

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**ESTUDIO PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DEL VOLCÁN COTACACHI
PROVINCIA DE IMBABURA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN,
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO**

MARCO ANDRÉS ALMEIDA VACA
maav2688@hotmail.com

DIRECTOR: DR. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA
dandrade@igeptn.edu.ec

Quito, Agosto 2016

DECLARACIÓN

Yo, Marco Andrés Almeida Vaca, declare bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Marco Andrés Almeida Vaca

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marco Andrés Almeida Vaca, bajo mi supervisión.

Dr. Santiago Daniel Andrade Varela
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN, OPCIÓN PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN

AGRADECIMIENTO

Al Instituto Geofísico, que me ha brindado el soporte financiero y logístico para llevar a cabo esta investigación. Al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia, por facilitarme los análisis y base de datos geoquímicos. A Mathilde Bablon y Xavier Quidelleur por las dataciones radiométricas realizadas. Al Instituto de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM), por las primeras muestras de roca en lámina delgada y las experiencias brindadas durante mi trabajo en la Geología Regional del Ecuador.

A Daniel Andrade, por llevarme a vivir del trabajo de mis sueños y llevar acertadamente la dirección de este proyecto; sobre todo por su camaradería, soporte científico y moral. A Patricio Ramón, por su amistad, enseñanzas y por inculcarme el amor a la vulcanología, desde el aire y desde tierra.

A mis Maestros y Mentores: Dr. Minard Hall, Patty Mothes, Benjamín Bernard, Silvana Hidalgo, Pablo Samaniego, Bernardo Beate, Luis Pilatasig, Arturo Egüez, Pedro Reyes, Halina Lachowics, Jean Luc LePennecc, Dennis Geist y Karen Harpp.

A mis amigos de trabajo de campo, aulas, vida, arte, montaña; a todos quienes de alguna manera han estado a mi lado durante todo este tiempo en el que se ha vivido de fracasos, éxitos y sobre todo aprendizaje. Son muchos, sin embargo nombraré a algunos: Diego I, Diego N, Johnny G, Edwin T, Silvia V, Julien B, Santy S, Marju E, Marco C, Pedro E, Liz G, Lili T, Vale Q, Ernesto Y, Diego O, Roberto P, Vane E, Mafer N, Edgar Ch, Mateo V, Josué G, Daniel S, Camilo Z, Maya Z, Michu E, Diego V, Diego Ch, Cristian P, Cristian C, Beto M, Javier P, Majito H y Willy M. A quienes trabajaron junto a mí, en las jornadas de campo: Francisco V, Stefy A y Jos R.

A mi primo Juan Francisco, por su incondicional amistad y todas las experiencias vividas. A mi tío Eduardo por sus valiosas enseñanzas dentro del maravilloso mundo de la Geología. A mis tíos, en especial: Juanito A, Fabián A, Juan H, y Mario V, por ser grandes amigos y confidentes, Aidé V, por su cariño.

A los incondicionales: Jorge Castillo, Dyego Bonilla, Eduardo Villavicencio, Rodrigo Recalde, Luis Betancourt, Patricio Vargas, Byron Solís y Joel Schiavone.

DEDICATORIA

A mi Padres Marco Almeida y Norma Vaca, que jamás han dejado de amarme a pesar de mis errores, quienes han sabido llevar mi desarrollo personal con paciencia y dedicación, como grandes amigos y guías, enseñando a no decaer y luchar por lo que crea correcto, así también, a aceptar y enfrentar mis errores.

A mi Hermana Cris, eterna fuente de fortaleza, confianza y alegría.

A mi compañera de vida Yess, quien se ha mantenido a mi lado, amándome a pesar de todo.

Al Abuelito Arturo Almeida (†), quien me enseñó a reconocer las Montañas por su belleza y grandeza, que ante todo está el respeto a la naturaleza y a cada Ser que habita en ella, quien me dijo que siempre es bueno tener algo de aventuras por contar a sus nietos, mi eterno amigo, mediador de aventuras y mi ídolo montañista; a mi Abuelita Escobar (†) quien me mantuvo con la vitalidad necesaria para transitar por el camino de la vida a paso firme.

A Mami Teresita Oñate (†) y Papi Alfonso Vaca, de quienes aprendí que la humildad es una virtud necesaria para el crecimiento del ser humano.

A mi Paulinita Almeida, por brindarme su cariño y dedicación.

Y a Zoquete, mi compañero de aventuras...

¡Lo contrario de vivir, es no arriesgarse! – Fito Cabrales.

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE ANEXOS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
CAPÍTULO 1.....	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICATIVOS	11
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE	12
1.3 ASPECTOS FISIOGRAFICOS.....	12
1.3.1 UBICACIÓN.....	12
1.3.2 FISIOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA.....	13
1.4 METODOLOGÍA.....	15
CAPÍTULO 2.....	17
2 MARCO GEOLÓGICO.....	17
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL DEL ECUADOR	17
2.2 GEODINÁMICA ACTUAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS.....	19
2.2.1 BLOQUE NOR-ANDINO	19
2.2.2 FALLAS CUATERNARIAS	21
2.3 ARCO VOLCÁNICO CUATERNARIO	23
2.3.1 FRENTE VOLCÁNICO DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL	24

2.4	GLACIACIONES DURANTE EL CUATERNARIO	26
2.5	ESTUDIOS PREVIOS	27
CAPÍTULO 3.....		30
3	GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTACACHI	31
3.1	MORFOLOGÍA Y RASGOS ESTRUCTURALES GENERALES	31
3.1.1	RASGOS ESTRUCTURALES TECTÓNICOS	31
3.1.2	RASGOS GLACIARES	33
3.1.3	ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS	35
3.2	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE LAS UNIDADES MAYORES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO COTACACHI-CUICOCHA.....	37
3.2.1	BASAMENTO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO COTACACHI-CUICOCHA	37
3.2.2	UNIDAD COTACACHI I	38
3.2.3	UNIDAD COTACACHI II	43
3.2.4	UNIDAD COTACACHI III - CUICOCHA.....	53
CAPÍTULO 4.....		60
4	CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DEL VOLCÁN COTACACHI	61
4.1	ESTUDIO PETROGRÁFICO	64
4.1.1	COTACACHI I.....	64
4.1.2	COTACACHI II.....	66
4.1.3	DEPÓSITO DE AVALANCHA DE ESCOMBROS NORORIENTAL: COTACACHI I y COTACACHI II – VENTO CENTRAL	67
4.1.4	COTACACHI III - CUICOCHA.....	68
4.2	CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA.....	70
4.2.1	ELEMENTOS MAYORES (ÓXIDOS).....	72

4.2.2	ELEMENTOS TRAZA	75
4.2.3	MODELO GEOQUÍMICO	81
CAPÍTULO 5.....		89
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
5.1	CONCLUSIONES	90
5.2	RECOMENDACIONES	93
CAPÍTULO 6.....		94
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de la Zona de Estudio.	13
Figura 1.2. Mapa hidrográfico (a) y fisiográfico (b) del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha.....	15
Figura 2.1. Modificado de Boland <i>et al.</i> , 2000. Mapa Geológico del Ecuador entre 0°-1° N.....	18
Figura 2.2. Esquema Tectónico Regional de los Andes Septentrionales (Gutscher <i>et al.</i> , 1999). DGM= Dolores Guayaquil Megashear, GG= Golfo de Guayaquil.	20
Figura 2.3. Modificado de: Mapa de Fallas Cuaternarias del Ecuador (Egüez <i>et al.</i> , 2003), relacionadas a la zona de estudio.	23
Figura 2.4. Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental (Bernard & Andrade, 2011)	25
Figura 2.5. Versión Digital, Mapa Geovolcánico del Complejo Volcánico Cuicocha – Cotacachi. (Modificado de: Hillebrandt, 1989).	28
Figura 3.1. Unidades Mayores identificadas en el volcán Cotacachi: COTACACHI I, COTACACHI II y COTACACHI III - CUICOCHA.	31
Figura 3.2. Prolongación del sistema de fallas Billecocha - Huayrapungo vista en el flanco oriental del volcán.....	32
Figura 3.3. Prolongación del sistema de fallas Billecocha - Huayrapungo vista en el flanco sur del volcán y borde norte de la caldera.	33
Figura 3.4. Estrías glaciares encontradas en las lavas del volcán Cotacachi, correspondientes a la unidad COTACACHI I.....	34
Figura 3.5. Escarpes de colapso de edificio en el Volcán Cotacachi.....	36
Figura 3.6. Contacto morfológico (discordante erosivo) entre el Basamento de la Cordillera Occidental (BCO) con el Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha (CVCC).	38
Figura 3.7. Volcán Cotacachi, unidad COTACACHI I; al fondo de la fotografía se observan los picos correspondientes al Complejo Volcánico Chachimbiro.	39
Figura 3.8. Flujo de lava perteneciente a la unidad COTACACHI I-BASE (Fotografía: S Almeida).	40

Figura 3.9. Mapa de ubicación de las dataciones realizadas en las rocas de la unidad COTACACHI I – SUPERIOR, escala 1:5.000.....	41
Figura 3.10. <i>Avalancha de Escombros NOROCCIDENTAL, Arriba: Afloramiento en la vía Nangulví – García Moreno, potencia estimada 66m (COTA 40 A, B; UTM: 766710 / 10026434; Alt: 1176 msnm). Abajo: Afloramiento de avalancha ubicado en la comunidad de Nangulví, este depósito se encuentra sobre el batolito de Apuela. (Fotografía: Y Enríquez).</i>	43
Figura 3.11. Unidad COTACACHI II, en la esquina inferior izquierda de la fotografía se puede apreciar la Laguna de Cristococha.	43
Figura 3.12. Unidad COTACACHI II-VENTO CENTRAL, Izquierda: se observa uno de los domos satélites localizados en el flanco sur del volcán. Derecha: se observa un dique que corta esta unidad con rumbo N10°.	45
Figura 3.13. Unidad COTACACHI II-VENTO CENTRAL, flujos de lava con xenolitos decimétricos ubicados en el flanco sur del volcán.....	45
Figura 3.14. <i>Avalancha de Escombros NORORIENTAL, a) Perfil geológico NW – SE en el sector del río Ambi (COTA 17 A, B, C, D, E) b) Afloramiento de la avalancha NE; c) Acercamiento a los constituyentes de la avalancha, nótese los líticos verdes correspondientes al basamento de la Cordillera Occidental.</i>	46
Figura 3.15. <i>Flujo piroclástico del volcán Cotacachi, observado en la vía de segundo orden que comunica directamente las poblaciones de Cotacachi e Imantag.</i>	47
Figura 3.16. <i>Columna lito-estratigráfica (Cota 42, A; UTM: 807572 / 10039309; Alt: 2289 msnm), vía desde Atuntaqui hacia Imantag a 1km después de cruzar el Río Ambi.</i>	48
Figura 3.17. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa la Loma La Virgen, misma que corresponde a uno de los domos de MUYURCU.	50
Figura 3.18. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa el domo LOMA NEGRA, este se encuentra totalmente cubierto por vegetación y gran cantidad de suelos y depósitos volcánicos recientes.	51
Figura 3.19. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa el domo PIRIBUELA y su gran escarpe de colapso ubicado en su flanco suroriental.....	52

Figura 3.20. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observan los flujos de lava superpuestos en la cumbre del volcán.....	53
Figura 3.21. <i>Unidad CUICOCHA, ilustración de la ubicación de los domos relacionados a su evolución.....</i>	54
Figura 3.22. <i>Unidad CUICOCHA, domo Cuicocha ubicado al NE de la laguna.....</i>	55
Figura 3.23. Columna lito-estratigráfica, relaciona los depósitos encontrados en una cantera en la población de Quiroga (Cota 46, B2) y los encontrados en la vía que conduce desde la Laguna Cuicocha hacia Apuela (Cota 47, B1).	57
Figura 3.24. <i>Unidad CUICOCHA, se observa los dos islotes correspondientes a los domos Wolf N-S (izquierda) y Yerovi (derecha); ubicados en el centro de la laguna. ...</i>	57
Figura 3.25. Evolución propuesta para la unidad COTACACHI III - CUICOCHA (modificado de Pidgen, 2014).....	59
Figura 4.1. Mapa de ubicación de muestras de roca, escala 1:30.000. Muestras tomadas por: M Almeida - D Andrade , M Monzier (†) – P Samaniego , von Hillebrandt	62
Figura 4.2. Resumen de la petrografía del Volcán Cotacachi y sus paragénesis minerales por unidad.....	63
Figura 4.3. COTA 02= Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI I – BASE. COTA 01= Muestra de mano en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI I – SUPERIOR.	65
Figura 4.4. Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI II – DOMOS (Satélite flanco S= COTA 14, Muyurcu= COTA 07).	66
Figura 4.5. Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI II – VENTO CENTRAL, COTA 12.....	67
Figura 4.6. Muestras de roca en lámina delgada pertenecientes a la colección de muestras de mano obtenidas en el depósito de avalancha de escombros NE, COTA 17.	68
Figura 4.7. Muestra de mano en lámina delgada perteneciente a las rocas (CUI 32-Domo Wolf) y depósitos volcanoclásticos (CUI 13C) de la unidad COTACACHI III - CUICOCHA.	69

Figura 4.8. Diagramas usados para la discriminación geoquímica de las rocas del Volcán Cotacachi de las rocas del Complejo Volcánico Chachimbiro y el Basamento Ígneo de la Cordillera Occidental (Unidad Arco Río Cala).	70
Figura 4.9. Diagrama LOI vs. SiO ₂	71
Figura 4.10. Diagramas de clasificación del tipo de roca: a) Irvine y Baragar, 1971 (AFM) b) Gill, 1981 - K ₂ O vs. SiO ₂ y c) Peccerillo y Taylor, 1979 - (Na ₂ O + K ₂ O) vs. SiO ₂	73
Figura 4.11. Diagramas HARKER.	74
Figura 4.12. Diagrama de Tierras Raras y tipo “Spider” para las unidades mayores de COTACACHI - CUICOCHA respecto a las condritas y manto primitivo.	76
Figura 4.13. Diagramas Pseudo- HARKER para elementos traza.....	79
Figura 4.14. Diagramas K ₂ O vs. SiO ₂ y Mg# vs. SiO ₂ , se puede observar la afinidad de las muestras de roca obtenidas en el depósito de avalancha de escombros NE (DAD Cotacachi).	80
Figura 4.15. <i>Diagramas de variación:</i> a) Rb vs. K ₂ O, b) Rb/Th vs. Rb, c) Rb vs. Rb/Co y d) 1/Co vs. Rb/Co. <i>Propuestos en Schiano et al., 2010.</i>	82

INDICE DE TABLAS

TABLA 01: Resumen de las descripciones petrográficas realizadas en este estudio, Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha.	84
TABLA 02: Datos Geoquímicos de roca total para elementos Mayores y Traza, Volcán Cotacachi. (Base IRD, Base IG-EPN).	86

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 01: Mapa Geológico del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha, Provincia de Imbabura. Escala 1:25.000.	
--	--

RESUMEN

El Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha (CVCC) se encuentra ubicado en la Cordillera Occidental Septentrional del Ecuador, en la Provincia de Imbabura.

Está constituido por tres unidades lito-estratigráficas mayores. En orden cronológico, las dos primeras unidades le pertenecen al estratovolcán o volcán central: COTACACHI I (Base, Superior, Avalancha de escombros NW) y COTACACHI II (Vento Central, Avalancha de escombros NE, Depósitos Piroclásticos y Laháricos del flanco SE, Domos), la última pertenece a una caldera ubicada en su flanco sur: COTACACHI III – CUICOCHA (Domo Pre-caldera, Depósitos Piroclásticos, Domos Post-caldera). La avalancha de escombros nororiental (DAD NE) se encuentra sobreyaciendo a la avalancha de escombros del Complejo Volcánico Chachimbiro (evento Huanguillaro) y subyaciendo a la avalancha de escombros del volcán Imbabura, posicionando la ocurrencia de este evento durante la evolución del volcán COTACACHI II – VENTO CENTRAL. Petrográficamente, cada unidad está representada por: COTACACHI I (andesitas basálticas y andesitas; 56 – 62 SiO₂ wt %), COTACACHI II (andesitas y domos dacíticos; 60 - 62 SiO₂ wt %) y COTACACHI III – CUICOCHA (andesitas y domos dacíticos; 61 – 63 SiO₂ wt %). El estudio geoquímico permitió caracterizar a las rocas del Volcán Cotacachi y Caldera de Cuicocha como rocas de arco continental con afinidad calco-alcalina. Una ligera variación en la tendencia de las rocas de Cuicocha indicaría que este proceso se llevó a cabo bajo diferentes condiciones en una cámara y/o reservorio. Las rocas magnesianas de la Base, ricas en olivino, se acercan a una afinidad toleítica. La aplicación de los diagramas propuestos en Schiano *et al.*, (2010) para las rocas de Cotacachi, en inicio proponen que sus productos volcánicos serían el resultado de un proceso dominante de cristalización fraccional. Edades radiométricas obtenidas en este estudio, sugieren que el volcán Cotacachi tiene una edad aproximada del Pleistoceno Medio o anterior (al menos 162 ka).

ABSTRACT

The Cotacachi - Cuicocha Volcanic Complex (CVCC) is located in the north of the Western Cordillera of Ecuador (Imbabura province).

It consists of three litho-stratigraphic major units. In chronological order, the first two units belong to a central stratovolcano denominated COTACACHI I (Basal sequence, Edifice sequence, Northwestern debris Avalanche deposit) and COTACACHI II (Central Vent, Northeastern debris avalanche deposit, Post-avalanche Domes, Pyroclastic and lahar deposits), and a caldera located at southern flank: COTACACHI III - CUICOCHA (Pre-caldera dome, Pyroclastic Deposits and Post-caldera domes). The northeastern debris avalanche deposit (DAD NE) is overlying the avalanche from Chachimbiro Volcanic Complex (Huanguillaro event) and underlying the debris avalanche of Imbabura volcano, positioning the occurrence of this event during the evolution of COTACACHI II - CENTRAL VENT.

The petrography of each unit is represented by: COTACACHI I (basaltic andesites and andesites, 56 - 62 wt% SiO₂), COTACACHI II (andesites and dacitic domes, 60-62 wt% SiO₂) and Cotacachi III - CUICOCHA (andesites and dacitic domes, 61 - 63 wt% SiO₂). The geochemistry of Cotacachi rocks, Central Volcano and Cuicocha caldera seems as calc-alkaline affinity rocks from continental arc, they could be the result from a dominant process of fractional crystallization. A slight variation in the trend of Cuicocha rocks suggests that this process is produced under different conditions of stability of magma in a different chamber and/or reservoir. The basal olivine-rich Magnesian rocks, are in the tholeiitic limit of AFM diagram from Irvine and Baragar (1971). Radiometric ages in this study, suggest that the Cotacachi volcano has an approximate age of the Middle Pleistocene or earlier.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICATIVOS

El presente trabajo se enfocará en la determinación del desarrollo geológico del Volcán Cotacachi, con énfasis en sus aspectos petrográficos, cronológicos y geoquímicos. El Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha es considerado como potencialmente activo con excepción de su volcán central (Volcán Cotacachi), que ha sido clasificado como “extinto”.

Uno de los primeros pasos que se deben dar para tener un mejor conocimiento del desarrollo de un volcán es establecer su evolución estructural, es decir definir los principales periodos de construcción y de destrucción que han dado lugar a su configuración actual. Los depósitos de avalancha de escombros suelen ser muy significativos y distintivos en los volcanes, con volúmenes de entre 0.1 hasta 40 km³ y siempre representan eventos mayores de destrucción parcial durante el desarrollo de un edificio volcánico. Su estudio permite reconocer la época de ocurrencia del evento, discriminar los principales factores que influyeron en el debilitamiento del edificio volcánico que precedió a la formación de la avalancha y reconocer la zona de origen en el edificio volcánico. Una de las principales características de estos eventos es que pueden ocurrir tanto en volcanes activos como en extintos sin que necesariamente estén acompañados de una erupción; además, la susceptibilidad de ocurrencia de fenómenos volcánicos secundarios (p.e., deslizamientos o lahares) deberán ser tomados en cuenta durante una futura evaluación de la amenaza volcánica.

Una de las principales aplicaciones de la Vulcanología es su aporte fundamental en la evaluación de la amenaza volcánica. Todo nuevo conocimiento que se genere en torno a los volcanes puede ser aplicado en el mejoramiento de la evaluación de sus amenazas asociadas, sea de manera general (actualizando los métodos o los conceptos básicos) o de manera particular (en casos de estudio específicos). Una correcta evaluación de la amenaza volcánica, basada en trabajos formales de investigación, tiene incidencia

positiva en temáticas más amplias como son la mitigación del peligro volcánico y la gestión del riesgo.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal del presente estudio es contribuir al conocimiento del desarrollo estructural del Volcán Cotacachi, mediante el estudio de su edificio volcánico y un depósito de avalancha de escombros asociado en su flanco nororiental. Para cumplir con esto es necesario: realizar la cartografía geológica a escala 1:25.000, caracterizar petrográfica y geoquímicamente sus unidades lito-estratigráficas mayores, establecer la potencial zona de origen del depósito de avalancha de escombros nororiental y su relación estratigráfica respecto a los depósitos de avalancha de escombros del Volcán Imbabura y el Complejo Volcánico Chachimbiro. Con todo lo anteriormente mencionado se realizará una caracterización general que permitirá proponer un modelo evolutivo para el Volcán Cotacachi.

1.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

1.3.1 UBICACIÓN

El Volcán Cotacachi forma parte del frente volcánico de la Cordillera Occidental Septentrional del Ecuador en la Provincia de Imbabura. Localmente se encuentra limitado al norte por el complejo volcánico Chachimbiro, al sur por el volcán Cushnirumi y Mojanda-Fuya Fuya, al suroriente por el volcán Imbabura, al oriente por el río Ambi y al occidente sus depósitos se pierden sobre las unidades del basamento en las estribaciones de la cordillera (Figura 1.1).

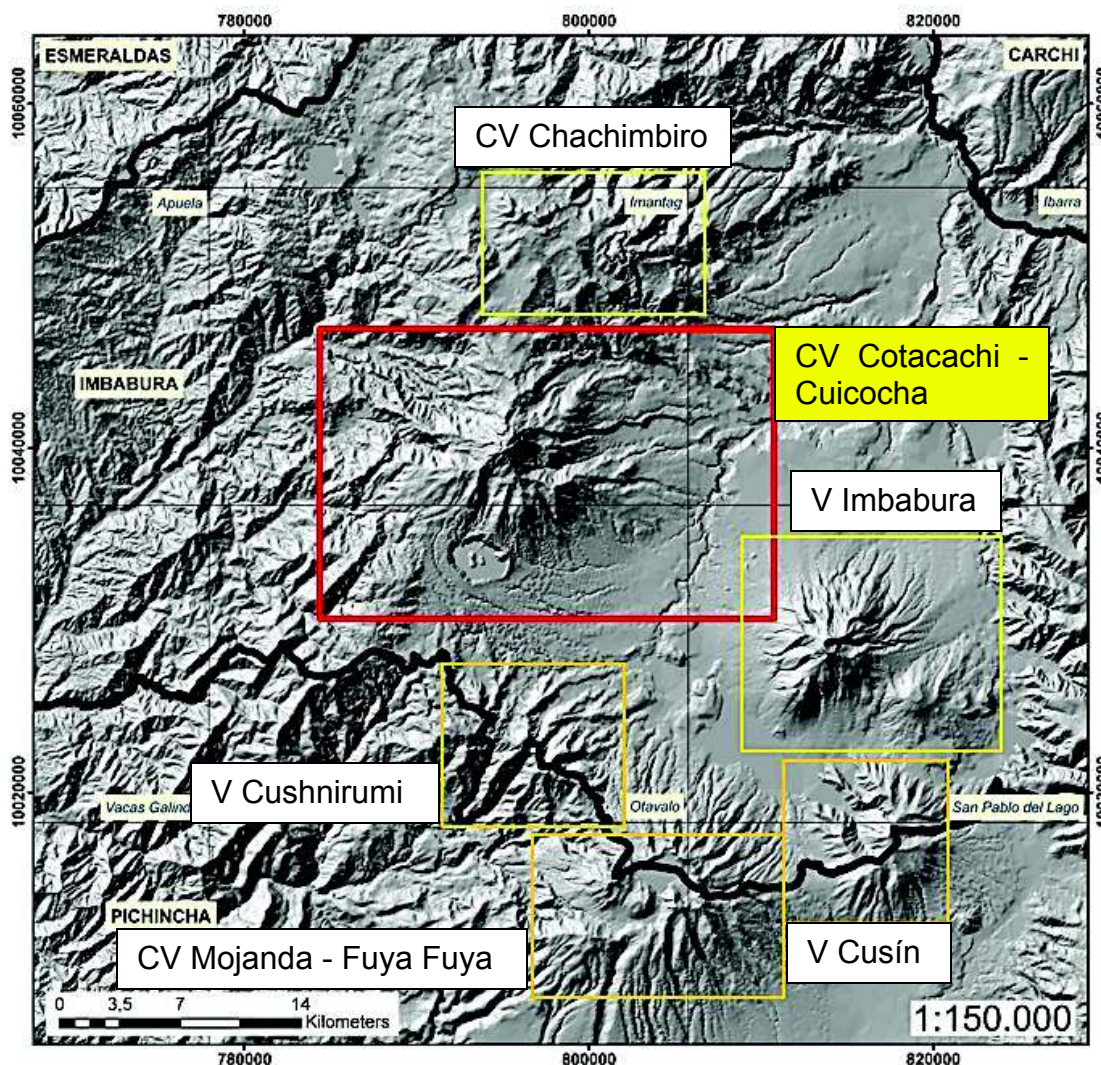


Figura 1.1. Ubicación de la Zona de Estudio.

