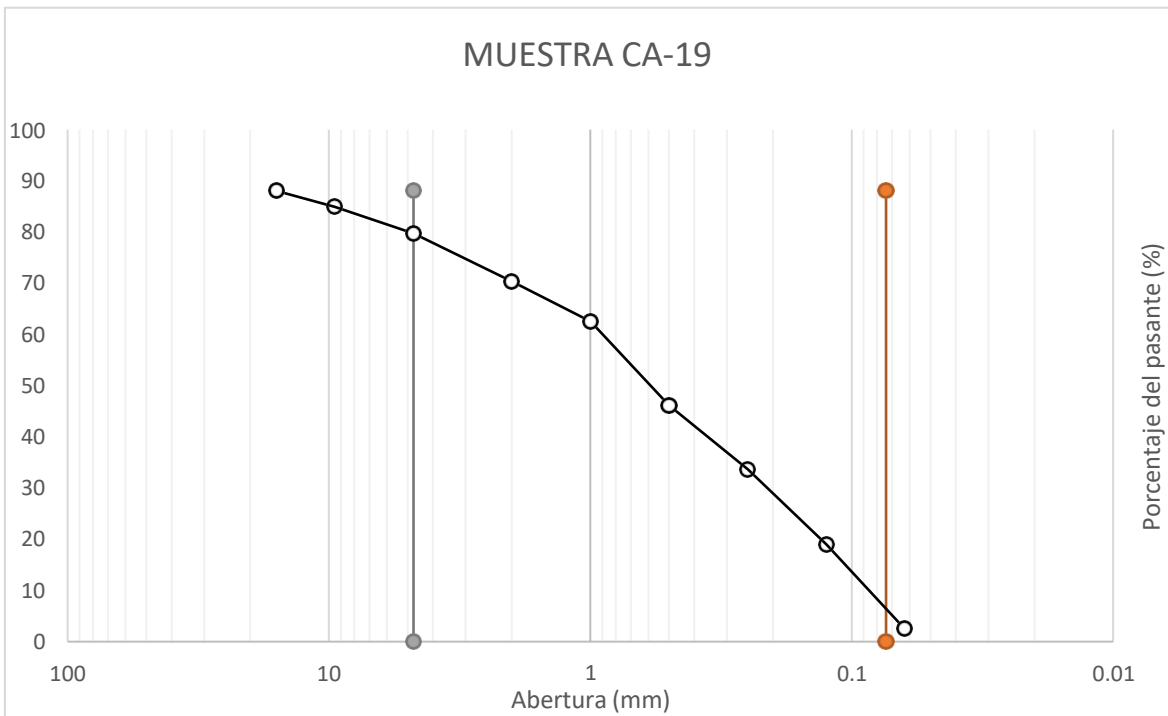
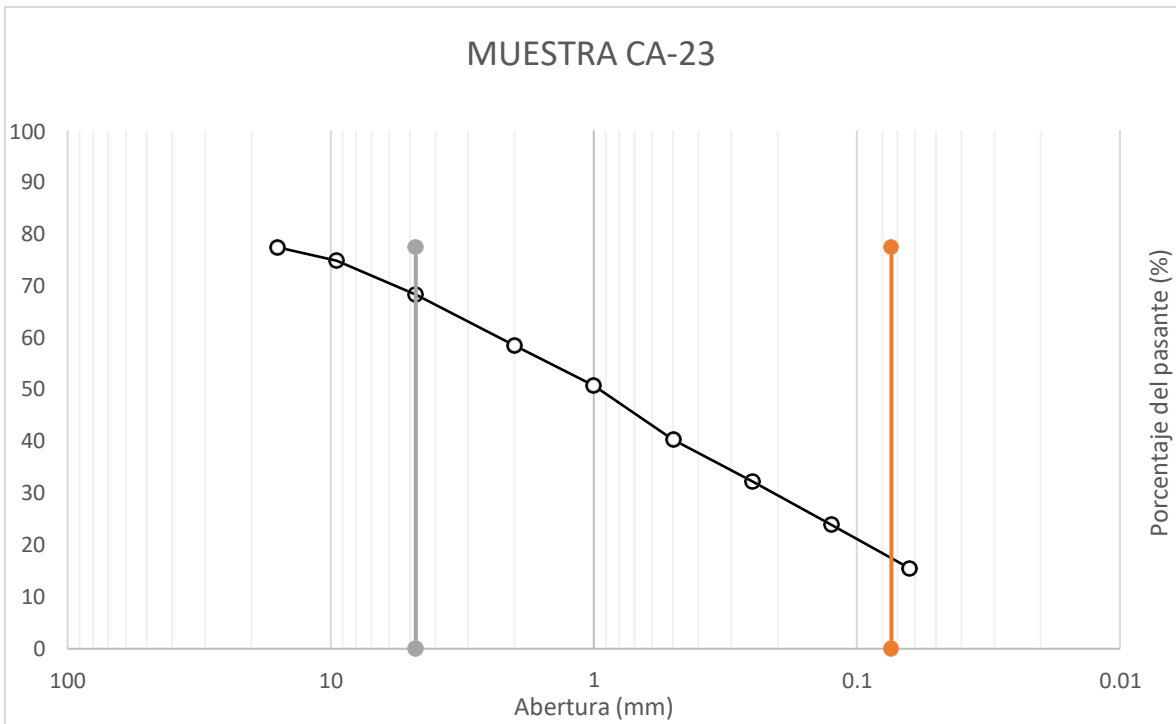
CA-06			
Unidad	Cotopaxi 1		
UTM	9918876 / 780707		
Peso muestra seca (g)	2533.38		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	1735.42	68.5021592	31.4978408
9.5	215.11	8.4910278	23.006813
4.75	230.72	9.10720066	13.8996124
2	142.58	5.62805422	8.27155816