1.3.2 FISIOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA

El área de estudio comprende aproximadamente 268 km² y sus dimensiones aproximadas son 14,7 km de norte a sur y 20,9 km de este a oeste. Su morfología es principalmente montañosa con cuencas hidrográficas marcadas y relieves fuertes, resaltan las cumbres del volcán Cotacachi (4939 msnm y 4756 msnm), hacia el flanco oriental sus domos Loma Negra (3051 msnm), Piribuela (3871 msnm) y en el flanco occidental los domos Muyurcu (3502 msnm). La laguna de Cuicocha (3062 msnm) es la depresión más representativa, su anillo elíptico posee unas dimensiones aproximadas de

3.2 km en sentido E-O y 2.3 km en sentido N-S y su área aproximada es de 5,1 km². Dentro de esta resaltan los islotes Wolf (Norte= 3247 msnm, Sur= 3202 msnm) y Yerovi (3142 msnm), en su borde suroriental se ubica el anfiteatro del domo Cuicocha (3377 msnm) (Figura 1.2 a). La topografía se vuelve suave hacia el sur, oriente y nororiente y está relacionada con los depósitos piroclásticos, volcano-sedimentos y otros depósitos distales que forman parte del relleno Cuaternario del valle interandino.

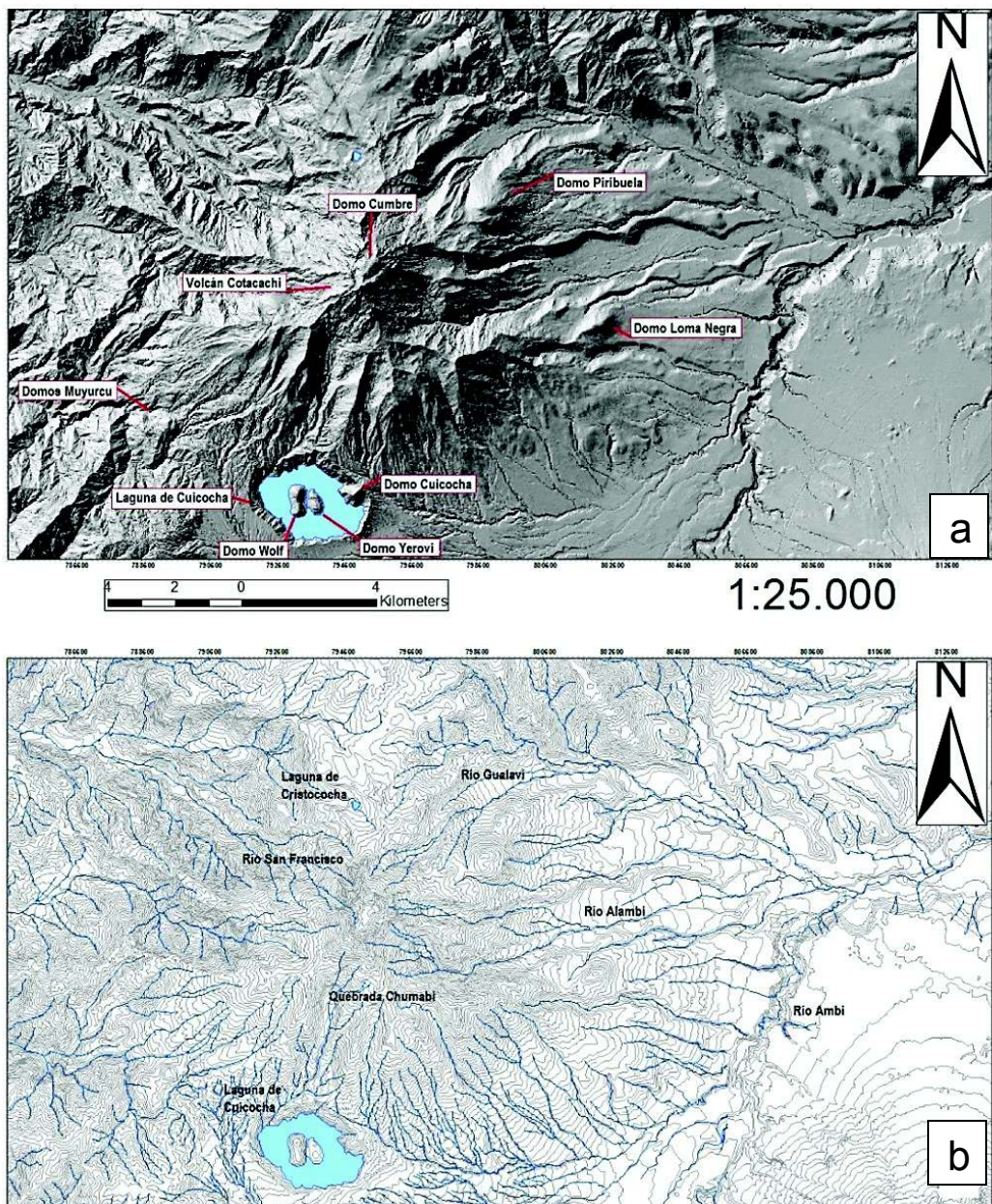


Figura 1.2. Mapa fisiográfico (a) e hidrográfico (b) del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha.

El volcán Cotacachi se encuentra muy erosionado en su parte superior, esta erosión puede haber sido causada por glaciaciones pasadas, donde vestigios de morrenas son evidenciados al occidente del volcán. Stübel (1886) hace referencia a la presencia de innumerables escarpes de deslizamiento a raíz del terremoto acaecido el 16 de agosto de 1868.

Su hidrografía es típica de un estrato volcán, con drenajes radiales y de mediano caudal, entre los principales destacan al occidente el río Alambí, Gualaví y Cari Yacu, al oriente el río San Francisco (Figura 1.2 b). Los cuerpos de agua más importantes son la laguna de Cuicocha que corta el nivel freático y permite un nivel estable de agua durante todo el año (von Hillebrandt, 1989) y la laguna Cristococha de origen glacial (Sauer, 1965).

1.4 METODOLOGÍA

Se utilizarán las siguientes herramientas básicas de la Geología:

- Cartografía geológica a escala 1:25.000.
- Estratigrafía a detalle.
- Petrografía en muestras de mano y lámina delgada.
- Geoquímica de elementos mayores y traza en roca total.
- Dataciones radiométricas de muestras representativas.

Además se utilizarán aplicaciones de sistemas de información geográfica (p.e., Quantum GIS, ArcCatalog, ArcMap, ArcScene) para la sistematización de datos cartográficos. La caracterización petrográfica se realizará mediante el uso de microscopios petrográficos. Las características geoquímicas serán presentadas mediante los gráficos y diagramas obtenidos en el software IGPET (Igneous Petrology, 2006). Las dataciones radiométricas obtenidas mediante un convenio con el IRD de Francia, permitirán tener una mejor idea respecto a la edad del volcán.

CAPÍTULO 2

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL DEL ECUADOR

El Volcán Cotacachi se ha desarrollado sobre el basamento ígneo de la Cordillera Occidental Septentrional y se ha visto afectado por la tectónica local durante el Cuaternario. La Cordillera Occidental está caracterizada por la presencia de terrenos alóctonos que incluyen fragmentos oceánicos y ofiolíticos (Feininger y Bristow, 1980; McCourt et al., 1984; Lebras y Megard, 1987) acrecionados al continente durante el Cretácico Superior (Egüez, 1986, Van Thournout *et al.*, 1991). Lito-estratigráficamente contiene basaltos derivados del plateau oceánico Caribe y Colombia y lavas de composición intermedia-básica producto del volcanismo del arco de isla Río Cala en el norte del Ecuador (Vallejo, 2007). La geoquímica de sus productos turbidíticos combinada con el rango de edades indica que este arco se formó a partir de una subducción hacia el oeste donde interactuaron dos placas oceánicas. Además la edad y naturaleza de los sedimentos combinada con eventos de metamorfismo de bajo grado, sugieren una duración de 15 a 20 My para el evento de acreción, ocurriendo este en el Cretácico Tardío y relacionado directamente con la llegada de la Unidad Pallatanga a la margen continental (Kerr *et al.*, 2002). Edades radiométricas de rocas pertenecientes al basamento dan como resultado edades de $87,1 \pm 1,66$ Ma (U/Pb, zircón) y $84,69 \pm 2,22$ Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, hornblenda) (Vallejo, 2007). Eventos posteriores relacionados al cambio de buzamiento de la subducción como la conocemos actualmente, formaron arcos volcánicos durante el Paleógeno tal es el caso del Arco Silante y el Arco Macuchi. Este último pertenece a la zona de ante arco de la Cordillera Occidental en el centro del Ecuador (Kerr *et al.*, 2002) y su límite oriental es la falla regional Chimbo-Toachi (Hughes y Pilatasig, 2002). La secuencia estratigráfica asociada es predominantemente volcanoclástica (grauvacas,

limolitas con líticos volcánicos, brechas clasto - soportadas, cherts, etc.) con intercalaciones de pillow lavas, andesitas, hyaloclastitas, tobas e intrusiones diabásicas meteorizadas (Egüez, 1986; Hughes y Pilatasig, 2002).

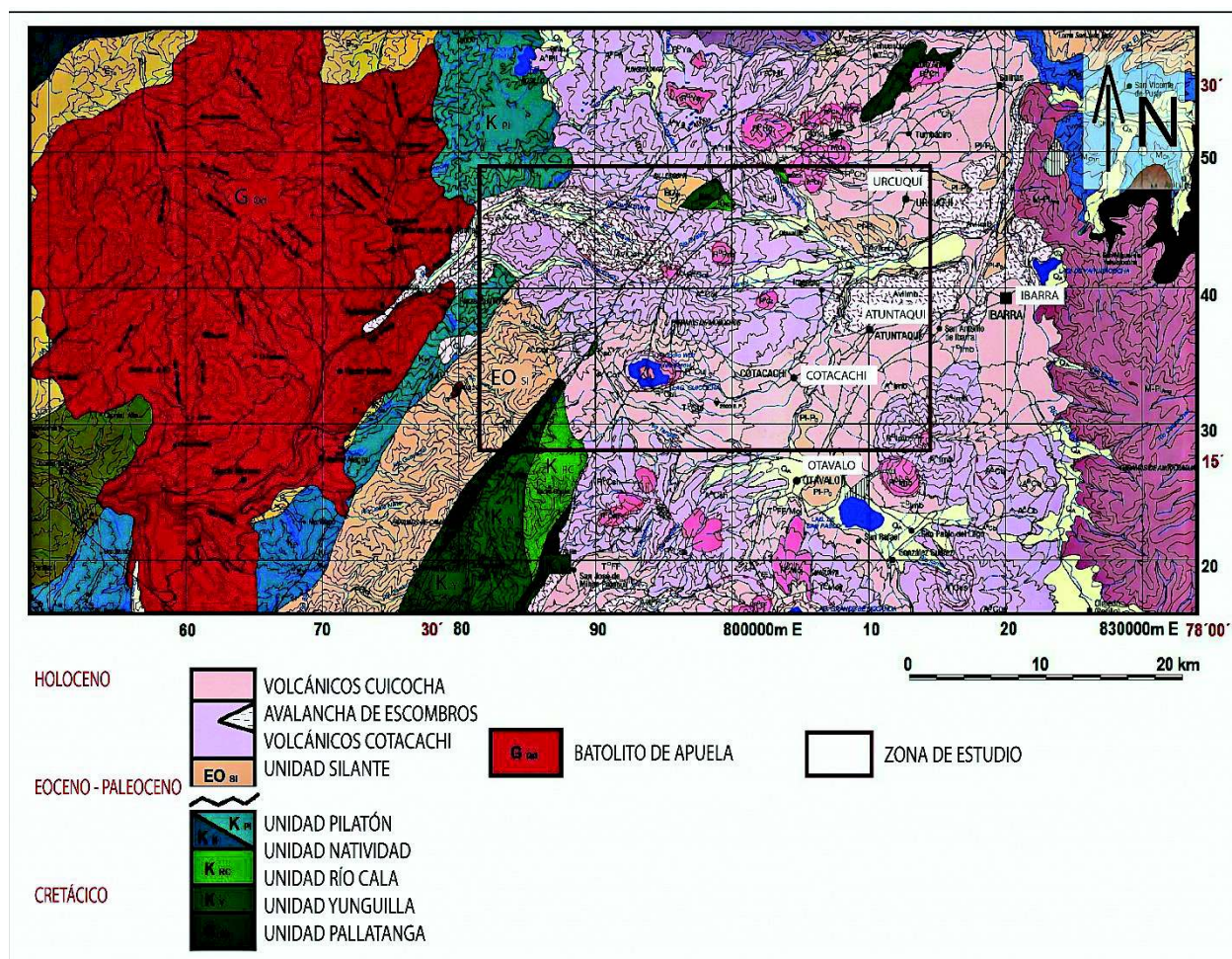


Figura 2.1. Modificado de Boland *et al.*, 2000. Mapa Geológico del Ecuador entre 0°-1° N.

La mayoría de las facies de la Unidad Macuchi son productos de erupciones efusivas submarinas a subaéreas de composiciones básicas a intermedias (Hughes y Bermúdez, 1997) cuyas afinidades geoquímicas corresponden a un arco de isla con anomalías negativas de Nb, Ta y Ti (Kerr *et al.*, 2002; Chiaradia, 2009). Algunas muestras ricas en Mg pueden ser interpretadas como productos de un arco primitivo (Kerr *et al.*, 2002). Finalmente depósitos volcánicos Neógenos cubren la cadena montañosa hasta el

Cuaternario, período en el cual se desarrolla el arco volcánico actual en la Cordillera Occidental, Cordillera Real, Callejón Interandino y Zona Subandina (Figura 2.1).

La Cordillera Occidental se encuentra limitada hacia el oriente por el sistema de fallas Pallatanga-Pujilí-Calacalí (McCourt *et al.*, 1997), mismo que se interpreta como una prolongación hacia el sur del sistema de fallas Cali-Cauca-Patía de Colombia (Aspden *et al.*, 1987), bajo un régimen de esfuerzos tectónicos compresionales y transpresionales de componente dextral.

2.2 GEODINÁMICA ACTUAL DE LOS ANDES ECUATORIANOS

La ruptura de la placa de Farallón durante el Oligoceno (25 Ma) dio lugar al nacimiento de las placas de Cocos y Nazca (Lonsdale, 2005).

Tres dominios tectónicos caracterizan a la placa Nazca: el primero, entre 26 y 10 Ma establece el inicio de la subducción entre las latitudes 7° N y 1° N con rumbo N120° y buzamiento de 35°, formando el Arco Volcánico Colombiano. Al sur de 2° S la placa Nazca se subduce con un ángulo aproximado de 14°. Entre estos, es decir entre 1°N y 2°S se ubica la Cordillera Asísmica de Carnegie, constituye una cadena montañosa de unos 300 km de ancho y una altura promedio de 3 km que se asume se asienta sobre una corteza oceánica anterior a los 16 My, y que comenzó a moverse hacia el margen continental ecuatoriano hace 25 Ma, con una tasa de convergencia aproximada de 5 - 6 cm/año con la placa Sudamericana (Trenkamp *et al.*, 2002). La llegada de la Cordillera de Carnegie al continente se evidencia con la interpretación de distintos períodos de enfriamiento a escala regional, que podrían estar directamente relacionados con la exhumación de la Cordillera Real entre 13 y 9 Ma (Gutscher *et al.*, 1999; Spikings *et al.*, 2005; Witt *et al.*, 2006).

2.2.1 BLOQUE NOR-ANDINO

Es un bloque o porción de litósfera separada tectónicamente bajo la acción de esfuerzos compresionales relacionados a la llegada de la cordillera de Carnegie al margen continental. A esta sección continental se la ha llamado Bloque Nor-Andino (Figura 2.2). Este segmento de litósfera acomoda tectónicamente los esfuerzos generados por la interacción de las placas Nazca, Sudamericana y Caribe (Nocquet *et al.*, 2014) y se

encuentra limitado al N por el cinturón deformado del Caribe Sur; al occidente por la fosa Ecuador-Colombia-Panamá; al E y S por el “Frente Andino Oriental. Este último se encuentra formado por una serie de fallas transpresivas dextrales de carácter regional que se extienden desde Ecuador en el Golfo de Guayaquil hasta Venezuela (Ego *et al.*, 1996) (Figura 2.2).

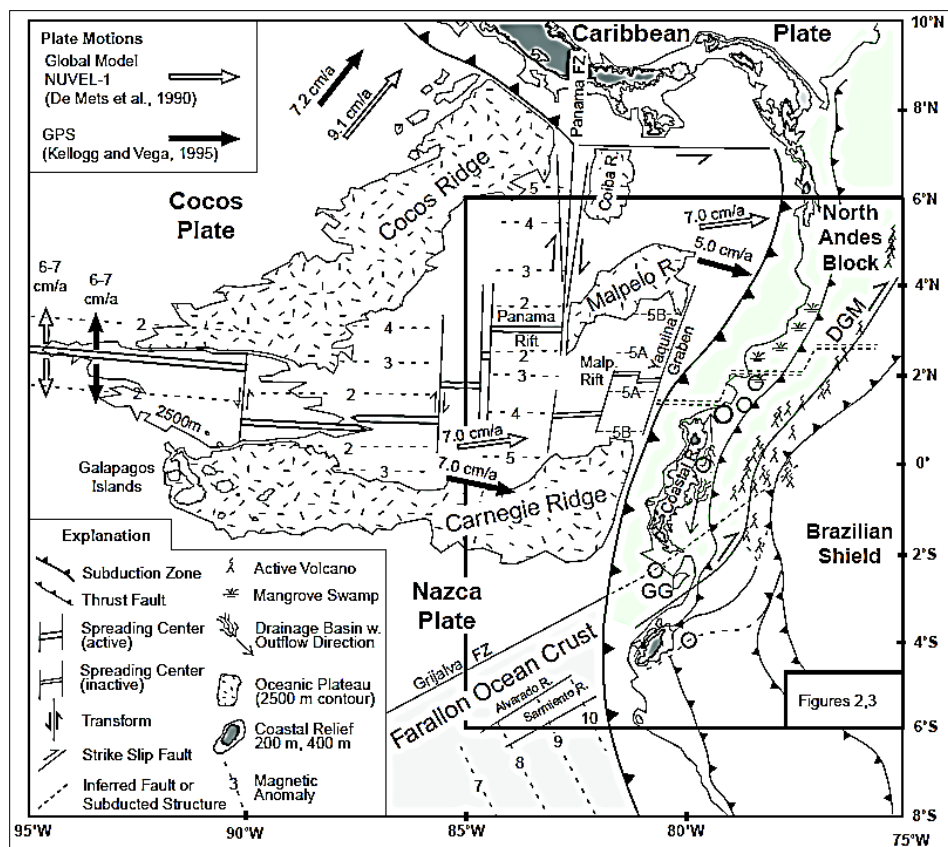


Figura 2.2. Esquema Tectónico Regional de los Andes Septentrionales (Gutscher *et al.*, 1999). DGM= Dolores Guayaquil Megashear, GG= Golfo de Guayaquil.

El Bloque se encuentra limitado al E por el sistema mayor dextral Dolores-Guayaquil mega-shear de dirección NE-SW (Gutscher *et al.*, 1999) que incluye las fallas Pallatanga, Chingual-La Sofía en Ecuador y la falla dextral de Algeciras en Colombia (Winter & Lavenue, 1989; Soulas *et al.*, 1991; Ego *et al.*, 1996; Gutscher *et al.*, 1999) y al W por la fosa de subducción de Ecuador y Colombia. La velocidad relativa con la que este se

desplaza respecto a la placa Sudamericana es de aproximadamente 6-8 mm/año en sentido NNE (Trenkamp *et al.*, 2002).

2.2.2 FALLAS CUATERNARIAS

Las estructuras tectónicas más jóvenes dentro del área de estudio corresponden a lineamientos que controlan la morfología local siguiendo una tendencia NE-SW bajo un régimen de esfuerzos con sentido transcurrente dextral y controlado por la cinemática regional de los Andes ecuatorianos (Egüez *et al.*, 2003) (Figura 2.3). De norte a sur tenemos las siguientes:

2.2.2.1 FALLA RÍO AMBI

Estructura con rumbo NE - SW que controla los depósitos sedimentarios pliocénicos de la Cuenca del Chota en su límite occidental, así como también los depósitos volcánicos Plio-Cuaternarios. Sus expresiones geomorfológicas definen escarpes y colinas alargadas a lo largo del valle del Río Ambi. Sus medidas aproximadas son 15,6 km, rumbo aproximado N31° y buzamiento hacia el occidente con un ángulo desconocido. La cinemática corresponde a una falla inversa con componente transcurrente dextral. Aproximadamente se desplaza <1 mm/año y su última actividad se produjo en el Cuaternario (< 1,6 Ma) (Egüez *et al.*, 2003).

2.2.2.2 FALLA OTAVALO

Reportada por Soulas (1988), se encuentra localizada al occidente de Otavalo y continúa hacia Atuntaqui con dirección NE-SW. Sugiere un salto de la falla de San Isidro más al N, al S finaliza con una pequeña cuenca transpresiva cerca de la zona de falla de Chavezpamba (Egüez y Yepes, 1993). Sus medidas aproximadas son 21,3 km, rumbo N42° y buzamiento desconocido, su cinemática posee un componente transcurrente dextral. Aproximadamente se desplaza < 1 mm/año y su última actividad se produjo en el Cuaternario (< 1,6 Ma).

2.2.2.3 FALLA BILLECOCHA - HUAYRAPUNGO (SECCIÓN BILLECOCHA Y SECCIÓN HUAYRAPUNGO)

Esta falla posee dos secciones cada una con diferente sentido de movimiento.

La **SECCIÓN BILLECOCHA** es observada sobre una morfología similar a un “plateau” erodado, con edad aproximada del Mioceno Tardío al Plioceno, localizado al este de un pliegue anticlinal asimétrico que se encuentra parcialmente cubierto por flujos de lava y otros materiales volcánicos del Cuaternario, provenientes de los volcanes Cotacachi y Yanahurcu. La morfología actual fue dejada por la última glaciación (ca. 15 ka) y subsecuentemente suavizada por la deposición de los volcánicos holocénicos (Ego, 1995). La longitud aproximada de este sistema de fallas es 7 km con rumbo aproximado N25° y buzamiento desconocido hacia el sureste. Posiblemente esta estructura es una falla normal, cuyas evidencias son la formación de escarpes, sag-ponds y cortes de drenaje. El movimiento más reciente se estima que ocurrió durante el Holoceno y la post glaciación (<15 ka). La morfología del escarpe de falla podría sugerir su último movimiento entre 5,700 y 10,000 años AP (Egüez *et al.*, 2003).

La **SECCIÓN HUAYRAPUNGO** fue descrita como una prolongación de la sección Billecocha por Egüez y Yepes, (1993). Esta sección se extiende desde el río Cambugán (sur de los domos volcánicos Muyurcu; Pleistoceno?). La longitud aproximada de esta estructura es 14,9 km con rumbo N37°E ± 4° y buzamiento desconocido, posee un sentido de movimiento dextral determinado por análisis micro-estructurales, sus escarpes muestran facetas triangulares a lo largo de los valles lineares dejados por el sentido de movimiento de rumbo. Termina en estructuras tipo “cola de caballo”.

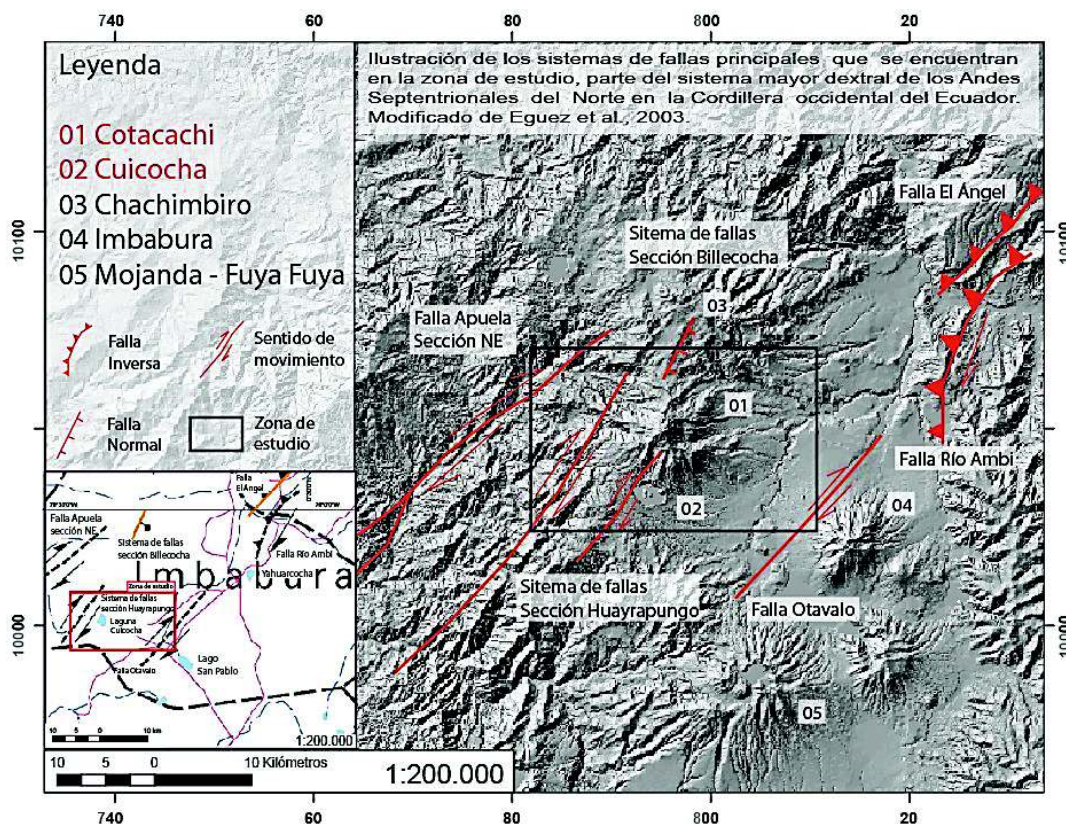


Figura 2.3. Modificado de: Mapa de Fallas Cuaternarias del Ecuador (Eguez *et al.*, 2003), relacionadas a la zona de estudio.

2.3 ARCO VOLCÁNICO CUATERNARIO

Considerando la posición geográfica, morfología, geoquímica y estilos eruptivos, los volcanes del arco continental se encuentran distribuidos en cuatro filas semi-paralelas: El frente volcánico de la Cordillera Occidental, Volcanes del Valle Interandino, Volcanes de la Cordillera Real, Volcanes de tras arco o Zona Subandina. Su orientación preferencial es NNE-SSW con una longitud aproximada de 350 km y sus límites se extienden desde el Volcán Cerro Negro en la frontera con Colombia hasta el Volcán Sangay en los 2° S de latitud (Hall y Beate, 1991; Hall *et al.*, 2008). Las composiciones predominantes son calco-alcalinas y alcalinas (Monzier *et al.*, 1997).

El Arco Volcánico del Ecuador continental ha sido catalogado por Bernard y Andrade, (2011) (Figura 2.4), determinando la presencia de 84 volcanes. Considerando su último registro eruptivo se los ha clasificado en: 58 extintos o dormidos (última erupción >10.000

años), 17 potencialmente activos (última erupción <10.000 años), 5 volcanes activos (última erupción <500 años) y 3 volcanes en erupción (entre 2011 y 2015).

2.3.1 FRENTE VOLCÁNICO DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL

El Frente volcánico corresponde a la primera fila de volcanes que aparecen desde la fosa, todos ellos ubicados sobre la cordillera Occidental. Estos edificios alcanzan alturas que oscilan entre los 4000 – 5000 msnm salvo la cumbre máxima del Volcán Chimborazo con 6268 msnm. Según Hall *et al.*, 2008, los centros de emisión están sistemáticamente separados de 30 a 35 km entre cada uno especialmente en la zona central. La actividad principal durante el Pleistoceno Tardío y el Holoceno ha sido de composición andesítica y dacítica. Generalmente, la morfología principal está representada por estrato-volcanes en forma de cono, complejos de domos dacíticos, así como calderas o cráteres de explosión, donde se han emplazado domos de composiciones intermedias y ácidas. La actividad precolombina e histórica está ejemplificada por grandes erupciones como las ocurridas en 1660 en el volcán Guagua Pichincha, 800 años AP en el Quilotoa, 2300 – 2400 años AP para el Pululahua y Ninahuilca, y 2900 – 3000 ¹⁴C años AP para Cuicocha. Estas erupciones afectaron a Culturas Indígenas tempranas, cubriendo superficies de 10³ - 10⁶ km² con depósitos de caída y flujos piroclásticos de ceniza y pómez. Los magmas más jóvenes de este grupo se encuentran entre los rangos composicionales de 60 – 66 % de SiO₂ y 0,9 - 1,5 % de K₂O (p.e., andesitas ácidas y dacíticas), sus minerales característicos son plagioclasa, anfíbol, ortopiroxeno, escasa biotita y cuarzo. El Volcán Cotacachi pertenece a la fila del Frente Volcánico de la Cordillera Occidental.

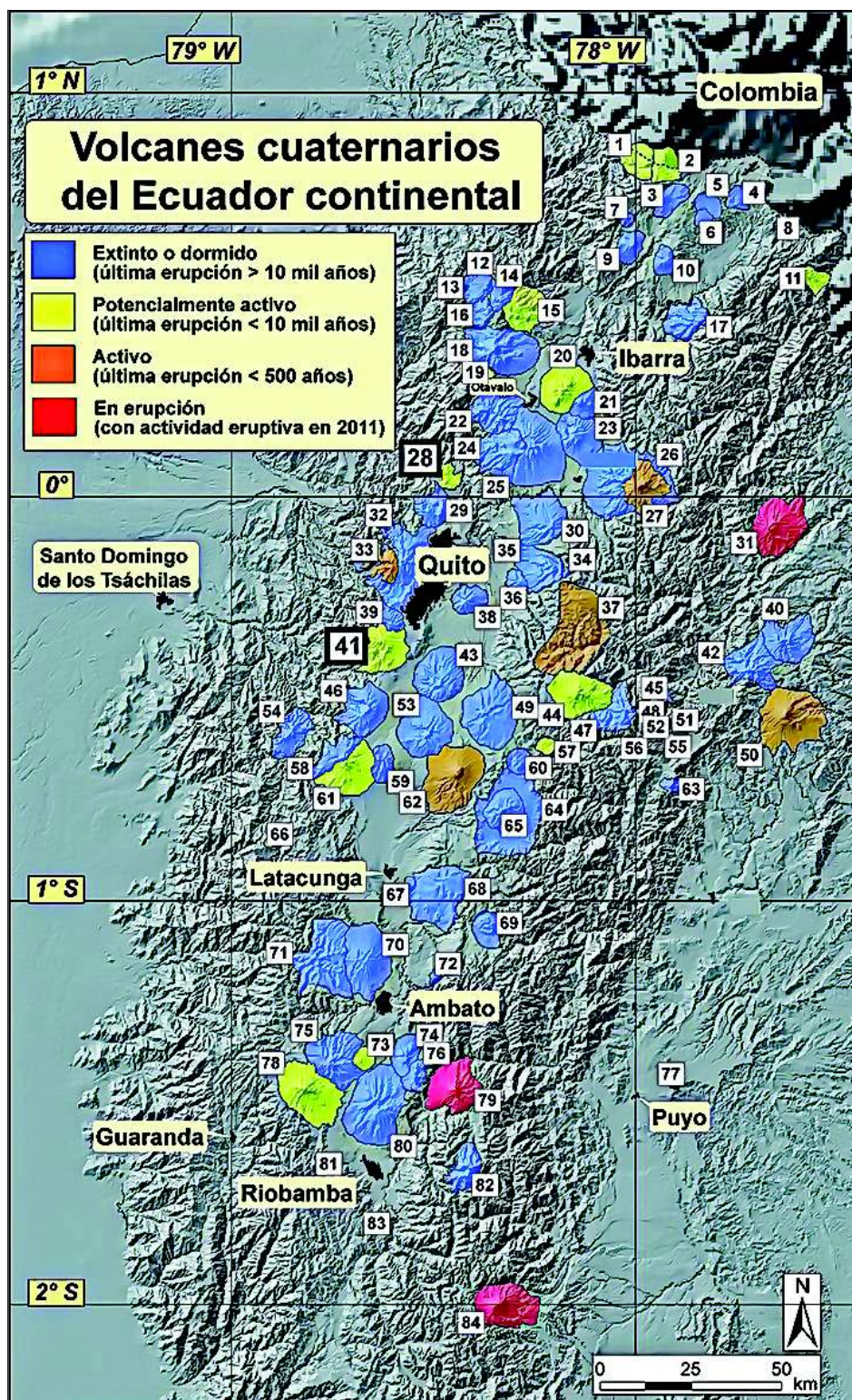


Figura 2.4. Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental (Bernard & Andrade, 2011)

1 Cerro negro, **2** Chiles, **3** Potrerillos, **4** Chulamuez, **5** Chalpatán, **6** Horqueta, **7** Chiltazón, **8** Virgen Negra, **9** Iguán, **10** Chanquilulo, **11** Soche, **12** Pilavo, **13** Parulo, **14** Yanaurcu de Piñán, **15** Chachimbiro, **16** Pulumbura, **17** Mangus, **18** Cotacachi, **19** Cuicocha, **20** Imbabura, **21** Cubilche, **22** Cushnirumi, **23** Cusín, **24** Fuya Fuya, **25** Mojanda, **26** Viejo Cayambe, **27** Nevado Cayambe, **28** Pululahua, **29** Casitagua, **30** Pambamarca, **31** Reventador, **32** Rucu Pichincha, **33** Guagua Pichicha, **34** Izambi, **35** Cerro Puntas, **36** Coturco, **37** Chacana, **38** Ilaló, **39** Carcacha, **40** Yanaurcu, **41** Atacazo – Ninahuilca, **42** Pan de Azúcar, **43** Pasochoa, **44** Antisana, **45** Machángara, **46** Corazón, **47** Aliso, **48** Bermejo, **49** Sincholagua, **50** Sumaco, **51** El Dorado, **52** Huevos de Chivo, **53** Rumiñahui, **54** Almas Santas, **55** Pumayacu, **56** Cosanga, **57** Huañuña, **58** Iliniza Norte, **59** Santa Cruz, **60** Chaupiloma, **61** Iliniza Sur, **62** Cotopaxi, **63** Volcán Azul, **64** Chalupas, **65** Quilindaña, **66** Quilotoa, **67** Chinibano, **68** Putzalagua, **69** Angahuana, **70** Sagoatoa, **71** Pilisurco, **72** Huicutambo, **73** Puñalica, **74** Huisla, **75** Carihuairazo, **76** Mulmul, **77** Conos del Puyo, **78** Chimborazo, **79** Tungurahua, **80** Iqualata, **81** Conos de Calpi, **82** Altar, **83** Conos de Licto, **84** Sangay.

2.4 GLACIACIONES DURANTE EL CUATERNARIO

Los estudios realizados por Clapperton (1983, 1986, 1990), Clapperton y McEwan (1985) y Clapperton y Vera (1986) han determinado varios períodos de glaciación durante el Neógeno y Cuaternario. Los depósitos y rasgos morfológicos asociados a estas glaciaciones se encuentran ampliamente expuestos en los Andes ecuatorianos por encima de los 3600 metros de altura y consisten principalmente en depósitos de morrenas, afloramientos de Till (sedimentos depositados por los glaciares) y bloques estriados dispersos.

En el Ecuador no se han encontrado depósitos relacionados a etapas tempranas de glaciación, debido a que han sido enterrados y/o erosionados, posiblemente porque las montañas no eran lo suficientemente altas como para albergar los grandes cuerpos de hielo.

Los períodos glaciares reconocidos, son los siguientes:

Neo-glaciar

Edad (AP): 5 000 – presente. Picos: Pequeña edad de hielo; siglo 14to – 19no; 3000 – 1800.

Tardi-glaciar “European upper Dryas chron”

Edad (AP): 12 000 – 10 000.

Maxi-glaciar

Edad (AP): >33 000 – 14 000. Picos: 34 000 - 27 000; 20 000 - 18 000; 16 000 - 14 000.

Último intervalo glaciar máximo temprano a medio

Edad (AP): 80 000 - 36 000. Picos: 45 000 - 36 000.

Penúltima glaciación

Edad (AP): >170 000 - 110 000.

Pre-penúltima glaciación

Edad (AP): <1.8 Ma.

Glaciación Pre-Pleistoceno

Edad (AP): <5 - 1.8 Ma. Picos: 3,5 Ma.

2.5 ESTUDIOS PREVIOS

El volcán Cotacachi ha sido objeto de algunas investigaciones respecto a su geología, entre las cuales vale mencionar las siguientes:

Wolf (1892) realiza una descripción muy breve del volcán Cotacachi y Cuicocha haciendo énfasis en los glaciares visibles en el flanco oriental del mismo, además hace referencia a la presencia de aguas termales y al terremoto del 16 de agosto de 1868.

Sauer (1965) hace breves referencias sobre la petrografía de los domos de la Caldera Cuicocha y al volcán Cotacachi, además realiza una mención de la glaciación Pleistocena que lo afectó.

Stübel y Reiss (1868-1877, publicación 1987) describen la morfología del volcán Cotacachi, y mencionan su imponente glaciar así como los derrumbes y flujos de lodo que destruyeron los pueblos en las faldas orientales del volcán a causa del terremoto de 1868.

Hall (1977) incluye a los Volcanes Cotacachi y Cuicocha en la sección de volcanes apagados o en estado latente, además indica que los depósitos dacíticos y riolíticos fueron originados en la Caldera de Cuicocha.

Informes realizados por OLADE – INECCEL (1983) hablan de la importancia de la zona de la provincia de Imbabura como prioridad para la exploración geotérmica.

von Hillebrandt (1989), realiza el ESTUDIO GEOVULCANOLÓGICO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CUICOCHA-COTACACHI Y SUS APLICACIONES, PROVINCIA DE IMBABURA. Este trabajo representa el primer estudio detallado del volcán y presenta un mapa geológico a escala 1:50.000 (Figura 2.5).

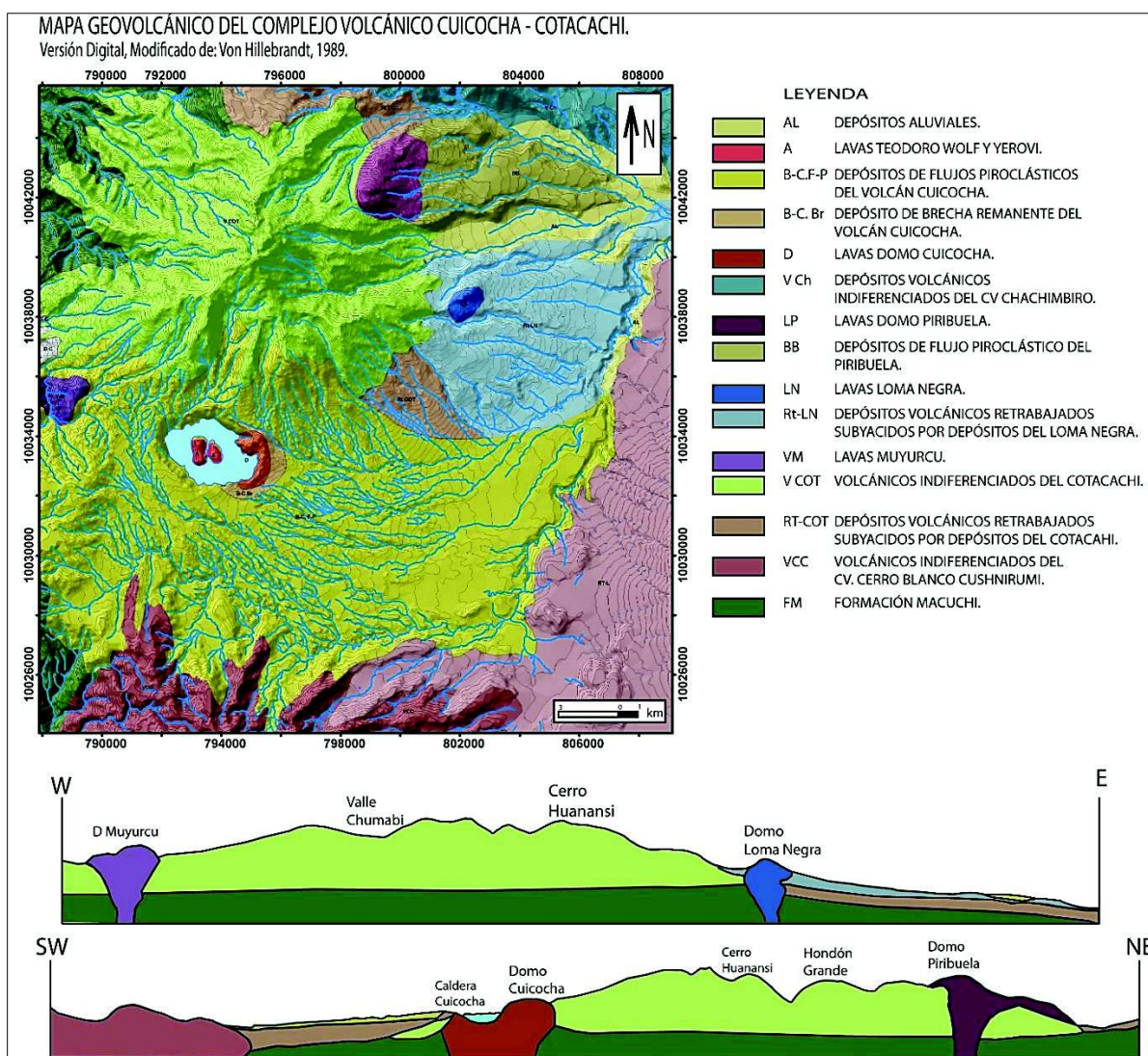


Figura 2.5. Versión Digital, Mapa Geovolcánico del Complejo Volcánico Cuicocha – Cotacachi. (Modificado de: Hillebrandt, 1989).

El estudio incluye descripciones morfológicas, petrográficas y granulométricas, además de algunos ensayos de geoquímica de elementos mayores y dataciones que fueron utilizados para describir varios centros de emisión. Adicionalmente presenta un análisis de los riesgos volcánicos asociados. Sin embargo, está mayormente dedicado a la actividad y desarrollo de la caldera de Cuicocha.

El estudio más reciente lo llevó a cabo Pidgen (2014), quien estudia de manera más detallada los períodos eruptivos asociados a la Caldera de Cuicocha, presentando un modelo evolutivo de la actividad reciente del volcán.

CAPÍTULO 3

3 GEOLOGÍA DEL VOLCÁN COTACACHI

En base al análisis e interpretación de mapas geológicos locales, regionales, modelos digitales de elevación (DEM; 4 metros de resolución) y principalmente fundamentado en las observaciones realizadas en las jornadas de campo, ha sido posible identificar los principales rasgos morfológicos dentro de la zona de estudio. Esto asociado a las descripciones macroscópicas de las muestras de roca, ha permitido la identificación de las unidades morfo-estratigráficas mayores (Figura 3.1) que componen este complejo volcánico.

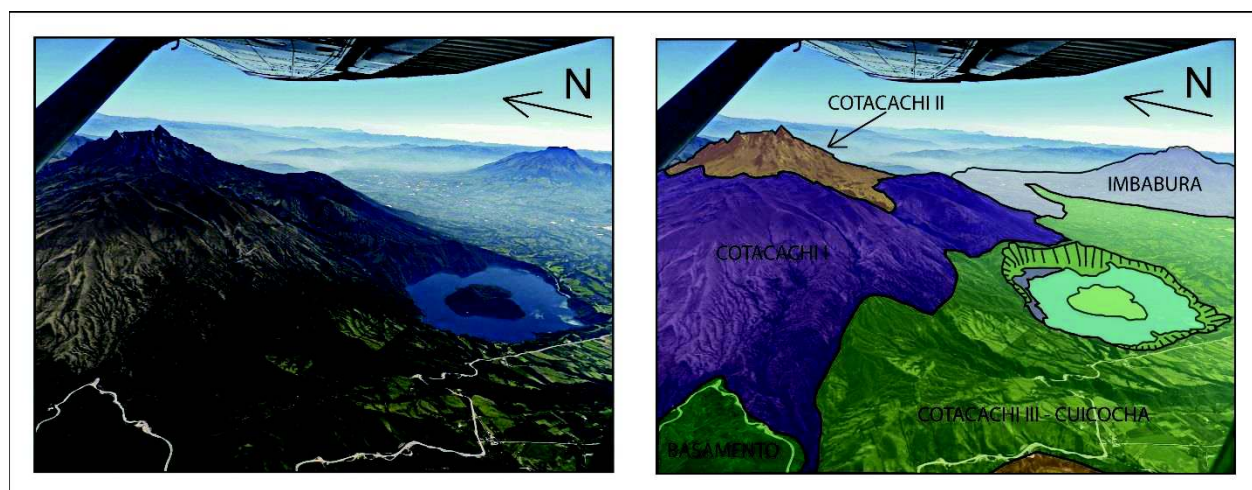


Figura 3.1. Unidades Mayores identificadas en el volcán Cotacachi: COTACACHI I, COTACACHI II y COTACACHI III - CUICOCHA.

3.1 MORFOLOGÍA Y RASGOS ESTRUCTURALES GENERALES

Se identificaron tres grupos estructurales. El primero está asociado al contexto tectónico local; el segundo está relacionado con los rasgos de abrasión glaciar, depósitos de morrenas y circos glaciares; finalmente, el tercero describe las estructuras volcánicas formadas por los procesos volcánicos asociados a su evolución.