1	70.52	2.78363293	5.48792522
0.5	72.91	2.8779733	2.60995192
0.25	30.12	1.18892547	1.42102645
0.125	23.67	0.93432489	0.48670156
0.063	11.94	0.47130711	0.01539445
Fondo	0.39	0.01539445	0
	2533.38	100	

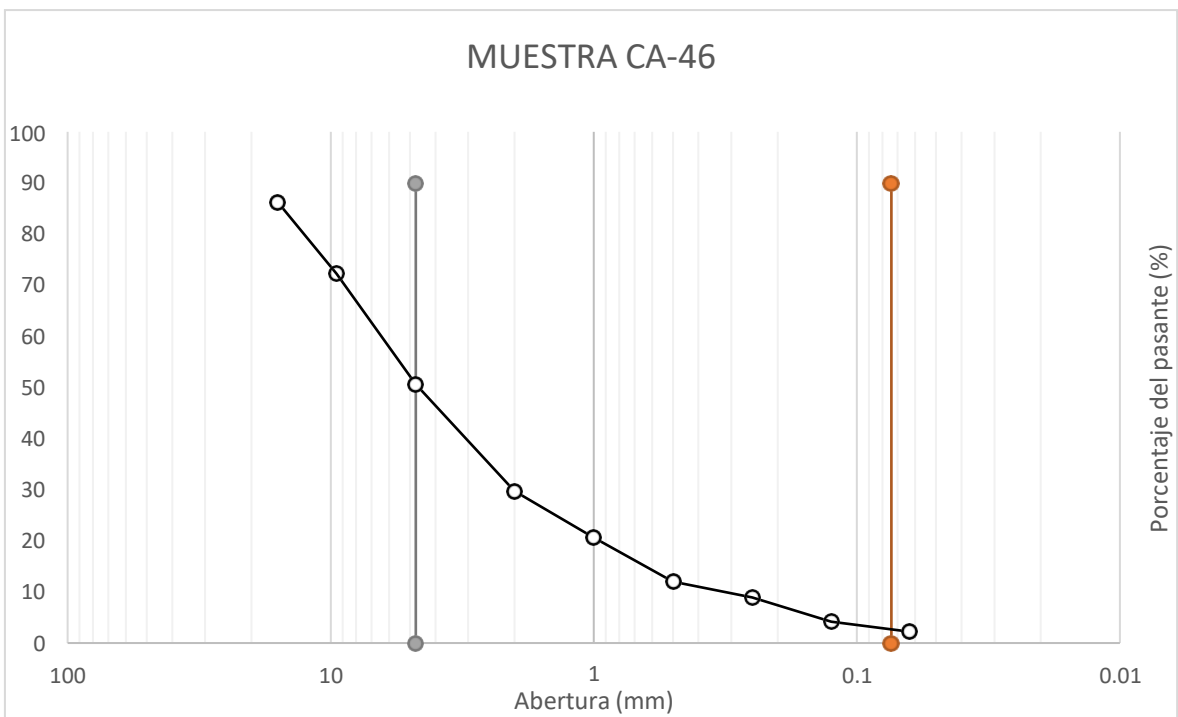
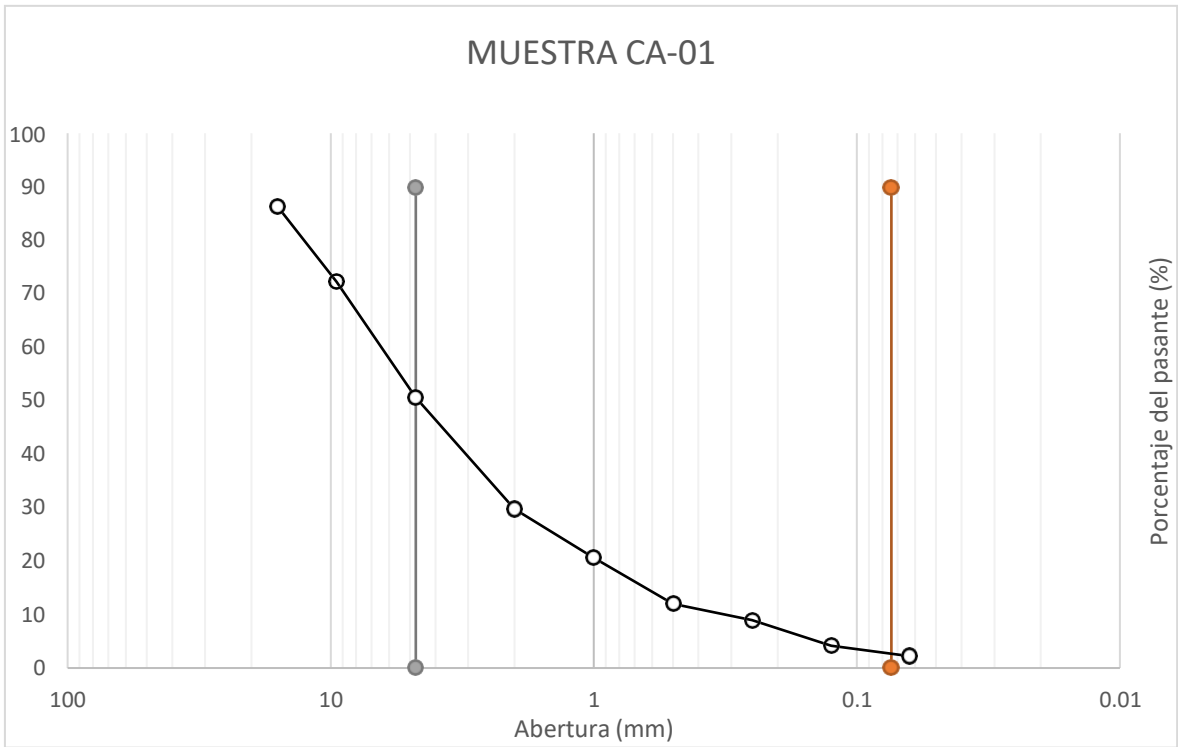
CA-01			
Unidad	Cotopaxi 2		
UTM	9917685 / 774083		