3.1.1 RASGOS ESTRUCTURALES TECTÓNICOS

En la zona de estudio tenemos la presencia de lineamientos regidos por esfuerzos transcurrentes dextrales de componente compresivo, se observan especialmente en la

parte alta del flanco norte del volcán Cotacachi. El sistema de fallas asociado a la sección Billecocha (ver FALLA BILLECOCHA HUAYRAPUNGO - SECCIÓN BILLECOCHA) (Figura 3.2), posee un rumbo aproximado $N22^{\circ}E$ con longitudes variables entre 3,5 a 4 km y que es considerado como activo (Ego et al., 1995). Apparently estas fallas están afectando a las rocas más viejas del volcán, es decir al Cotacachi I. Sin embargo respecto al sistema principal se observan estructuras secundarias asociadas que toman una tendencia direccional nororiental, aproximadamente $N45^{\circ}E$ con longitudes muy variables entre 1 km y 4 km, además los lineamientos más evidentes parecen ser fallas normales (ver Figura 2.3).

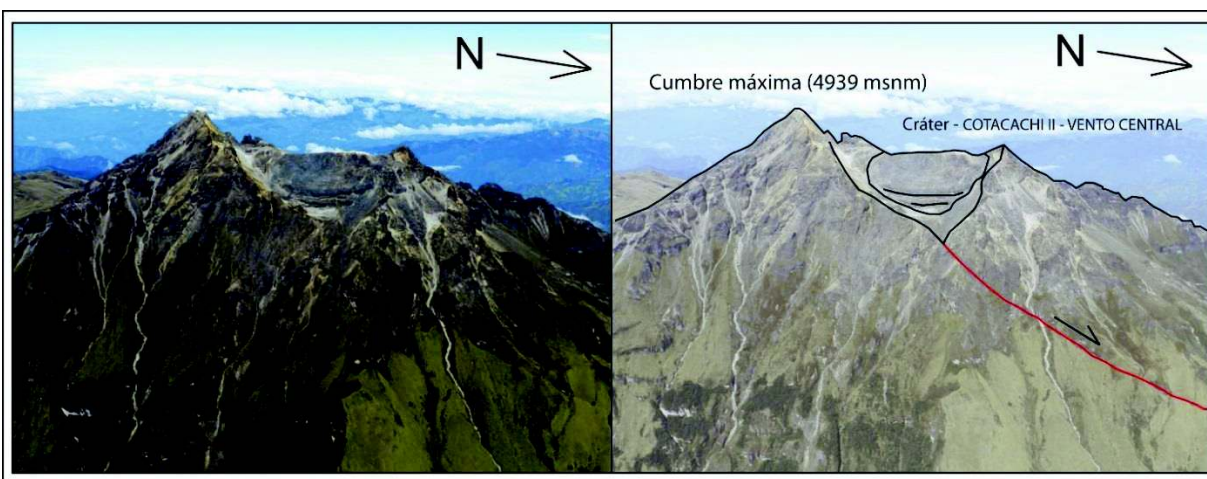


Figura 3.2. Prolongación del sistema de fallas Billecocha - Huayrapungo vista en el flanco oriental del volcán.

En las paredes noroccidentales de la laguna de Cuicocha, se pueden observar fracturas que cortan claramente la secuencia volcánica del Cotacachi, poseen rumbo $N18^{\circ}E$ y buzamiento noroccidental, su longitud es de aproximadamente 3,5 km. Cubriendo a esto se observan depósitos piroclásticos recientes. En el borde norte también se puede distinguir un corte de 544 m de longitud y su cinemática parece estar regida por la gravedad. Estas fallas son posteriores a la unidad Cotacachi I, y anteriores a la formación del cráter de Cuicocha (Figura 3.3).

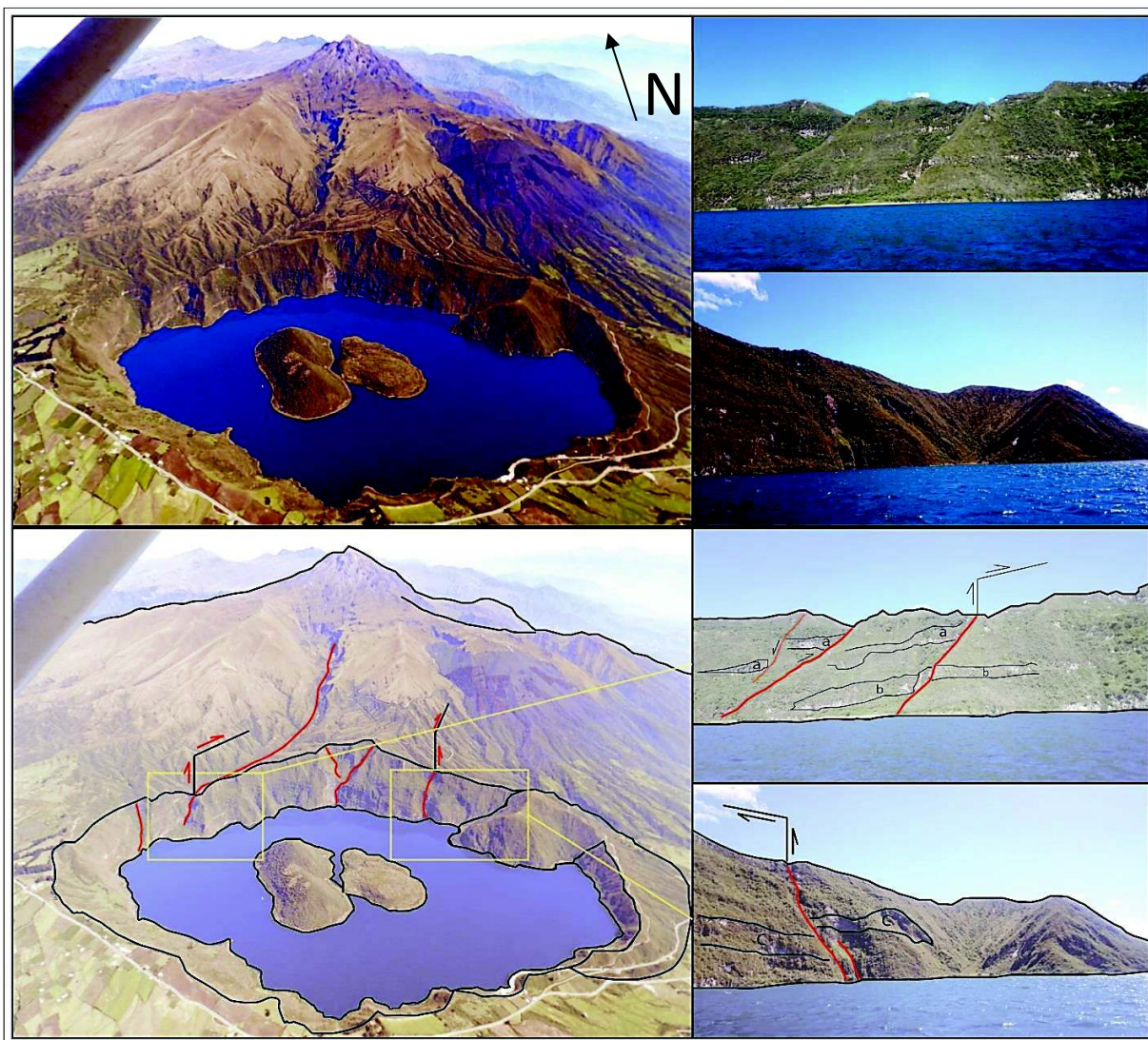


Figura 3.3. Prolongación del sistema de fallas Billecocha - Huayrapungo vista en el flanco sur del volcán y borde norte de la caldera.

3.1.2 RASGOS GLACIARES

Las principales evidencias de glaciación, son los depósitos mal sorteados angulares con líticos de andesita típicos de morrena en la parte alta del páramo de Morochos. Sobre la cota de los 4150 msnm se pueden observar estrías producto de abrasión glaciaria con rumbo aproximado N-S (Figura 3.4), estas se encuentran muy bien talladas sobre las rocas más jóvenes del volcán Cotacachi en la parte alta de un pronunciado valle glaciario en la quebrada Chumabi (ver Anexo 01 – Mapa Geológico del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha).

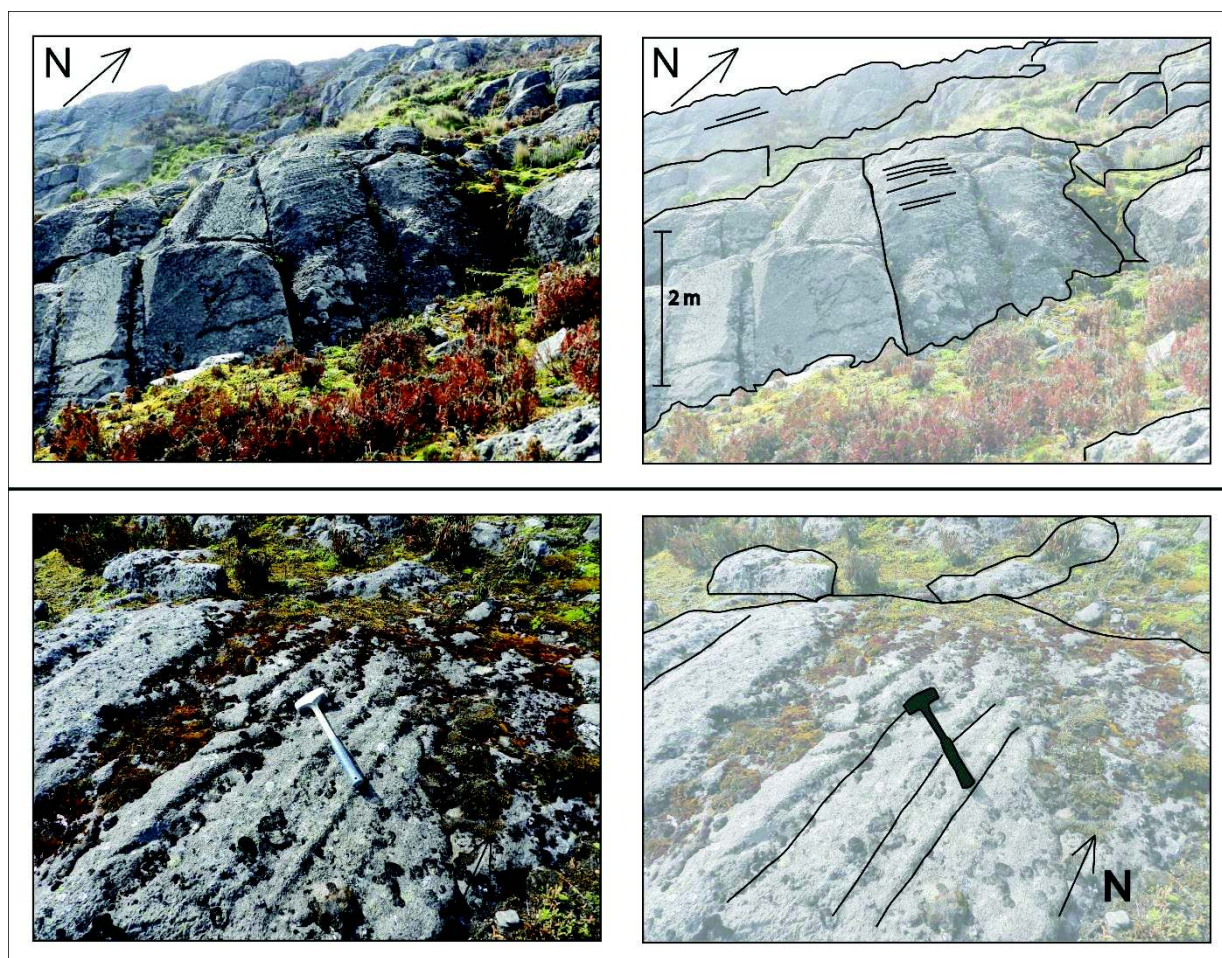


Figura 3.4. Estrías glaciares encontradas en las lavas del volcán Cotacachi, correspondientes a la unidad COTACACHI I.

Es importante mencionar que los últimos períodos de glaciación fueron: desde los 12000 – 10000 AP correspondiente al Tardi glaciar donde posiblemente fueron afectadas algunas rocas del edificio y desde los 5000 AP hasta el presente correspondiente al Neo glaciar. Descripciones del volcán realizadas por Whympner (1877), Stübel y Reiss (1897) hablan de la presencia de imponentes glaciares tanto al norte como al sur del volcán e imponentes lagunas relacionadas (p.e., Laguna de Cristococha, ver subcapítulo 2.4 GLACIACIONES DURANTE EL CUATERNARIO.).

3.1.3 ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

Morfológicamente el Volcán Cotacachi posee varias estructuras que destacan en la configuración actual de su edificio.

La parte basal del volcán se caracteriza por ser ancha y potente, presenta relieves suaves, con pendientes de menos de 30° y se extiende aproximadamente 20,9 km en sentido E-W y 14,7 km en sentido N-S. Al norte se encuentra limitado por los productos del Complejo Volcánico Chachimbiro, al occidente está limitada morfológicamente de manera abrupta por el basamento de la Cordillera Occidental; al sur se encuentra cubierta por varios niveles de paleosuelo y cortada por enormes valles glaciares, que luego descienden suavemente hacia la laguna de Cuicocha; el flanco oriental está cubierto por varios depósitos volcanoclásticos propios y de los volcanes más cercanos (p.e., Imbabura, Chachimbiro). A esta porción del edificio se le denominará como COTACACHI I.

Sobre COTACACHI I se construye un segundo edificio que actualmente tiene forma semejante a una “pirámide” de aproximadamente 16 km² de base. En su parte más alta se forma una ensilladura con dos picos; uno de los cuales constituye la cumbre del macizo (4939 msnm). Esta sección del edificio se encuentra sumamente erosionada con presencia de escarpes pronunciados casi verticales y en su flanco suroccidental se encuentra cortada por una serie de domos satélite y diques pequeños. En la ensilladura formada en la cumbre del volcán se distinguen varias coladas de lava “tipo lago de lava” superpuestas, que cubren lo que probablemente constituía una estructura similar a un cráter del volcán (Figura 3.2). Grandes domos se encuentran ubicados en las periferias del volcán: el más grande es el domo Piribuela ubicado al NE, el segundo, llamado Loma Negra es un poco más pequeño y está ubicado al SE, al S el anfiteatro del domo Cuicocha y en el SW tenemos una serie de domos denominados domos Muyurcu (Hillebrandt, 1989; ver ANEXO 01; ver subcapítulo 3.2.3.2 COTACACHI II - DOMOS). Esta porción del complejo se denominará como COTACACHI II.

Los grandes “escarpes” que resaltan en la morfología del volcán COTACACHI I y II, están direccionados tanto al NW como al NE y posiblemente son remanentes de dos anfiteatros

(escarpes de deslizamiento) (**Figura 3.5**) relacionados a eventos catastróficos que lo destruyeron parcialmente.

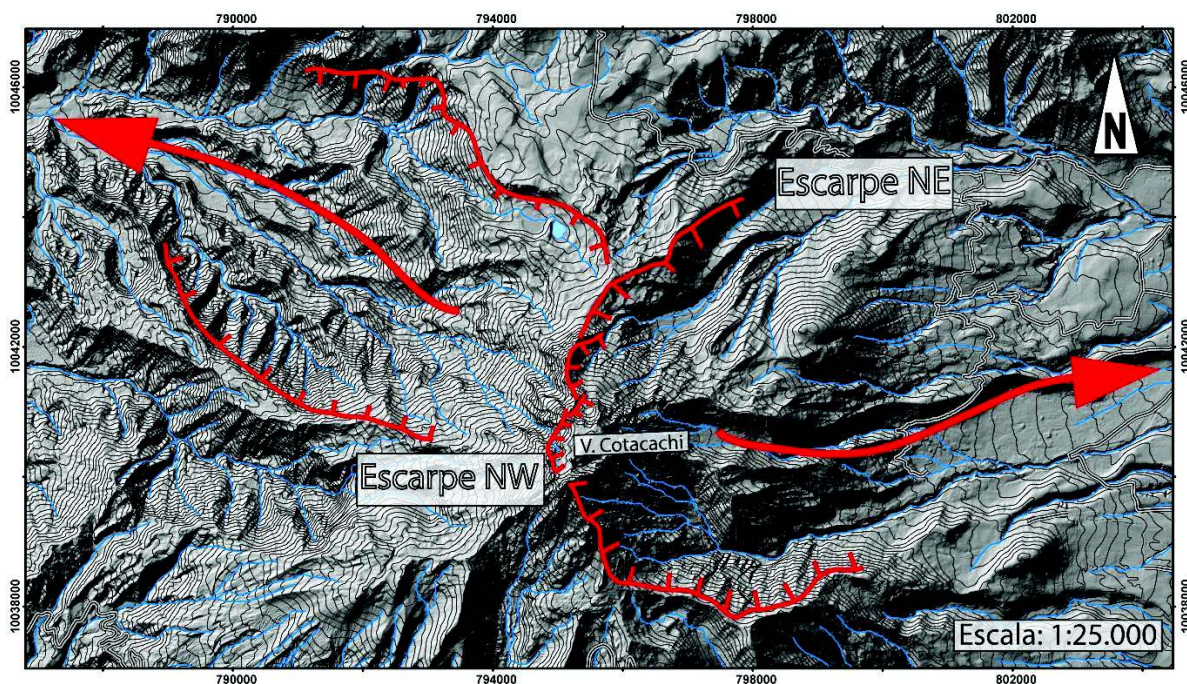


Figura 3.5. Escarpes de colapso de edificio en el Volcán Cotacachi.

En el flanco sur del volcán Cotacachi se observa una depresión abrupta de forma elíptica alargada en sentido E-O, con pendiente de borde vertical y rellenado por la laguna de Cuicocha (ver Figura 3.21). En el centro de esa laguna se puede observar dos islotes que básicamente son varios domos distribuidos en dos grupos: el islote occidental está conformado por los domos Wolf N y Wolf S; el segundo islote está formado por el domo Yerovi (Hillebrandt, 1989). En el borde nororiental se encuentran los restos del domo Cuicocha. A esta última unidad se la llamará COTACACHI III - CUICOCHA.

3.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE LAS UNIDADES MAYORES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO COTACACHI-CUICOCHA

En el presente estudio se han reconocido dos grandes unidades mayores que conforman el edificio central, las cuales han sido denominadas COTACACHI I y II. Se estima que el edificio del volcán Cotacachi ha sido afectado por al menos dos colapsos de flanco, cuyas evidencias morfológicas son dos escarpes de deslizamiento localizados en sus flancos NW (Boland *et al.*, 1998.) y NE (este estudio). Finalmente, los eventos y depósitos asociados a la formación de la caldera de Cuicocha constituyen la última unidad estratigráfica mayor dentro de toda la evolución del complejo volcánico, denominada COTACACHI III - CUICOCHA.

3.2.1 BASAMENTO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO COTACACHI-CUICOCHA

Está constituido por las secuencias volcánicas de composición básica-intermedia y afinidad geoquímica toleítica de plateau y calco-alcalina de arco de isla que son: la Unidad Pallatanga, el Arco Río Cala y sus derivados turbidíticos (p.e., Unidades Natividad y Pilatón) (Vallejo, 2007).

En la vía que conduce desde la Laguna de Cuicocha hasta el sector de Apuela fue posible observar los depósitos volcano-sedimentarios de origen turbidítico relacionados a la Unidad Natividad (COTA 09; UTM: 786420 / 10037754; Alt: 3100msnm) y los conglomerados de aporte volcánico continental asignados a la Unidad Silante, todos en contacto discordante erosivo, subyaciendo secuencias de coladas de lava de la base del volcán Cotacachi (Figura 3.6). Adicionalmente en la misma carretera aflora el intrusivo cuarzo-diorítico de Apuela cuya extensión es de 750 km² y está datado en $16,5 \pm 1,1$ Ma. Dicho intrusivo es un granitoide de tipo I, cálcico metaalumínico (Boland *et al.*, 1998) concordante al domo satélite La Merced con $18,5 \pm 0,9$ Ma (Van Thournout, 1991); las rocas volcánicas Cretácicas afloran como escamas tectónicas en la zona de estudio (Boland *et al.*, 1998; Vallejo, 2007).

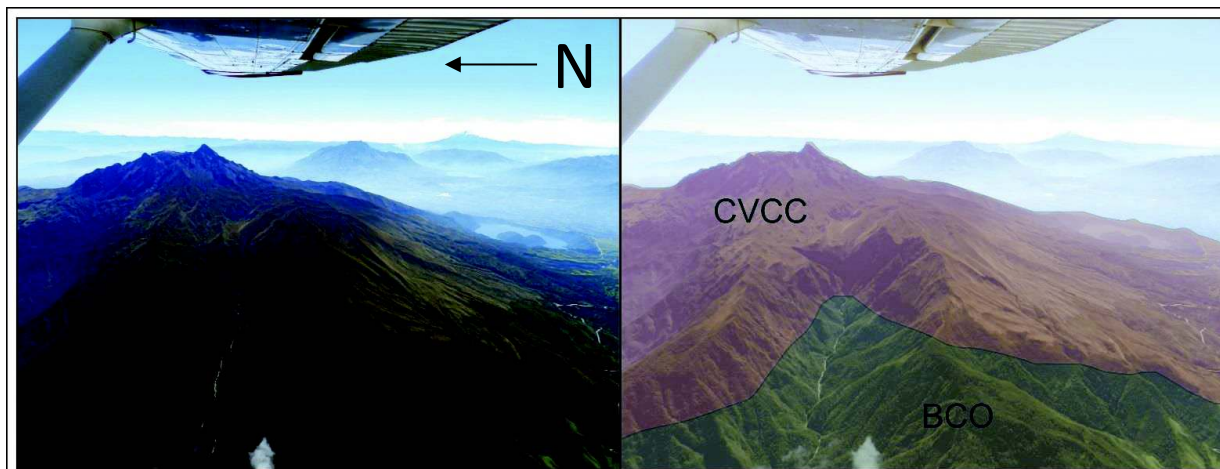


Figura 3.6. Contacto morfológico (discordante erosivo) entre el Basamento de la Cordillera Occidental (BCO) con el Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha (CVCC).

3.2.2 UNIDAD COTACACHI I

Esta unidad está constituida por dos subunidades COTACACHI I - BASE y COTACACHI I - SUPERIOR.

Buenas exposiciones pueden encontrarse en los flancos: nororiental, oriental, sur y suroccidental del volcán. Está formada por intercalaciones de flujos masivos de lava y depósitos de brechas volcánicas monolíticas clasto-soportadas. En general las rocas de esta unidad se encuentran bien preservadas y no muestran evidencia de alteración hidrotermal, su espesor aproximado es de 1200 metros (Figura 3.7).

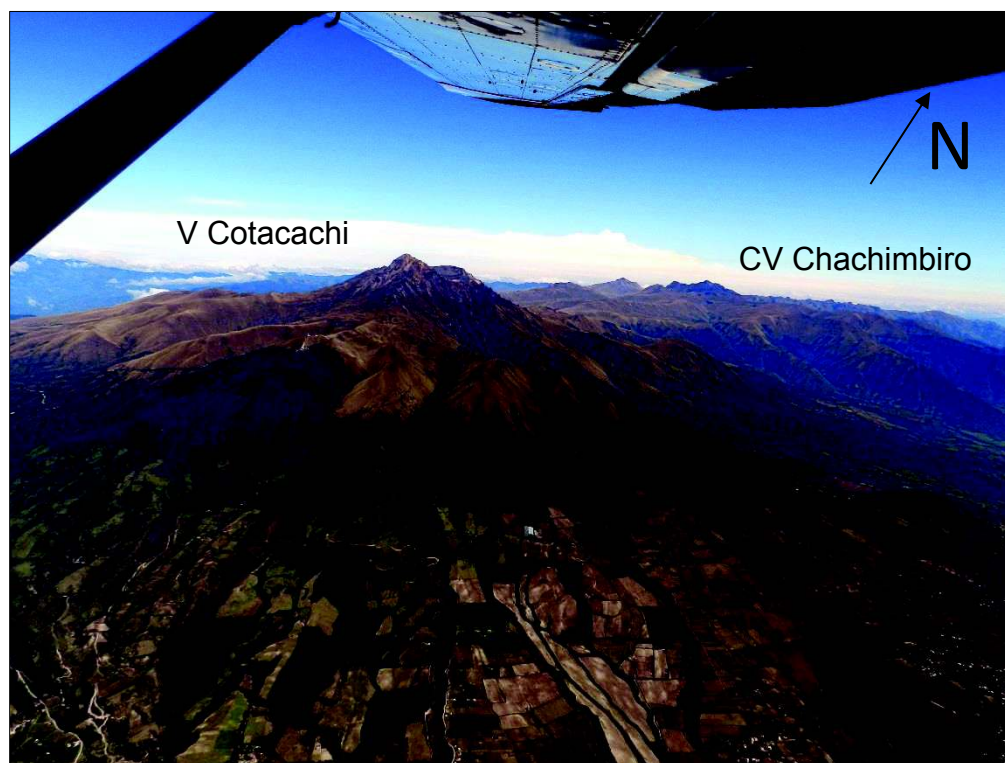


Figura 3.7. Volcán Cotacachi, unidad COTACACHI I; al fondo de la fotografía se observan los picos correspondientes al Complejo Volcánico Chachimiro.

3.2.2.1 COTACACHI I – BASE

Sus afloramientos son muy escasos y se restringen a sitios puntuales al sur y norte del volcán. Afloramientos se encuentran en la comunidad El Morlán en la margen derecha del río Alambi (COTA 02; UTM: 800391 / 10039416; Alt: 2800 msnm) y en la vía de segundo orden que conduce a la laguna de Cristococha (MM 1 B - Monzier M; UTM: 798600 / 10045700; Alt: 3200 msnm y COTA 34: 796978 / 10044616; Alt: 3495 msnm) (Figura 3.8).

La unidad Cotacachi I-Base se encuentra formada por secuencias de flujos de lava masivos y porfíricos de color gris claro, sus fenocristales (20 – 25 %) son principalmente piroxeno y olivino (ver subcapítulo 4.1 ESTUDIO PETROGRÁFICO). El techo de esta subunidad está constituido por brechas o auto-brechas volcánicas monolíticas, constituidas por líticos de andesita porfírica de color gris claro, sus fenocristales (25 %) son piroxeno y olivino.

Se encuentra en contacto discordante erosivo sobreyaciendo el BASAMENTO y contacto discordante subyaciendo las rocas de la unidad COTACACHI I – SUPERIOR.

La edad de esta unidad de base es anterior a 162 ka y es referente a las dataciones K/Ar obtenidas para las rocas de COTACACHI I – SUPERIOR.



Figura 3.8. Flujo de lava perteneciente a la unidad COTACACHI I-BASE (Fotografía: S Almeida).

3.2.2.2 COTACACHI I – SUPERIOR

Buenas exposiciones se encuentran en los flancos suroccidental, sur, oriental y nororiental del volcán; en los Páramos de Tablachupa, Páramo los Jardines, Tambo Viejo y El Tablón respectivamente. En su mayoría, los afloramientos corresponden a flujos de lava masivos, compuestos de andesita porfírica, intercalados con auto-brechas piroxénicas (COTA 36; UTM: 796554 / 10045256; Alt: 3626 msnm) de color gris claro. Las andesitas tienen fenocristales de piroxeno y plagioclasa, el contenido de fenocristales puede llegar a ser elevado hasta ~ 45 % con tamaño promedio de 2 mm (ver subcapítulo 4.1 ESTUDIO PETROGRÁFICO) (COTA 01; UTM: 799023 / 10039102; Alt: 3052 msnm).

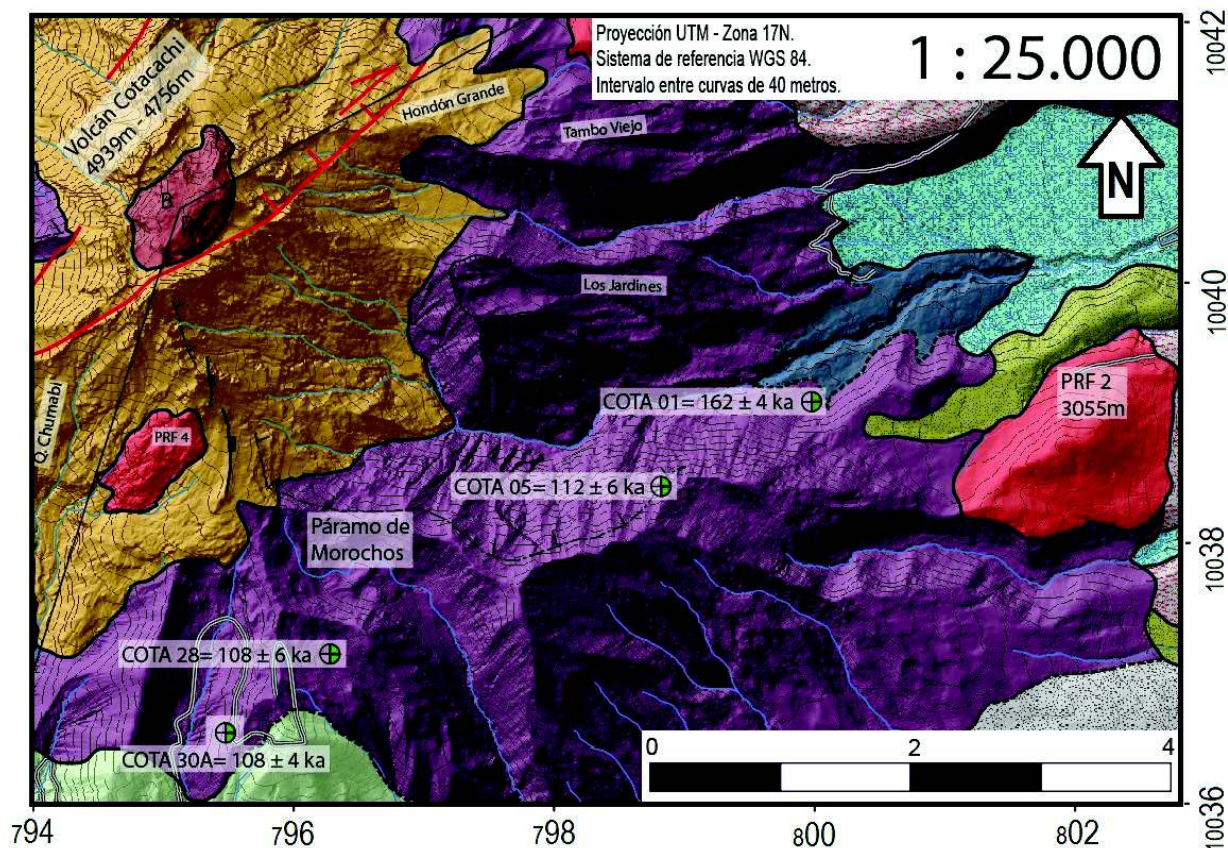


Figura 3.9. Mapa de ubicación de las dataciones realizadas en las rocas de la unidad COTACACHI I – SUPERIOR, escala 1:25.000.

El espesor aparente de esta subunidad es de aproximadamente 500 metros o mayor. Se encuentra en contacto discordante sobreyaciendo las brechas volcánicas de COTACACHI I – BASE y subyaciendo la secuencia de lavas de COTACACHI II.

Se realizaron dataciones radiométricas mediante el método de K/Ar en algunas de las muestras de lava correspondientes a la unidad Cotacachi I. Los resultados son los siguientes: COTA 01= 162 ± 4 ka, COTA 05= 112 ± 6 ka, CUI 28= 108 ± 6 y CUI 30 A= 108 ± 4 ka (Figura 3.9). Las edades obtenidas son concordantes con la secuencia estratigráfica de las muestras. Los resultados sugieren que la primera fase de

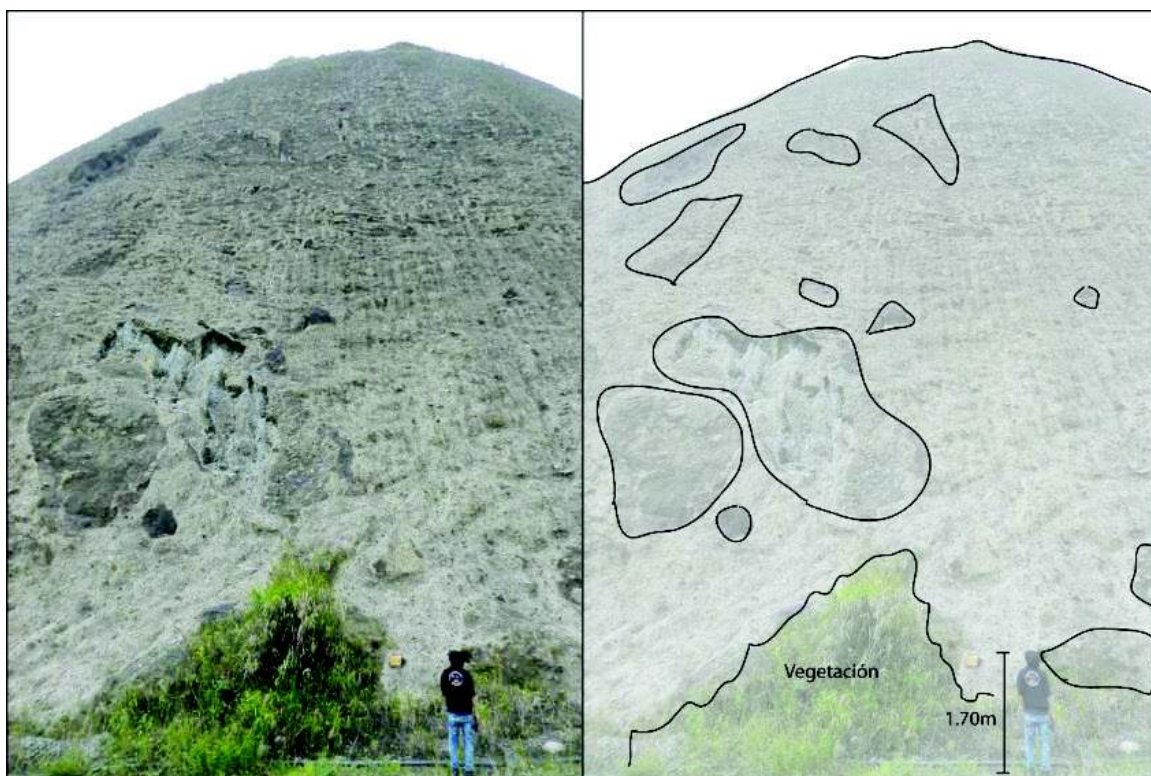
construcción del edificio volcánico tuvo lugar durante el Pleistoceno Superior, entre ~162 y ~ 108 ka.

Difiere de COTACACHI I – BASE principalmente por la cantidad de fenocristales de olivino observados en muestra de mano.

3.2.2.3 AVALANCHA DE ESCOMBROS NOROCCIDENTAL

Este depósito aflora en la vía que conduce desde la comunidad de Apuela hacia Selva Alegre y se la puede observar en la margen derecha del río Intag (UTM: 773177 / 10036309; Alt: 1366 msnm). Se encuentra en contacto discordante sobre el batolito de Apuela (Figura 3.10).

Esta gran avalancha se encuentra reportada en el Mapa Geológico del Ecuador entre 0°-1° N (Boland *et al.*, 1998.) en el cual se puede apreciar el alcance del depósito hacia el flanco noroccidental del volcán. Está constituido principalmente por andesitas masivas.



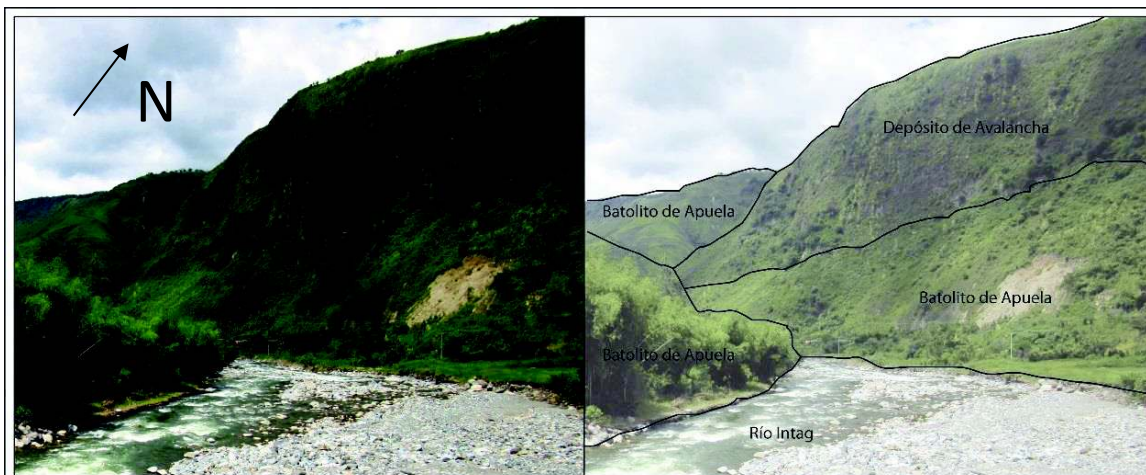


Figura 3.10. *Avalancha de Escombros NOROCCIDENTAL, Arriba: Afloramiento en la vía Nangulví – García Moreno, potencia estimada 66m (COTA 40 A, B; UTM: 766710 / 10026434; Alt: 1176 msnm). Abajo: Afloramiento de avalancha ubicado en la comunidad de Nangulví, este depósito se encuentra sobre el batolito de Apuela. (Fotografía: Y Enríquez).*

3.2.3 UNIDAD COTACACHI II

Esta unidad se encuentra formada por diversas litologías y estructuras volcánicas (Figura 3.11) que han sido agrupadas en dos subunidades: COTACACHI II – VENTO CENTRAL y COTACACHI II – DOMOS.



Figura 3.11. Unidad COTACACHI II, en la esquina inferior izquierda de la fotografía se puede apreciar la Laguna de Cristococha.

3.2.3.1 COTACACHI II – VENTO CENTRAL

Existen buenas exposiciones de esta unidad debido tanto a la ausencia de vegetación como a la fuerte erosión, la cual ha generado gran cantidad de depósitos detríticos que forman abanicos depositacionales y grandes arenales en las zonas bajas, donde se encuentra en contacto con el Cotacachi I. La unidad Cotacachi II, en la zona proximal (alta) está constituida principalmente por flujos de lava de composición andesítica y andesítica-ácida intercalados con paquetes de brechas volcánicas mono-litológicas de similar composición.

Los afloramientos más accesibles se encuentran en el flanco sur del volcán siguiendo la ruta de ascenso a la cumbre (~ 4000 msnm). En el Páramo de Morocho se observan estructuras volcánicas correspondientes a domos satélite: COTA 14; UTM: 795397 / 10038984; Alt: 4414 msnm - COTA15; UTM: 795280 / 10038963; Alt: 4369 msnm - COTA 16; UTM: 795506 / 10038737; Alt: 4276 msnm y diques: - COTA 11; UTM: 795728 / 10038591; Alt: 4245 msnm - EC 87; UTM: 795700 / 10038900 (Hillebrandt, 1989) (Figura 3.13) (Figura 4.1).

Las rocas que forman estas estructuras son andesitas de color gris claro, verdoso o rosáceo, su textura es porfirítica y sub-porfirítica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol.

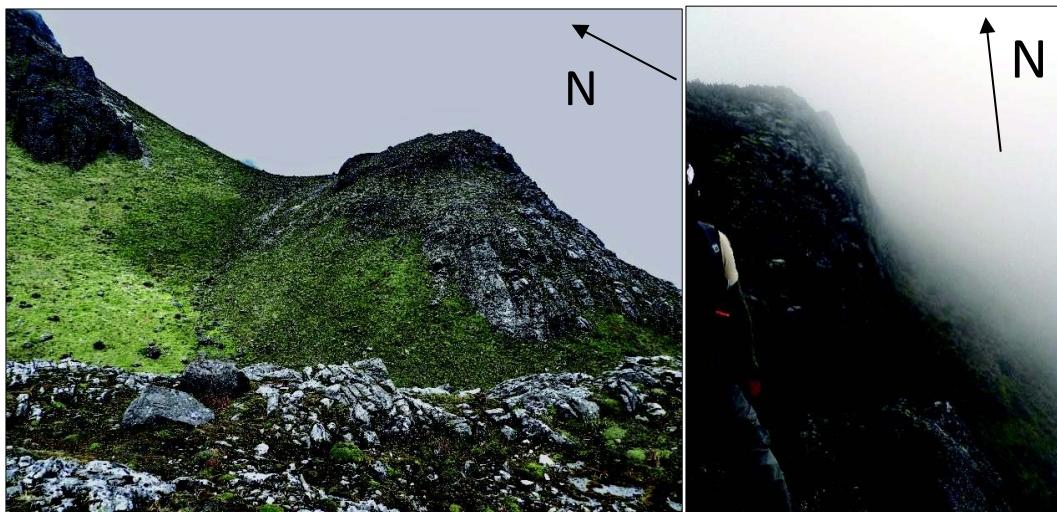


Figura 3.12. Unidad COTACACHI II-VENTO CENTRAL, Izquierda: se observa uno de los domos satélites localizados en el flanco sur del volcán. Derecha: se observa un dique que corta esta unidad con rumbo N10°.

Estas estructuras cortan a flujos de lava masivos representados por andesitas porfíricas de color negro con fenocristales plagioclasa (~ 40 %), piroxeno y anfíbol (~ 5 %). Dentro de estas lavas se encontraron xenolitos andesíticos de tamaño variable entre 20 y 100 cm de diámetro (Figura 3.12).

La secuencia de lavas constituye la última fase de formación del edificio y su potencia estimada es de 700 - 750 metros.

Se encuentra en contacto discordante erosivo sobre la unidad COTACACHI I-SUPERIOR.

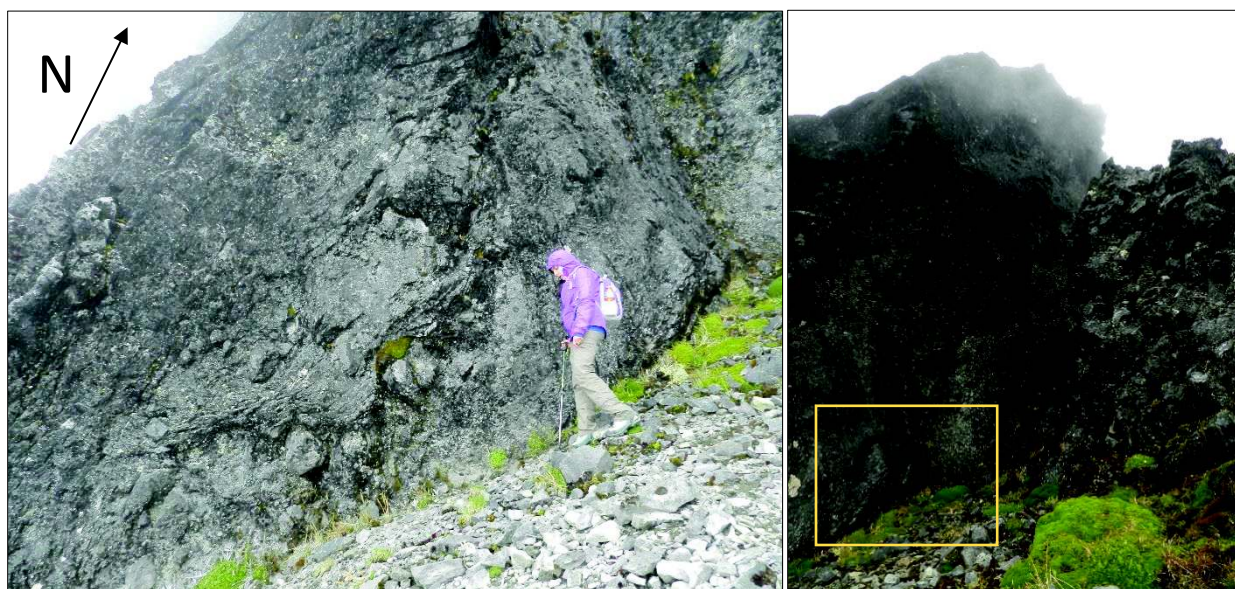


Figura 3.13. Unidad COTACACHI II-VENTO CENTRAL, flujos de lava con xenolitos decimétricos ubicados en el flanco sur del volcán.

3.2.3.2 AVALANCHA DE ESCOMBROS NORORIENTAL

Estos depósitos se encuentran expuestos en las márgenes del río Cari Yacu (COTA 38A; UTM: 808564 / 10041893; Alt: 2160 msnm) y en las márgenes del río Ambi (COTA 17 A-E; UTM: 818828 / 10044079; Alt: 1862 msnm).

La geometría de este depósito está definida por base en contacto discordante erosivo sobre el sustrato, techo erosionado y sub-paralelo. Son brechas matriz soportadas cuyos líticos son generalmente de andesita, andesita con anfíbol y dacita, es posible observar rocas pertenecientes al basamento, tales como: basaltos, andesitas y areniscas finas de color verde oscuro (Figura 3.14, *b*, *c*). En su estructura se observan bloques métricos correspondientes a depósitos anteriores, unos laháricos y otros propios del edificio. No muestra patrones claros de movimiento, sin embargo por su disposición y estructura se lo asocia a un depósito de avalancha de escombros.

En la zona del río Ambi, este depósito se encuentra subyaciendo a la avalancha del volcán Imbabura que se estima ocurrió entre ~ 44 ka y ~ 30 ka (Andrade, 2009; LePenne *et al.*, 2011) y suprayaciendo a la avalancha del complejo volcánico Chachimiro, fase Huanguillaro (Unidad Huangarillo: ~ 405 ka y ~ 298 ka) (CELEC – SYR, 2012. “no publicado”) que se estima ocurrió entre 250 ka y 150 ka (B, Bernard. com. Pers.)(Figura 3.14, *a*).

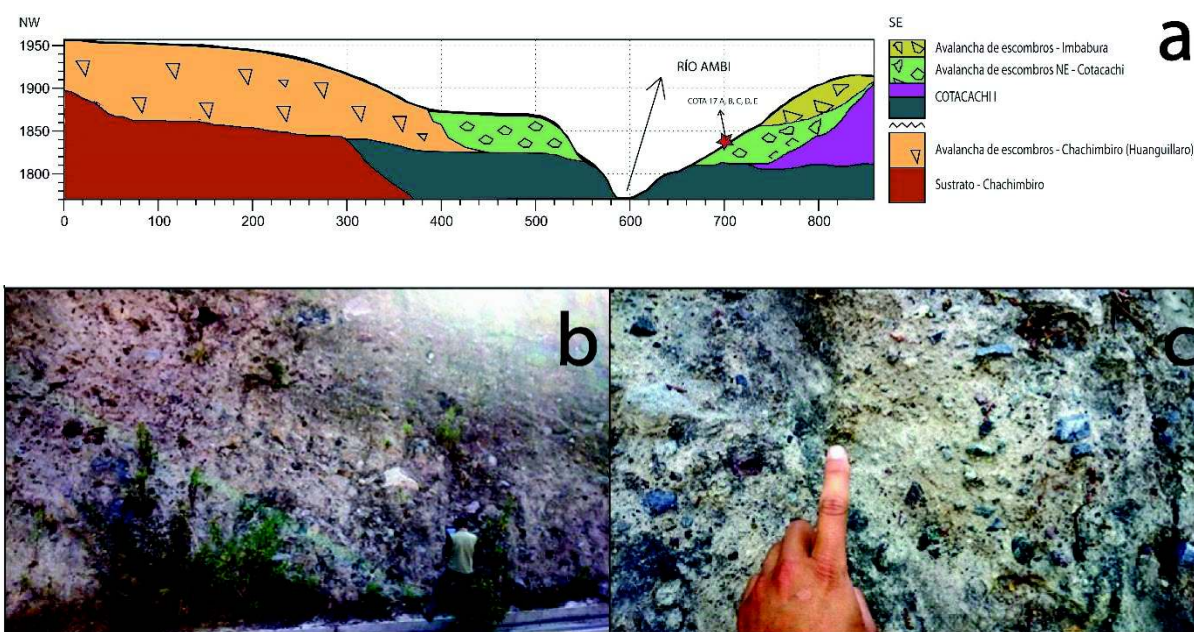


Figura 3.14. *Avalancha de Escombros NORIENTAL, a) Perfil geológico NW – SE en el sector del río Ambi (COTA 17 A, B, C, D, E) b) Afloramiento de la avalancha NE; c) Acercamiento a los constituyentes de la avalancha, nótese los líticos verdes correspondientes al basamento de la Cordillera Occidental.*

3.2.3.3 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS Y LAHÁRICOS DEL COTACACHI II – VENTO CENTRAL.