Peso muestra seca (g)	1512.81		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	208.05	13.7525532	86.2474468
9.5	212.17	14.0248941	72.2225527
4.75	326.93	21.6107773	50.6117754
2	316.45	20.9180267	29.6937487
1	137.15	9.06591046	20.6278383
0.5	130.52	8.62765318	12.0001851
0.25	46.31	3.06119076	8.93899432
0.125	72.01	4.76001613	4.17897819
0.063	29.7	1.96323398	2.216
Fondo	33.52	2.216	0
	1512.81	100	

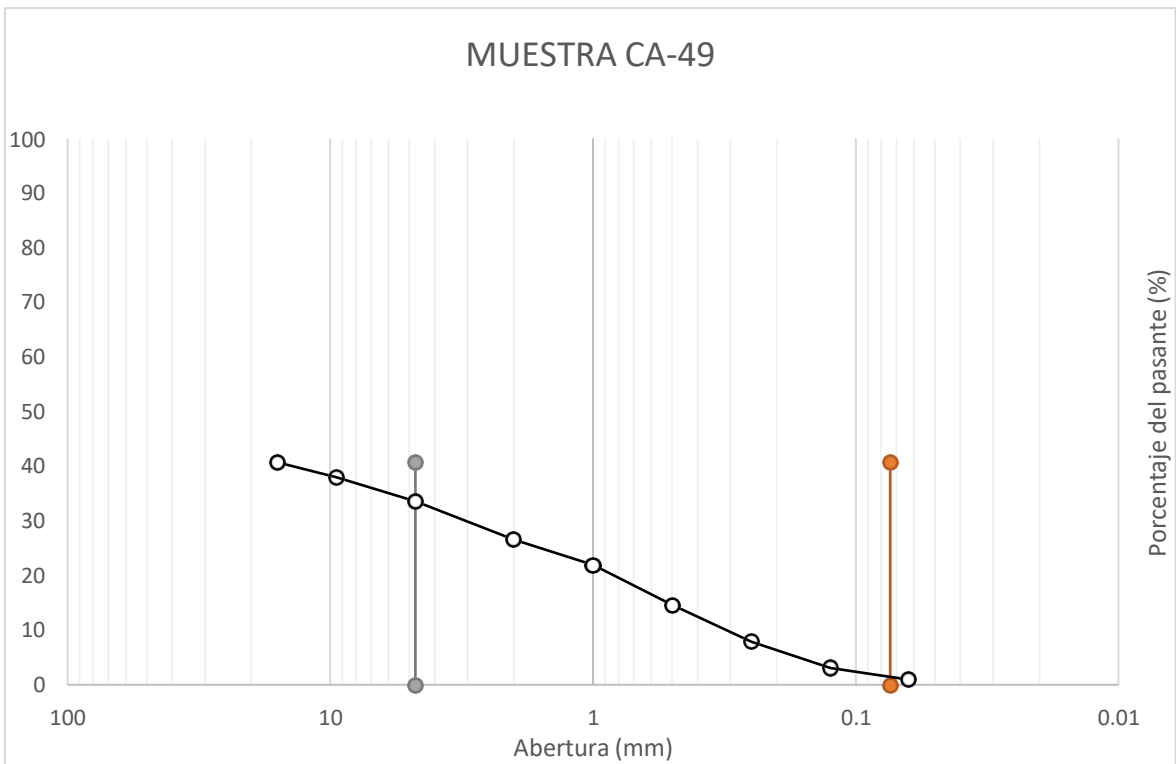
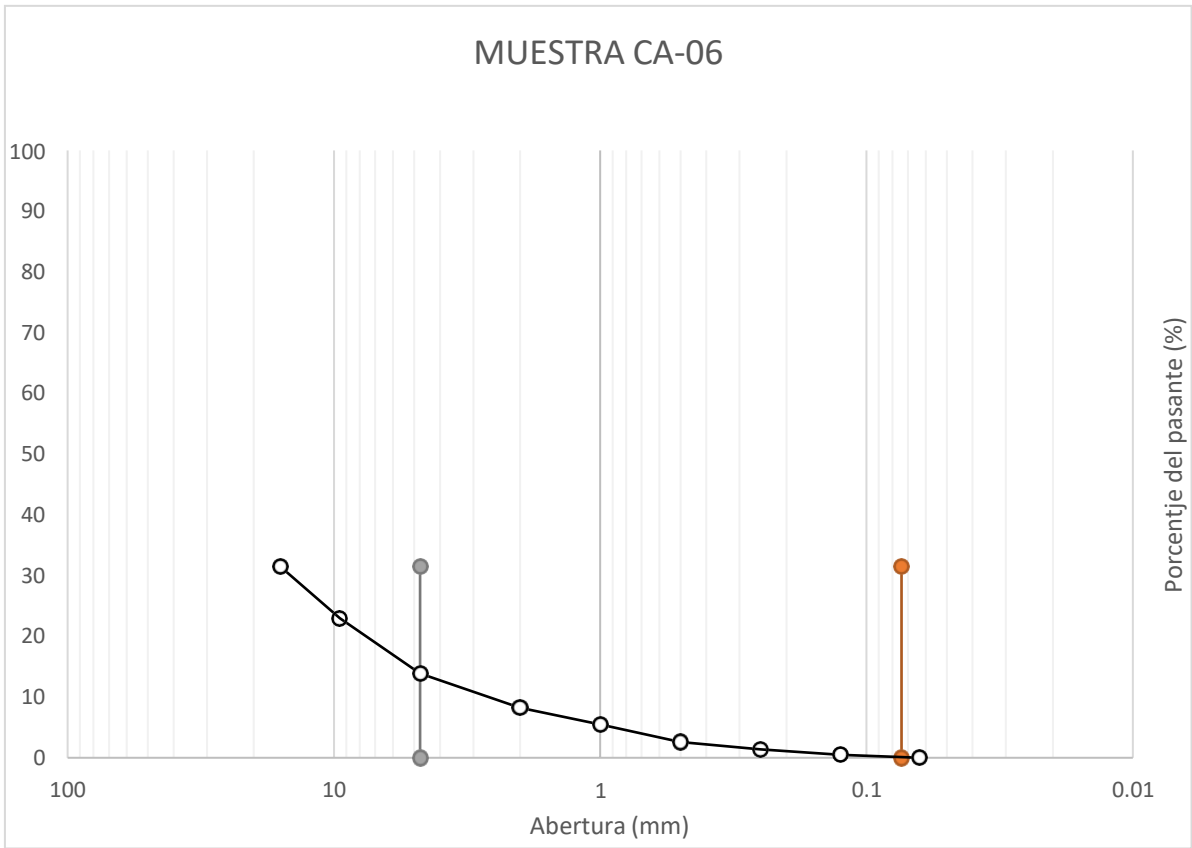
CA-49			
Unidad	Iliniza 2		
UTM	9924082 / 757375		
Peso muestra seca (g)	4351.77		
Diametro tamices (mm)	Peso muestra (g)	% Retenido	% Que pasa
15.9	2580.12	59.288979	40.711021
9.5	118.75	2.72877473	37.9822463
4.75	189.54	4.35546915	33.6267772
2	305.94	7.03024287	26.5965343
1	201.91	4.63972131	21.956813
0.5	317.96	7.30645232	14.6503607
0.25	294.43	6.76575279	7.88460787
0.125	209.23	4.80792873	3.07667914
0.063	91.33	2.09868628	0.97799286
Fondo	42.56	0.97799286	0
	4351.77	100	



### Curvas granulométricas







# ANEXO V

Mapa geológico con el corte para el perfil hidrogeológico y ubicación de pozos y vertientes