Los productos piroclásticos del volcán Cotacachi pueden ser encontrados principalmente en su flanco oriental, debido a que en sus flancos norte y suroriente se encuentran cubiertos por material volcánico de las fases eruptivas recientes del Complejo Volcánico Chachimbiro y del Cuicocha respectivamente. La actividad de Cotacachi desencadenó fenómenos volcánicos asociados tales como: flujos piroclásticos de tipo “flujo de ceniza y pómez” (Figura 3.15), lahares (COTA 25; UTM: 807153 / 10040497; Alt: 2261 msnm) y depósitos de caídas piroclásticas, asociados a diferentes periodos eruptivos que se encuentran intercalados o separados por capas de suelos volcánicos re-trabajados.



Figura 3.15. *Flujo piroclástico del volcán Cotacachi, observado en la vía de segundo orden que comunica directamente las poblaciones de Cotacachi e Imantag.*

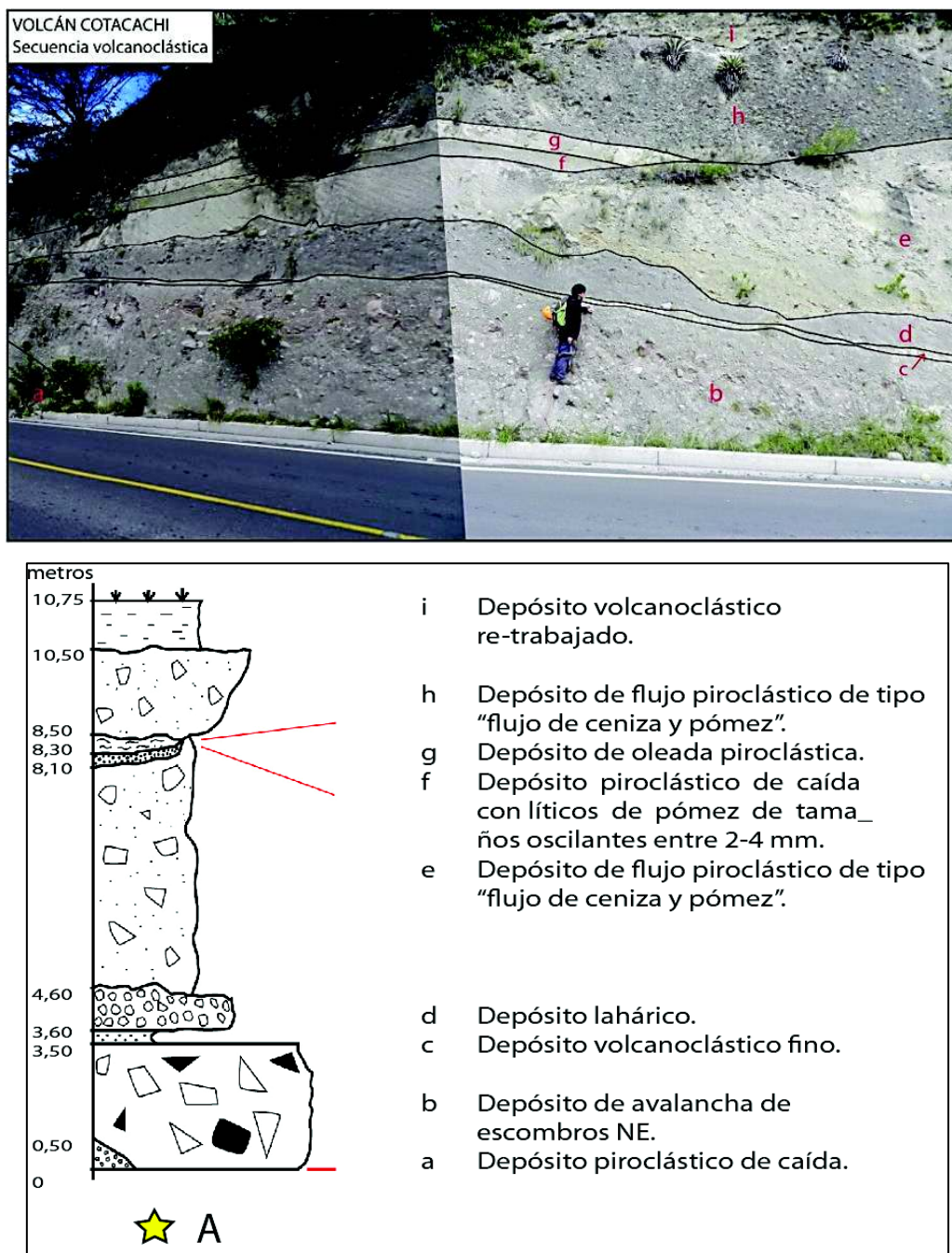


Figura 3.16. Columna lito-estratigráfica (Cota 42, A; UTM: 807572 / 10039309; Alt: 2289 msnm). Depósitos correspondientes a la Subunidad COTACACHI, vía desde Atuntaqui hacia Imantag a 1km después de cruzar el Río Ambi.

La geometría de los depósitos de caída del volcán Cotacachi está representada por base y techo sub-paralelos, litológicamente están constituidos por pómez y ceniza volcánica de composición intermedia, la estructura del depósito presenta un buen sorteo con

gradación normal, el tamaño de sus líticos es variable con un diámetro máximo de 3 cm (Figura 3.16).

Los depósitos de flujos piroclástico son de tipo “flujo de ceniza y pómez”, su techo está erosionado. Sus líticos son bloques de andesita con escasos fenocristales de plagioclasa y de tamaños variables entre 10 cm y 1 m de diámetro.

El depósito lahárico se observa como una brecha matriz soportada, compacta, que incorporó mayoritariamente líticos de andesita de color negro con escasos fenocristales de plagioclasa.

La avalancha de escombros se observa como una brecha volcánica matriz soportada, cuyos líticos son de andesita y unos pocos del basamento (p.e., areniscas de color verde y basaltos verdosos), su matriz está formada por un material muy fino de color amarillento y muy compacto. Se observa como una cuña en el sitio del corte estratigráfico, constituyendo el límite lateral (margen derecho) del depósito observado en el río Ambi.

3.2.3.4 COTACACHI II – DOMOS

Corresponde a los domos MUYURCU, LOMA NEGRA, PIRIBUELA y CUICOCHA, que se encuentran en las periferias del edificio principal. En la cumbre del volcán se encuentran varias coladas de lava superpuestas que forman una cúpula a la que llamaremos domo CUMBRE. La estratigrafía, la geoquímica y la morfología, sugieren que estos domos se encuentran cortando y sobreyaciendo a la unidad COTACACHI I. La distribución espacial de los domos podría estar controlada por la tectónica local.

3.2.3.4.1 Domos Muyurcu

Se encuentran ubicados en las zonas bajas del flanco suroccidental del volcán, se los puede observar en la vía que conduce desde Quiroga hacia la comunidad de Apuela. Son varios domos agrupados que ocupan un área aproximada de 2,35 km² y cuya altura máxima es de 3502 msnm correspondiente a la LOMA DE LA VIRGEN (Figura 3.17).

Bloques de lava asociados (COTA 07; UTM: 789899 / 10036269; Alt: 3389 msnm) a la formación de estos cuerpos corresponden a rocas andesíticas ácidas de color gris claro, vesiculadas y de textura porfirítica. Sus fenocristales (~ 55 %) principales en muestra de mano son plagioclasa, piroxeno y anfíbol.

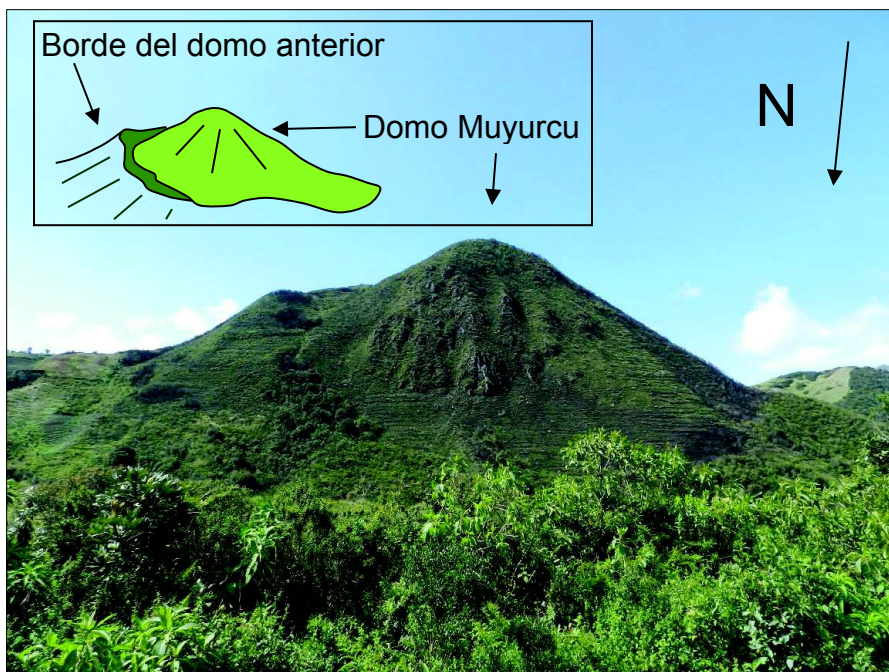


Figura 3.17. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa la Loma La Virgen, misma que corresponde a uno de los domos de MUYURCU (Tipo “emboilé”: crecimiento de un domo dentro del escarpe de colapso de un domo más antiguo).

Se encuentran sobreyaciendo las rocas de la unidad COTACACHI I y hacia el occidente están limitados por los conglomerados de la FORMACIÓN SILANTE.

3.2.3.4.2 *Domo Loma Negra*

Se encuentra ubicado en el flanco suroriental del volcán Cotacachi, se lo puede observar desde la población de Imantag. Sus afloramientos son escasos y se encuentran cubiertos por capas de suelo recientes (Figura 3.18) lo que limita notablemente su estudio. Ocupa un área aproximada de 1,7 km² y su altura es de 3055 msnm. Socavando una secuencia de brechas volcánicas matriz soportadas compactadas de 1 metro de espesor, se puede observar una lava (COTA 43; UTM: 802190 / 10038783; Alt: 3066 msnm) de color blanco y textura porfirítica, con cristales de anfíbol, plagioclasa y escaso piroxeno. }

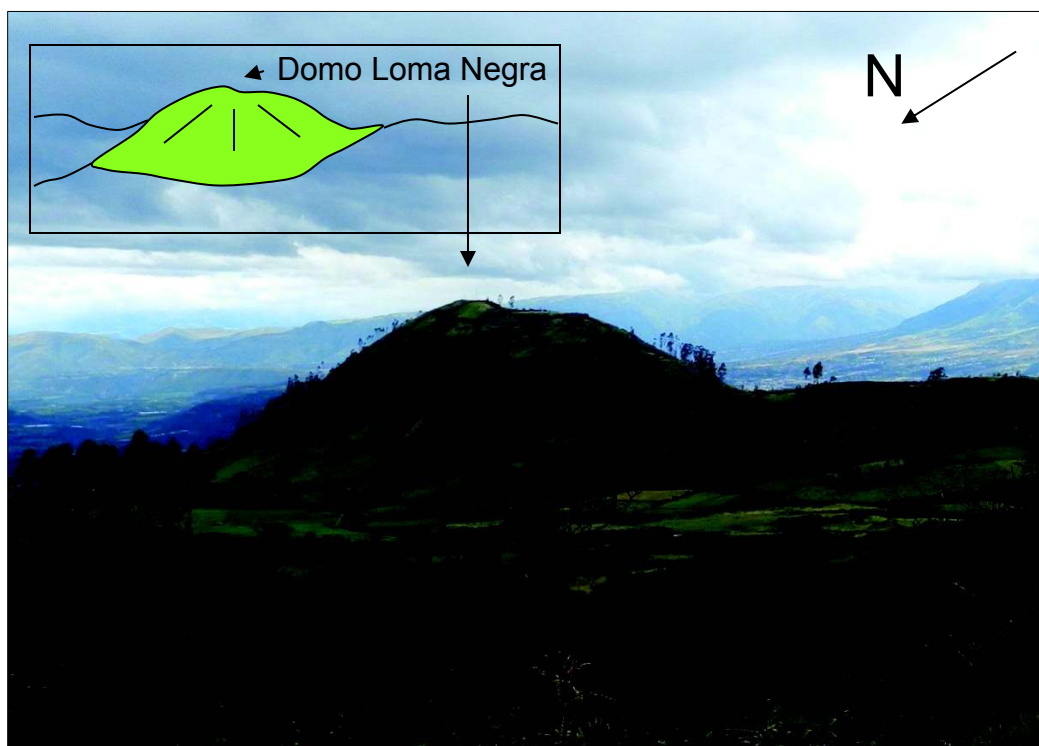


Figura 3.18. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa el domo LOMA NEGRA, este se encuentra totalmente cubierto por vegetación y gran cantidad de suelos y depósitos volcánicos recientes.

Depósitos de flujo piroclástico de tipo “Block and Ash Flow” pueden ser apreciados en el flanco nororiental del domo y estos están constituidos por andesitas porfíricas; sus fenocristales son plagioclasa, piroxeno y anfíbol (Hillebrandt, 1989). Su morfología sugiere que se encuentra sobreyaciendo a la unidad COTACACHI I.

3.2.3.4.3 *Domos Piribuela*

Son dos domos posicionados en sentido N-S que se encuentran ubicados en el flanco nororiental del volcán ocupando un área aproximada de 3,8 km² y su altura máxima es de 3871 msnm, se accede por el poblado de Imantag en la vía que conduce al Bosque de Peribuela (Figura 3.19).

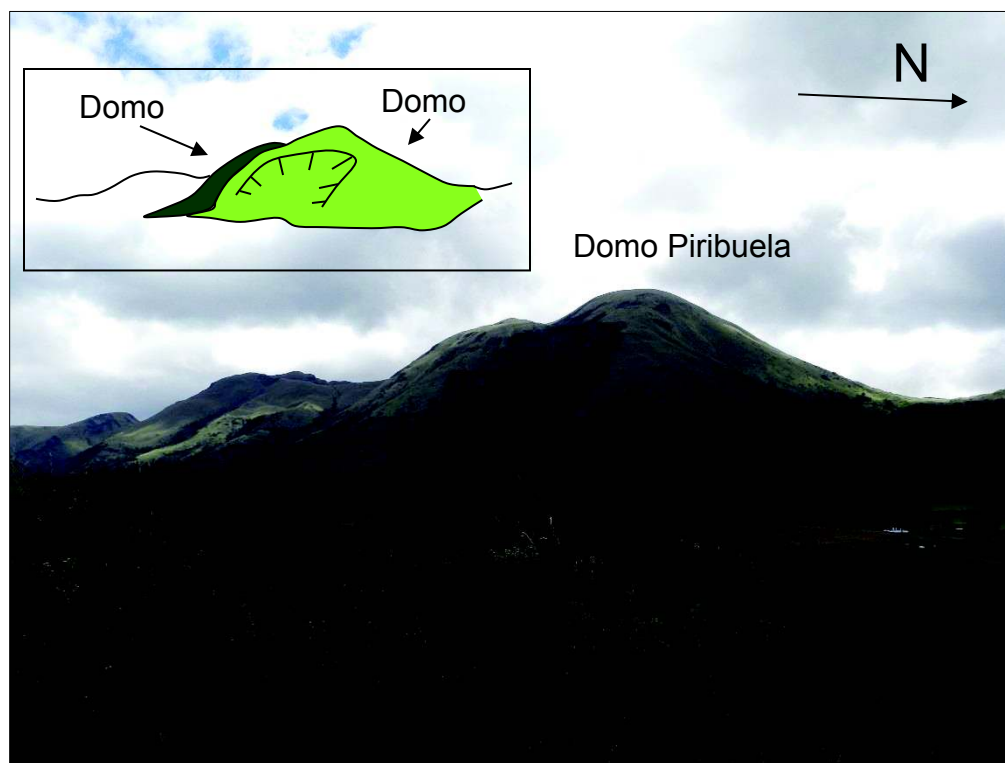


Figura 3.19. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observa el domo PIRIBUELA y su gran escarpe de colapso ubicado en su flanco suroriental.

Están formados por lavas dacíticas de textura porfírica, sus fenocristales son plagioclasa, anfíbol y cantidades mínimas de piroxeno y biotita (COTA 23; UTM: 800194 / 10042437; Alt: 3146 msnm). Depósitos de tipo “Block and Ash Flow” asociados al crecimiento de estos domos se los encuentra en el flanco suroriental y ocupan áreas extensas donde se asientan las comunidades de Pucalpa y Peribuela, que podrían además estar asociados a un pronunciado escarpe en su flanco SE

Los domos Piribuela se encuentran sobreyaciendo la unidad COTACACHI I, sus depósitos “Block and Ash Flow” son suprayacentes a los depósitos volcánicos, volcano-clásticos y volcano-sedimentarios del Cotacachi.

3.2.3.4.4 *Lavas de Cumbre*

Esta estructura es claramente visible en la cumbre del volcán Cotacachi a una altura aproximada de 4640 msnm, cubre un área aproximada de 0,6 km² y constituye probablemente una de las fases eruptivas más recientes del Cotacachi. La morfología

sugiere que el emplazamiento de esta lava estuvo controlada por la tectónica local, cuya evidencia es un corte vertical en su flanco oriental (Figura 3.2), esta falla forma parte del sistema de fallas NE-SW, Billecocha – Huayrapungo.

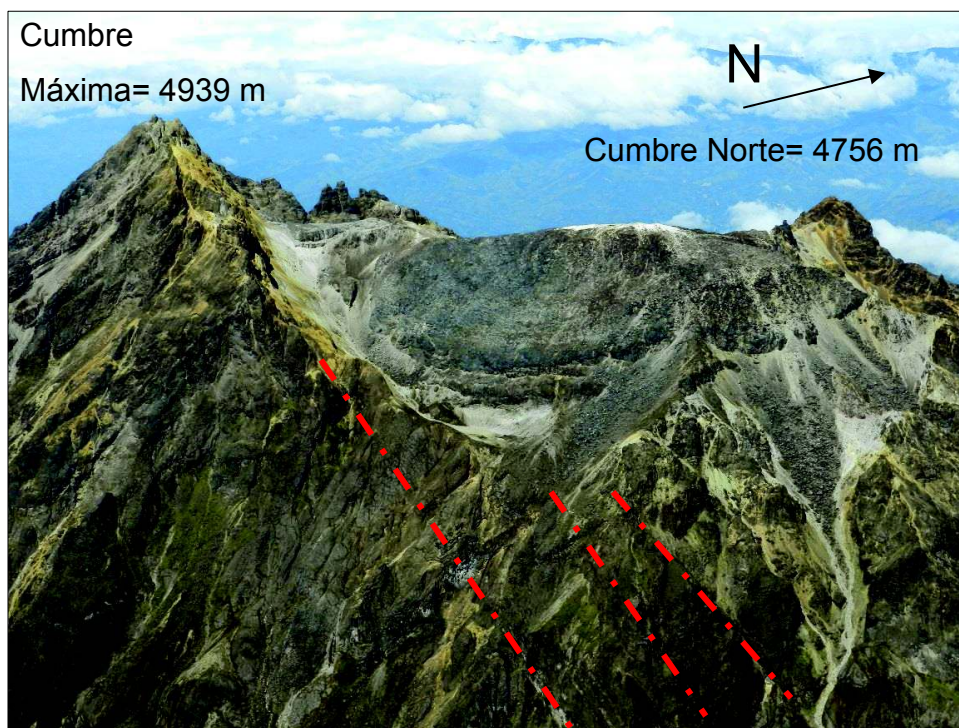


Figura 3.20. Unidad COTACACHI II-DOMOS, en la fotografía se observan los flujos de lava superpuestos en la cumbre del volcán.

Las rocas que comprenden estos lagos de lava, son dacitas (B, Beate, com. Pers.). Se las puede observar como diferentes flujos de lava posicionados uno sobre otro que da origen a una morfología de cúpula con relieve moderado (Figura 3.20).

3.2.4 UNIDAD COTACACHI III - CUICOCHA

Esta unidad comprende varios domos que serán descritos cronológicamente según sus diferentes fases eruptivas.

Los depósitos asociados a este centro volcánico son principalmente volcanoclásticos de composición dacítica, tales como: corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos de tipo “flujo de pómez”, “flujo de ceniza y pómez” y surges), depósitos de caída y sus respectivos re-trabajados. Estos depósitos evidencian su actividad volcánica de carácter

explosivo. Los rasgos morfológicos representativos son: la “caldera y/o cráter” donde se encuentra la laguna de Cuicocha, las paredes nororientales de esta laguna muestran vestigios de un domo volcánico pre-caldera que se puede observar desde el Cantón Cotacachi como un pico posicionado en las faldas suroccidentales del volcán (Figura 3.22). Al interior de la laguna se ubican una serie de domos post-caldera conocidos como Yerovi y Wolf (Figura 3.21); en la morfología no se distinguen domos resurgentes que son formados como consecuencia del flexionamiento del techo en la parte central de una cámara por ingreso de nuevo magma. (Cole *et al.*, 2015).

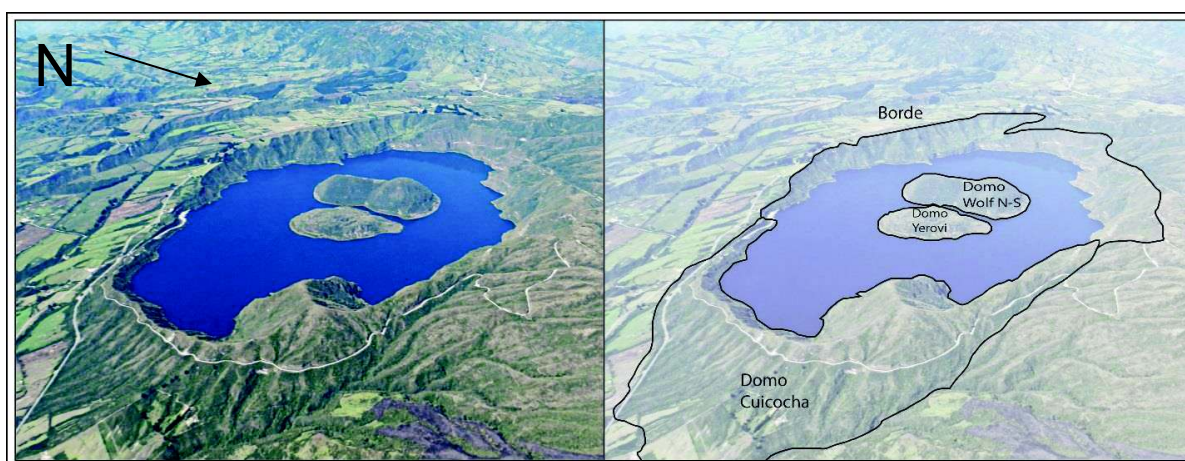


Figura 3.21. Unidad CUICOCHA, ilustración de la ubicación de los domos relacionados a su evolución.

3.2.4.1 DOMOS PRE - CALDERA

Se formó en una fase previa al evento explosivo que destruyó su morfología original.

3.2.4.1.1 Domo Cuicocha

Este domo se encuentra ubicado en el flanco suroccidental del volcán y constituye gran parte del borde oriental de la laguna de Cuicocha, su altura es de 3377 msnm y se encontraba formado antes del evento explosivo que formó la “caldera y/o cráter”. Posterior a esto, en la morfología solo se pueden observar sus remanentes (Figura 3.22). La roca (< 40 ka; Hillebrandt, 1989) es una andesita rica en anfíbol (Hillebrandt, 1989) (CUI 19 - Monzier M; UTM: 795385 / 10032790; Alt: 3068 msnm).

Sus depósitos anteriores a la explosión que formó la caldera, esencialmente son flujos de tipo “block and ash” y se extienden hasta la comunidad de Quiroga y el Cantón Cotacachi.

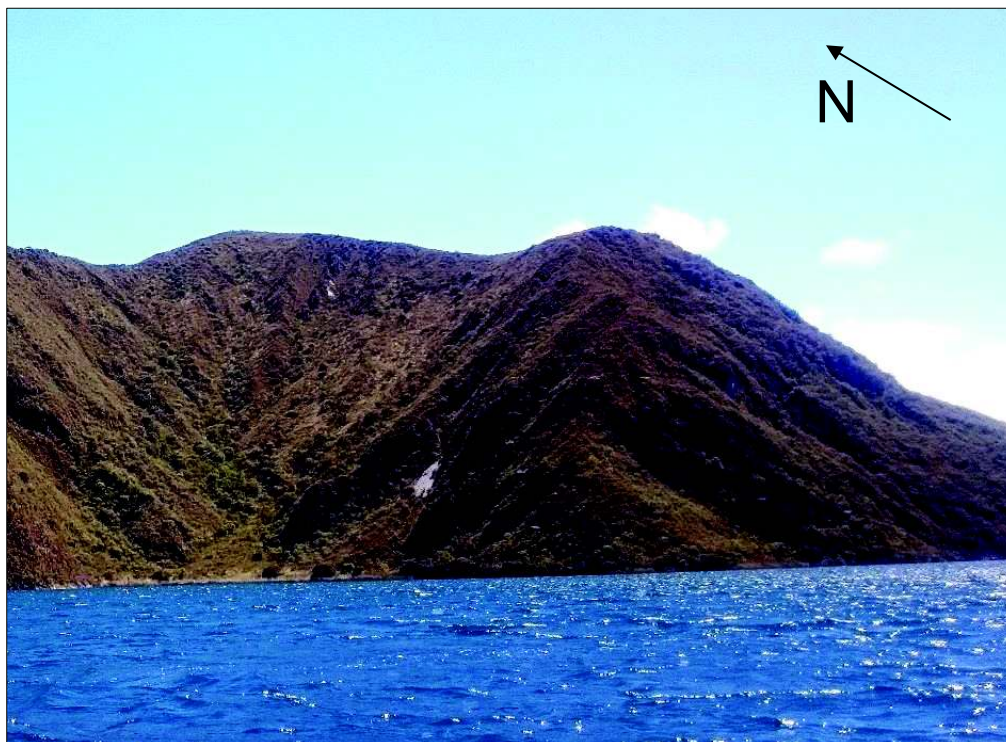


Figura 3.22. *Unidad CUICOCHA, domo Cuicocha ubicado al NE de la laguna.*

3.2.4.2 DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS: COTACACHI III – CUICOCHA.

Se los encuentra bien expuestos en los cortes de la vía Cuicocha - Tablachupa en dirección al poblado de Apuela.

En la base se observan brechas matriz soportadas, con importante contenido de líticos andesíticos y dacíticos, las andesitas son de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, las dacitas poseen textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.

Se podría interpretar que las brechas de base en este depósito, posiblemente representarían la ruptura del domo Cuicocha y parte de las rocas del flanco sur del volcán

Cotacachi (p.e., COTACACHI I – SUPERIOR), durante el inicio de la fase explosiva con la cual se forma la caldera.

Sobreyaciendo a las brechas de base, se observan depósitos de flujos piroclásticos de tipo “flujo de ceniza y pómez”, depósitos de caída de ceniza, flujos de pómez y oleadas piroclásticas (surge).

Los flujos de ceniza y pómez son muy potentes, aproximadamente 18 metros en zonas proximales y reflejan la intensa actividad eruptiva de carácter explosivo que estuvo asociada a la formación de la caldera (Figura 3.23).

Pidgen, (2014) con base en su estudio granulométrico y la descripción de los depósitos, reconoce tres unidades, similares a las descritas en este trabajo, excepto las brechas con líticos de dacita, que son la base en la secuencia volcanoclástica de esta unidad:

Unidad 1: Está representada por un depósito volcánico-clástico masivo, no estratificado y muy potente, lo interpreta como varios flujos piroclásticos no turbulentos cuyos límites entre sí, son pequeñas capas de material volcánico fino; todos estos flujos forman un depósito muy potente que forma parte de una misma unidad.

Unidad 2: Depósito de oleada piroclástica que se muestra con estratificación cruzada, se lo puede asociar que el fenómeno volcánico que lo depositó fue muy energético, turbulento y con bajas concentraciones de material.

Unidad 3: Depósito que contiene alto porcentaje de material fino, mostrando estratificación interna, el evento que lo depositó fue descrito como un surge de baja energía.

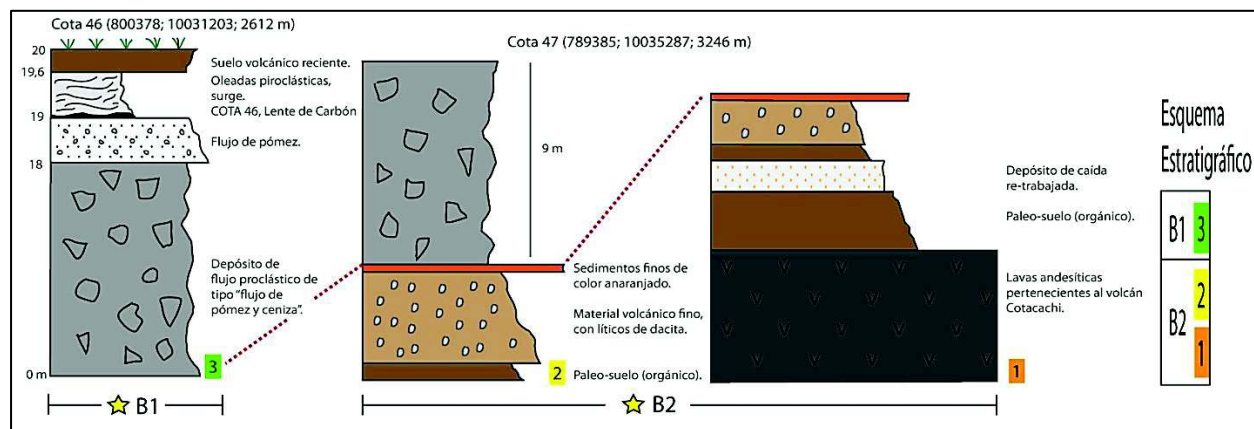


Figura 3.23. Columna lito-estratigráfica, relaciona los depósitos encontrados en una cantera en la población de Quiroga (Cota 46, B1) y los encontrados en la vía que conduce desde la Laguna Cuicocha hacia Apuela (Cota 47, B2).

3.2.4.3 DOMOS POST - CALDERA

Los domos Wolf y Yerovi son formados por la salida de magma dacítico, durante erupciones esencialmente efusivas, ocurridas luego del período de formación de la caldera de Cuicocha (Cole *et al.*, 2015).

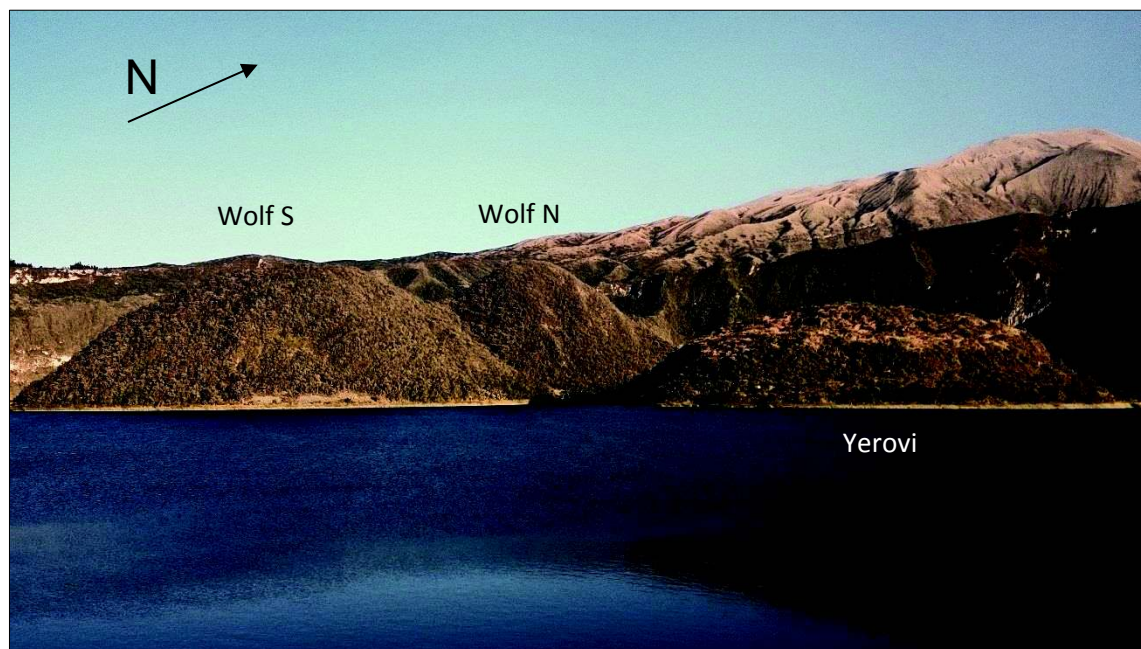


Figura 3.24. Unidad CUICOCHA, se observa los dos islotes correspondientes a los domos Wolf N-S (izquierda) y Yerovi (derecha); ubicados en el centro de la laguna.

3.2.4.3.1 *Domos Wolf Norte y Sur*

Los domos Wolf norte (3247 msnm) y sur (3202 msnm) (Figura 3.24) se encuentran ubicados en el centro de la laguna de Cuicocha, están formados por bloques de lava métricos de dacita (CUI 32 - Monzier M; UTM: 793529 / 10034356; Alt: 3056 msnm).

Su área aproximada en superficie es de 0,44 km².

3.2.4.3.2 *Domos Yerovi*

El domo Yerovi (3062 msnm) está ubicado en sentido N-S junto a los domos Wolf y es de menor tamaño. Está formado de dacítas, similares a Wolf N y S (CUI 33 - Monzier M; UTM: 794102 / 10034054; Alt: 3096 msnm) (Figura 3.24).

Ocupa un área en la superficie de la laguna de 0,27 km².

3.2.4.4 **MODELO PROPUESTO PARA LA EVOLUCIÓN DE LA CALDERA**

Según Pidgen (2014), 4 fases eruptivas caracterizan la formación de la caldera de Cuicocha (Figura 3.25):

- 1) Una explosión inicial (~ 3,1 ka) que destruyó el domo Cuicocha, expulsando grandes volúmenes de material volcánico depositado por corrientes de densidad piroclástica, dominada por flujos. En esta primera etapa se formó la caldera.
- 2) Hubo un período de calma en la actividad. Luego de la calma, la actividad es de carácter efusivo y comienza el crecimiento de un “pequeño domo” (~ 2,9 ka), en una caldera parcialmente llena con agua.
- 3) Se genera una nueva actividad explosiva que destruye el “pequeño domo”, dominan las explosiones de tipo freato-magmático, una de las evidencias es el lapilli acrecionario en los depósitos de caída (Barbieri *et al*, 1989 en Pidgen, 2014), Hillebrandt, (1989) discute que el origen del lapilli acrecionario no necesariamente estaría ligado a actividad freato-magmática. Los fenómenos volcánicos más comunes asociados a esta etapa, fueron las oleadas piroclásticas.
- 4) En la etapa final, crecieron los domos actuales Wolf y Yerovi.

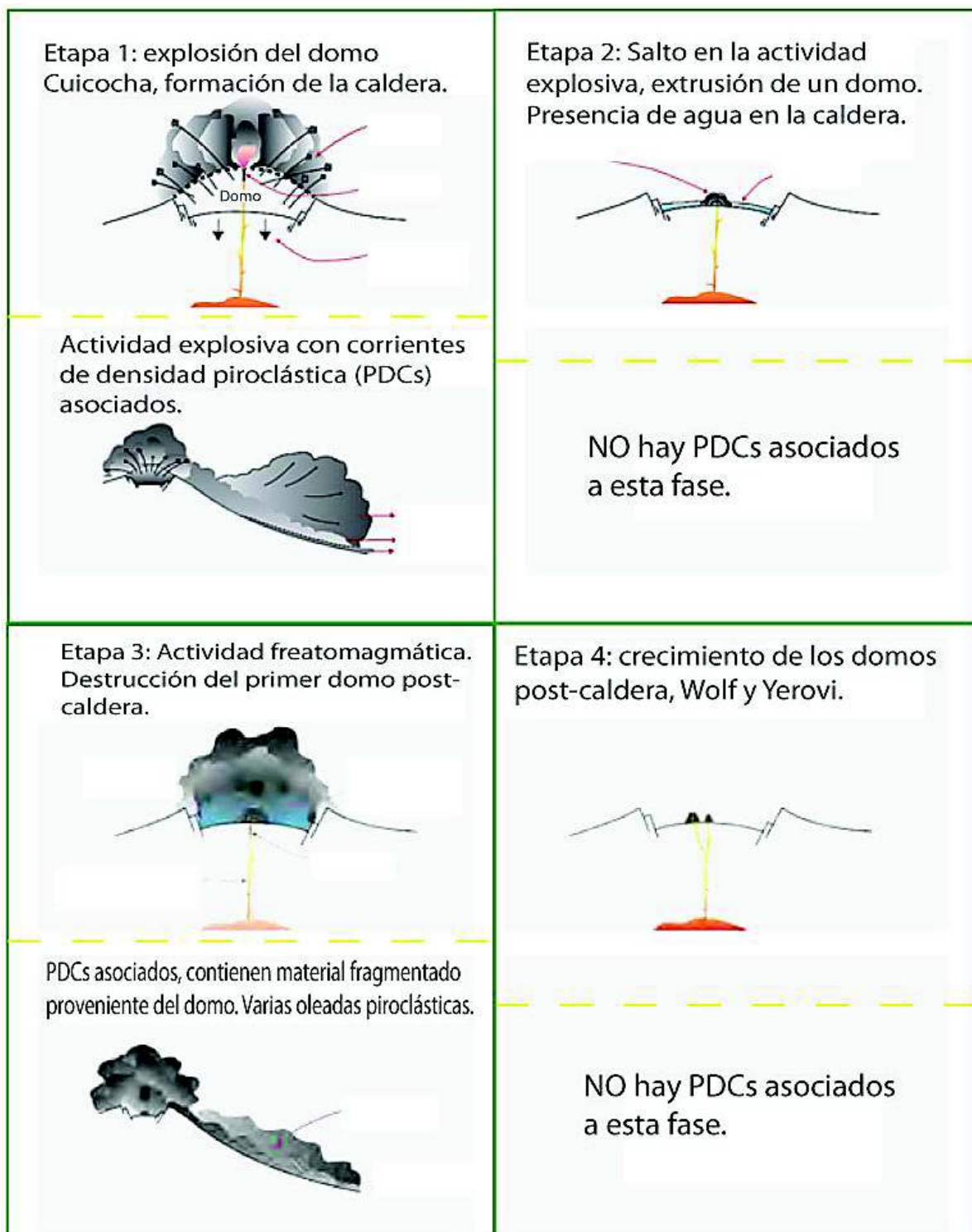


Figura 3.25. Evolución propuesta para la unidad COTACACHI III - CUICOCHA (Modificado de Pidgen, 2014).

CAPÍTULO 4

4 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DEL VOLCÁN COTACACHI

Para el presente capítulo se utilizaron 43 muestras de roca en lámina delgada: COTACACHI I= 14, COTACACHI II= 8, CUICOCHA= 14 rocas y 4 depósitos volcanoclásticos representativos, AVALANCHA NE= 5, CHACHIMBIRO= 3, IMBABURA= 1; estas fueron realizadas en el Laboratorio de Magmas & Volcanes de Clermont-Ferrand en Francia con excepción de algunos análisis del basamento que fueron obtenidos de la base del Laboratorio del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM) y de la tabla de datos geoquímicos del trabajo de Kerr *et al.*, 2002. (Figura 4.1). 23 nuevos análisis de geoquímica de roca total para elementos mayores y trazas fueron realizados en la Universidad de Bretaña Occidental – Francia con el método ICP-MS (Espectrometría de masas, con fuente de plasma de acoplamiento inductivo), excepto para Rubidio (Rb), para el que se utilizó la técnica de espectrometría de absorción.

El protocolo analítico se detalla en Cotten *et al.*, (1995). En el Instituto Geofísico (IG), las rocas fueron previamente trituradas en un mortero y pulverizadas en un molino de ágata: COTACACHI - CUICOCHA= 78, CHACHIMBIRO= 49, BASAMENTO (Unidad Arco Río Cala, Unidad Pallatanga, Unidad Macuchi)= 10. Estos análisis se realizaron en el marco del Laboratorio Conjunto Internacional (LMI).

Adicionalmente se utilizó 33 análisis y 20 láminas delgadas pertenecientes a la base de datos IG-IRD (Samaniego, Monzier, Bernard, von Hillebrandt), 3 análisis del basamento obtenidos de Kerr *et al.*, (2002) y 1 análisis del basamento de la base del INIGEMM. (Ver Tabla 01: Resumen de las descripciones petrográficas realizadas en este estudio, Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha)(Ver Tabla 02: Datos Geoquímicos de roca total para elementos Mayores y Traza, Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha).

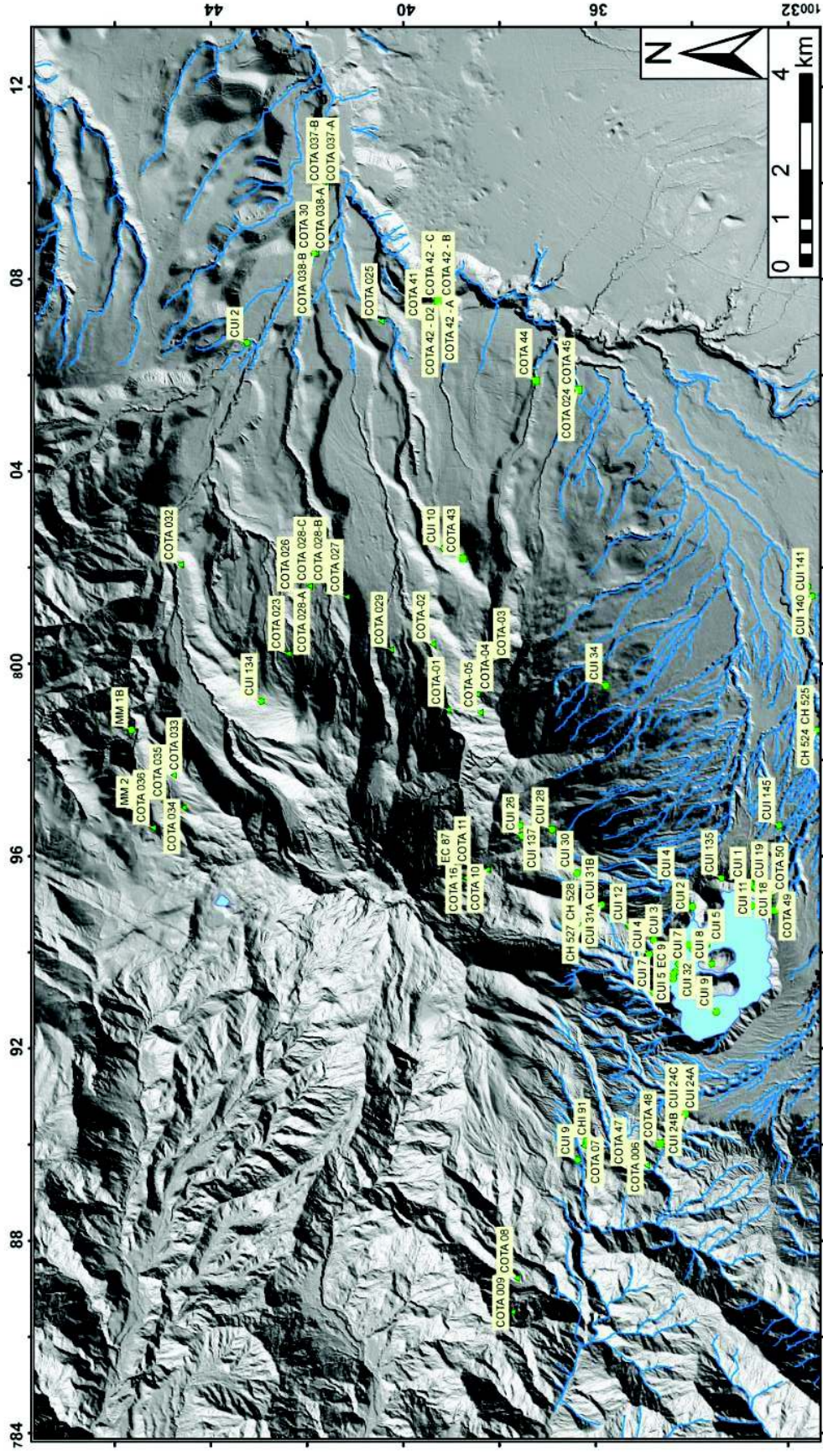


Figura 4.1. Mapa de ubicación de muestras de roca, escala 1:25.000. Muestras tomadas por: M Almeida - D Andrade ▲, M Monzier (†) – P Samaniego ●, von Hillebrandt ■.

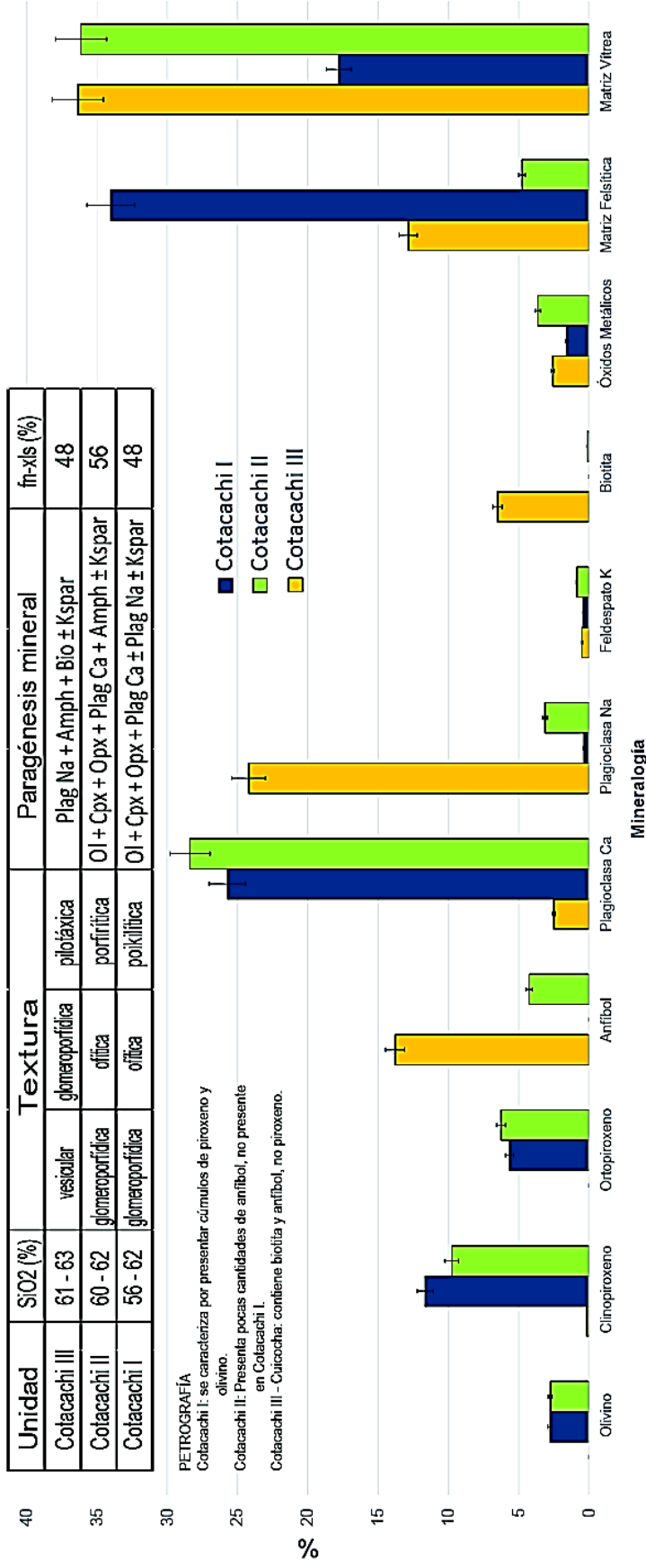


Figura 4.2. Resumen de la petrografía del Volcán Cotacachi y sus paragénesis minerales por unidad.

4.1 ESTUDIO PETROGRÁFICO

Las rocas del Volcán Cotacachi son generalmente masivas de textura porfírica y en algunos casos micro-vesiculadas; pueden variar desde andesitas basálticas hasta dacitas, según sus paragénesis minerales (Figura 4.2).

Son de composición intermedia - básica y están representadas por andesita basálticas y andesitas, con excepción de sus domos que están compuestos por rocas de composición intermedia – ácida representadas por andesitas y dacitas.

4.1.1 COTACACHI I

Estas rocas son andesitas basálticas y andesitas (56 – 62 SiO₂ % wt) correspondientes a flujos de lava masivos de la base del volcán, presentan varias texturas: ofítica (intercrecimiento de plagioclasa entre un cúmulo de piroxenos), subofítica (cristales de plagioclasa envuelven a piroxenos), glomeroporfídica (cúmulos cristalinos) y poikilítica (inclusiones de pequeños cristales en uno de mayor tamaño), siendo muy común observar estos cúmulos de piroxeno, plagioclasa y olivino, incluso en muestra de mano.

El olivino está presente como un remanente de los procesos de cristalización fraccional que han producido coronas de reacción o cristales bien formados de clinopiroxeno a su alrededor. En buena parte de las rocas, el contenido de plagioclasa es dominante, salvo ciertas excepciones donde se muestran mayoritariamente piroxenos con intercrecimiento de plagioclasa. Los fenocristales de plagioclasa individuales presentan maclas con ángulos variables entre ~ 13° y ~ 39°, característicos de composición intermedia (p.e., andesina, oligoclasa).

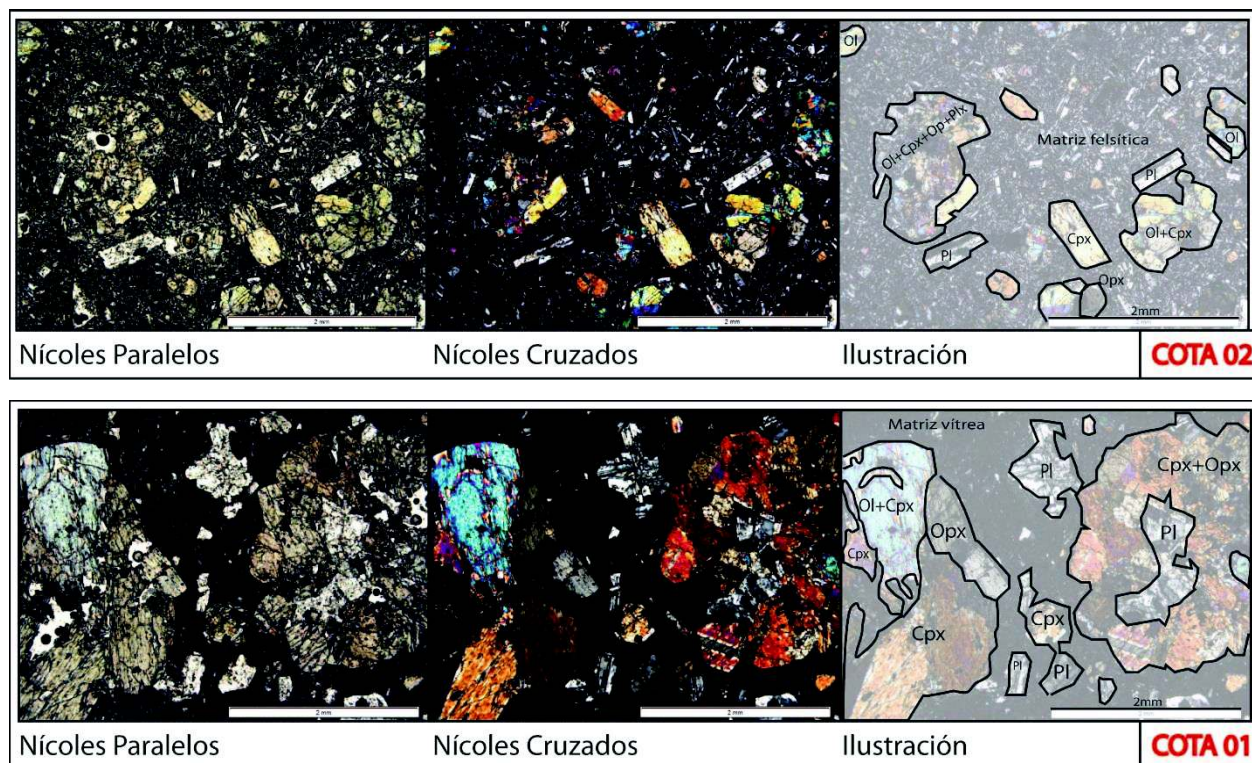


Figura 4.3. COTA 02= Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI I – BASE. COTA 01= Muestra de mano en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI I – SUPERIOR.

El tamaño de los fenocristales varía entre 0,5 y 2 mm y poseen formas subhedrales y euhedrales (Figura 4.3). El tipo de matriz es variable, generalmente es felsítica (matriz constituida por pequeños y abundantes cristales de feldespato y/o cuarzo) y en menor porcentaje vítrea, las rocas: COTA 2, COTA 34 y MM 1B, son rocas ricas en olivino. La paragénesis mineral para esta unidad es: olivino + clinopiroxeno + ortopiroxeno + plagioclasa cálcica (intermedia) \pm plagioclasa sódica \pm feldespato de potasio. (Figura 4.3). Estas rocas no presentan ningún tipo alteración y su contenido de óxidos y sulfuros (metálicos) es mínimo (2 %).

4.1.2 COTACACHI II

Son principalmente andesitas (60 - 62 % SiO_2 wt) correspondientes a flujos de lavas y domos y diques de composición dacítica. Las texturas observadas son: glomeroporfídica, poikilítica y ofítica; se pueden observar cúmulos cristalinos de plagioclasa envolviendo a los cristales de piroxeno.

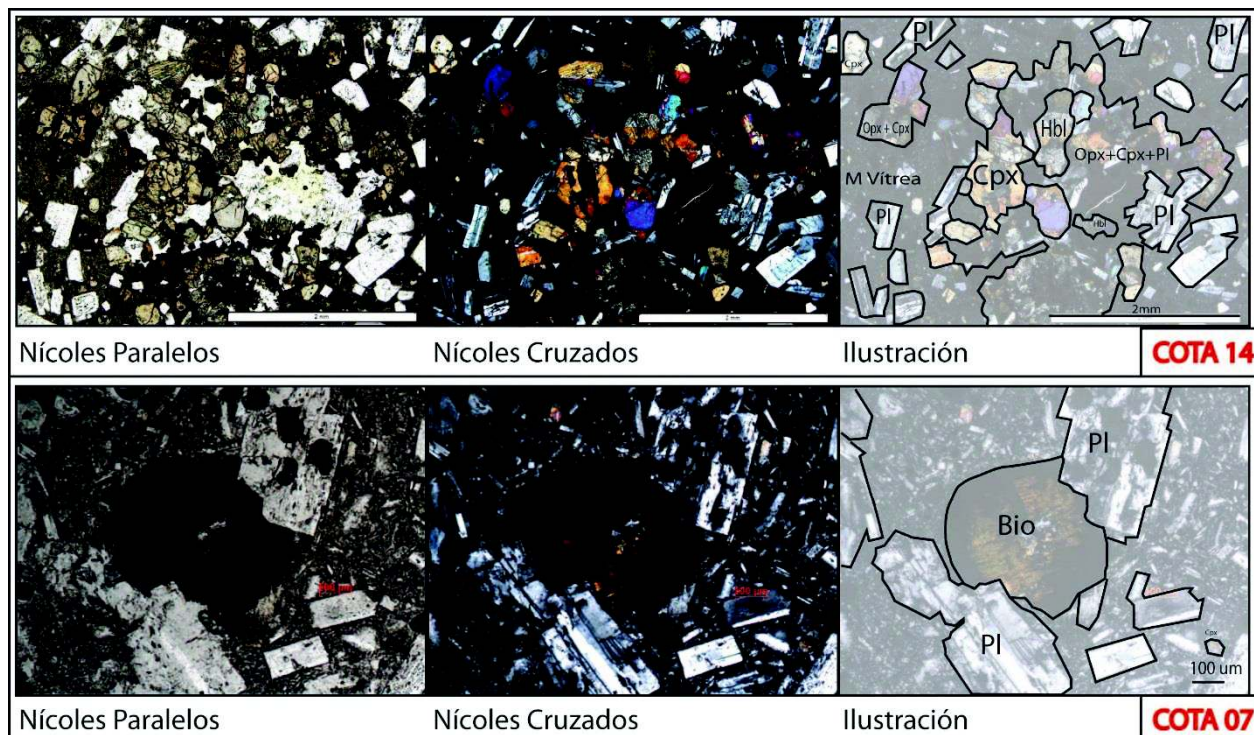


Figura 4.4. Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI II – DOMOS (Satélite flanco S= COTA 14, Muyurcu= COTA 07).

El tamaño de los cristales es variable y oscila entre 1 y 3 mm, siendo mucho más grandes que los fenocristales de COTACACHI I. La forma es principalmente euhedral; las plagioclasas en las rocas de esta unidad se encuentran zonadas composicionalmente variando de plagioclasa intermedia a sódica. Las rocas de los domos satélite COTA 14 y COTA 15 tienen mayor cantidad de anfíbol respecto a los flujos de lava; la muestra COTA 07 corresponde a los domos MUYURCU y excepcionalmente presenta un cristal de biotita que podría ser un xenocristal (Figura 4.4).

La matriz es mayoritariamente vítrea con excepción de los domos que muestran una matriz similar a un agregado feldespático.

La paragénesis mineral es: olivino + clinopiroxeno + ortopiroxeno + anfíbol (hornblenda) + plagioclasa intermedia \pm feldespatos de potasio (Figura 4.5).

Cristales de plagioclasa presentan texturas de tipo “Spongy Core”, misma que no ha sido observada en las rocas de COTACACHI I y III. Nelson y Montana, (1992) sugieren que esta textura es el resultado de algunos cambios en las condiciones físicas del magma en la cámara o el conducto (p.e., descompresión).



Figura 4.5. Muestra de roca en lámina delgada perteneciente a la unidad COTACACHI II – VENTO CENTRAL, COTA 12.

No se observaron alteraciones y el contenido de óxidos y sulfuros es de $\sim 4\%$.

4.1.3 DEPÓSITO DE AVALANCHA DE ESCOMBROS NORORIENTAL: COTACACHI I y COTACACHI II – VENTO CENTRAL

Este depósito está conformado por basaltos, andesitas basálticas y andesitas con texturas: glomeroporfídica, porfirítica, ofítica y subofítica. Su mineralogía consiste de olivino con coronas de reacción de clinopiroxeno, plagioclasa de composición intermedia, piroxeno (Cpx y Opx) y en raras ocasiones se puede encontrar anfíbol en pequeñas cantidades ($\sim 3\%$); el porcentaje de fenocristales es $\sim 40\%$ (Figura 4.6).

No se han observado rocas más ácidas por lo cual podríamos asumir que este evento no afectó a las unidades más jóvenes (p.e., domos y diques), ni a los domos periféricos asociados: Piribuela y Loma Negra.

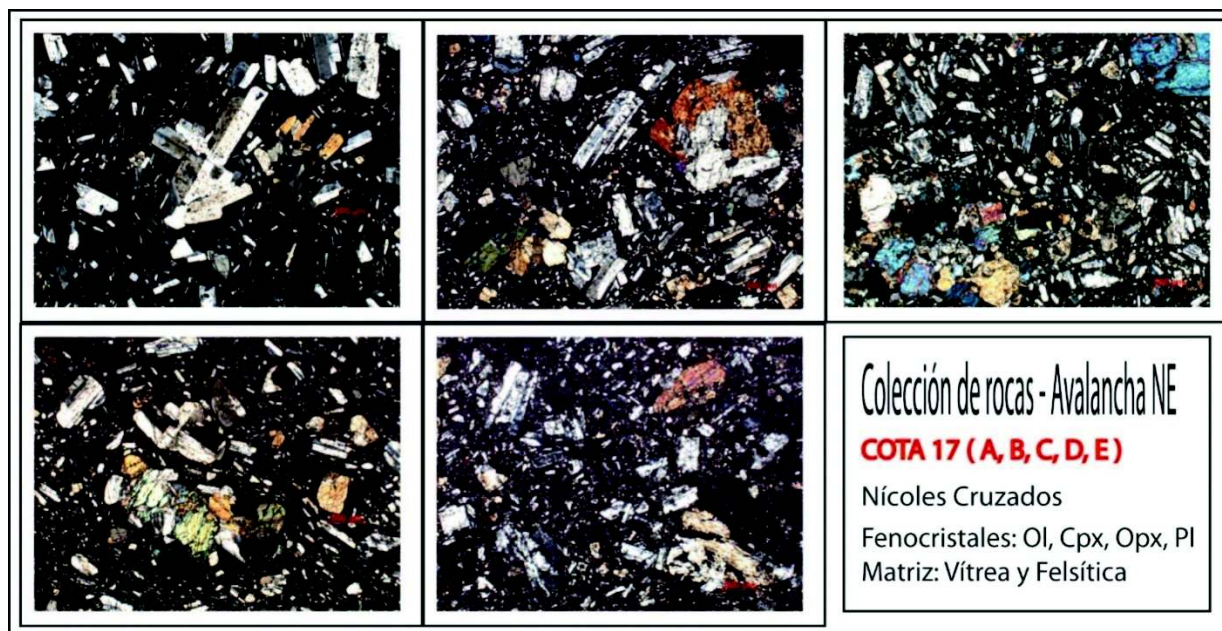


Figura 4.6. Muestras de roca en lámina delgada pertenecientes a la colección de muestras de mano obtenidas en el depósito de avalancha de escombros NE, COTA 17.

4.1.4 COTACACHI III - CUICOCHA

Las muestras en lámina delgada de COTACACHI III - CUICOCHA fueron tomadas de: depósitos piroclásticos y rocas de los domos asociados a su actividad (p.e., Wolf Norte, Wolf Sur y Yerovi). Su composición química va desde andesita a dacita (61 – 63 SiO₂ % wt) con texturas: porfirítica, glomeroporfídica, pilotáxica (textura que presenta orientación de los cristales en una matriz vítrea), epiclástica (volcanoclastos y depósitos volcánicos re-trabajados) y vesicular. La mineralogía de esta unidad es claramente diferente de las rocas de COTACACHI I y II, incluyendo sus rocas más ácidas (p.e., domos Muyurcu, domos satélite del flanco sur y diques).

Sus fenocristales son euhedrales con tamaños variables entre 1 y 2 mm, en las muestras de volcanoclásticos se observan todos estos cristales fracturados pero conservando la mineralogía típica para esta unidad.

La paragénesis mineral para las rocas de Cuicocha es la siguiente: plagioclasa sódica + anfíbol + biotita ± feldespato de potasio; no presentan cristales de clinopiroxeno, ortopiroxeno u olivino. Su matriz es mayoritariamente vítrea y en raras ocasiones cuarzo – feldespática. El porcentaje de fenocristales es de 48 % (ver Figura 4.2) (Figura 4.7).

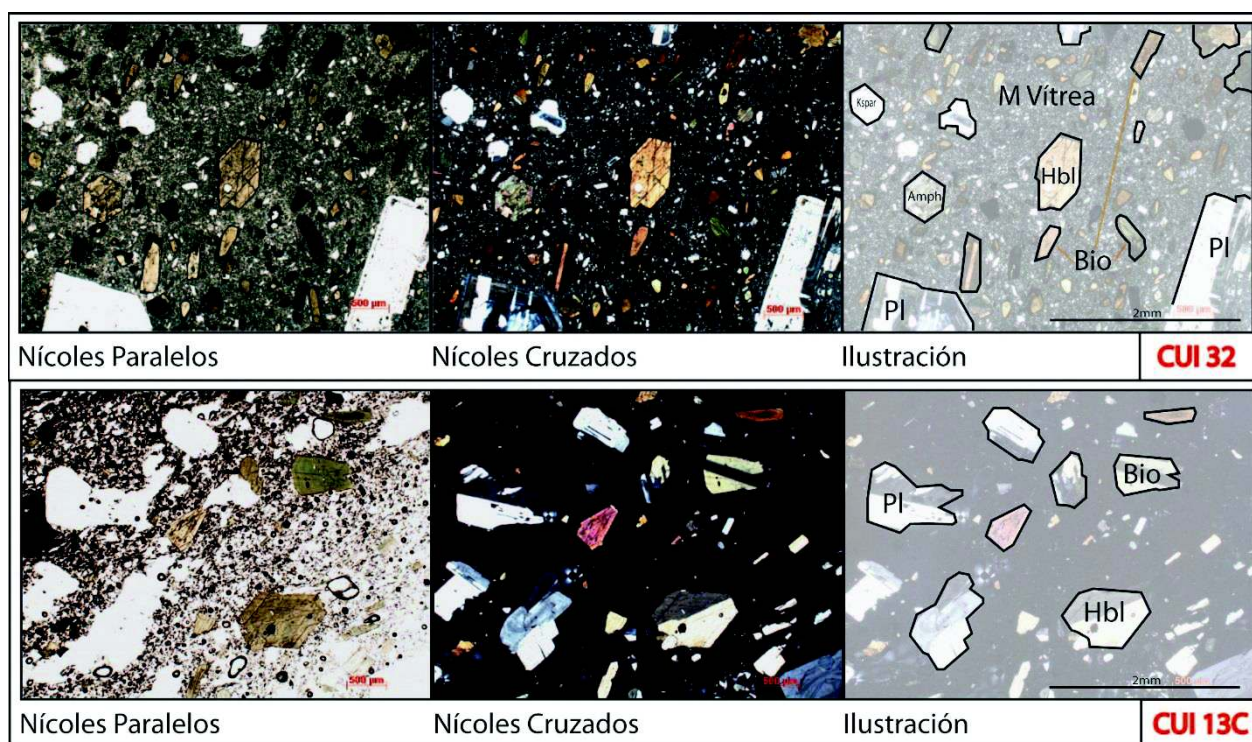


Figura 4.7. Muestra de mano en lámina delgada perteneciente a las rocas (CUI 32- Domo Wolf) y depósitos volcanoclásticos (CUI 13C) de la unidad COTACACHI III - CUICOCHA.

Los cristales de plagioclasa presentan alteración hidrotermal que ha desarrollado minerales del grupo de arcilla en porcentajes mínimos. El contenido de óxidos y sulfuros es de 3 %.

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

La geoquímica de las rocas del volcán Cotacachi tuvo que ser comparada y discriminada previamente, respecto a la geoquímica del Complejo Volcánico Chachimbiro y a las rocas del basamento ígneo de la Cordillera Occidental.

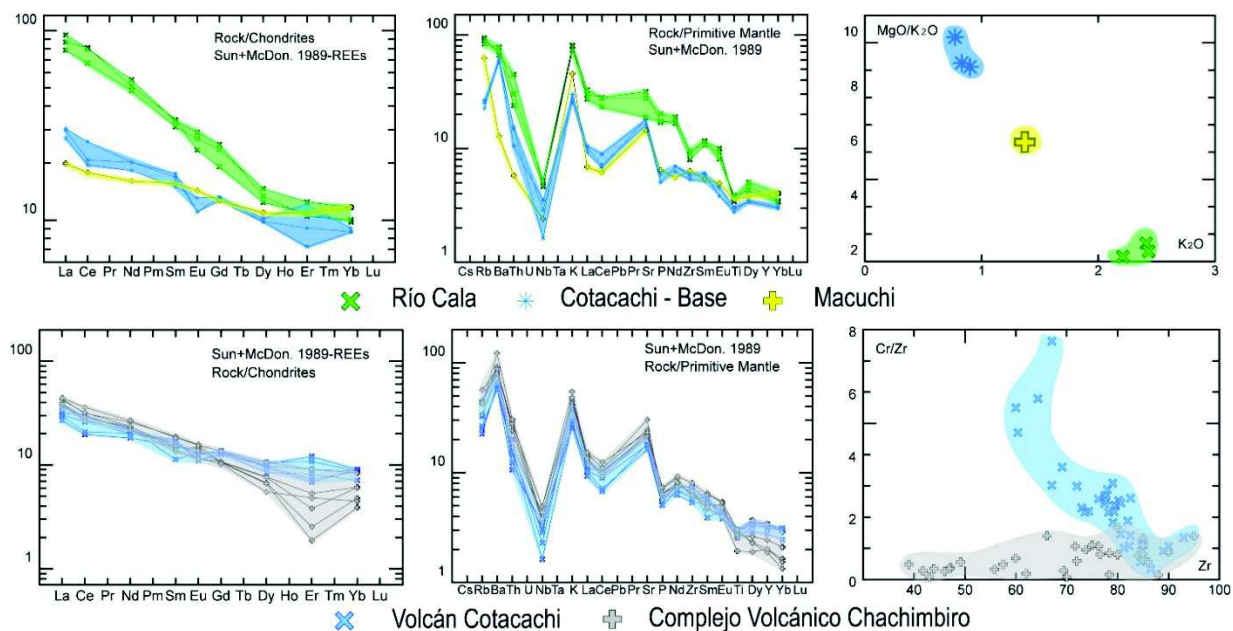


Figura 4.8. Diagramas usados para la discriminación geoquímica de las rocas del Volcán Cotacachi de las rocas del Complejo Volcánico Chachimbiro y el Basamento Ígneo de la Cordillera Occidental (Unidad Arco Río Cala).

El motivo de esta discriminación está fundamentado en dos puntos de interés (Figura 4.8): 1) Respecto a Chachimbiro los límites lito-estratigráficos de las unidades volcánicas mayores no están bien definidos, por tanto sus depósitos de avalancha de escombros son difíciles de distinguir en el campo. Gracias a las relaciones entre varios elementos en traza se logró identificar claramente los depósitos originados en el Cotacachi y los provenientes de Chachimbiro logrando corroborar las relaciones estratigráficas propuestas en este trabajo. 2) Las rocas más básicas de la unidad COTACACHI I – BASE, fueron discriminadas de las rocas volcánicas Cretácicas de arco de isla (Unidad Arco Río Cala) pertenecientes al basamento, cuya afinidad calco-alcalina corresponde a la de un arco de islas maduro (Chiaradia, 2009).

Para la interpretación de los resultados, los datos fueron normalizados a una base anhidra, es decir se descartó el LOI (loss on ignition = pérdida al fuego) y se consideró que el 100% corresponde al porcentaje en peso (wt%) total de óxidos mayores. Para los elementos en traza se utilizó directamente las concentraciones obtenidas en ppm (partes por millón).

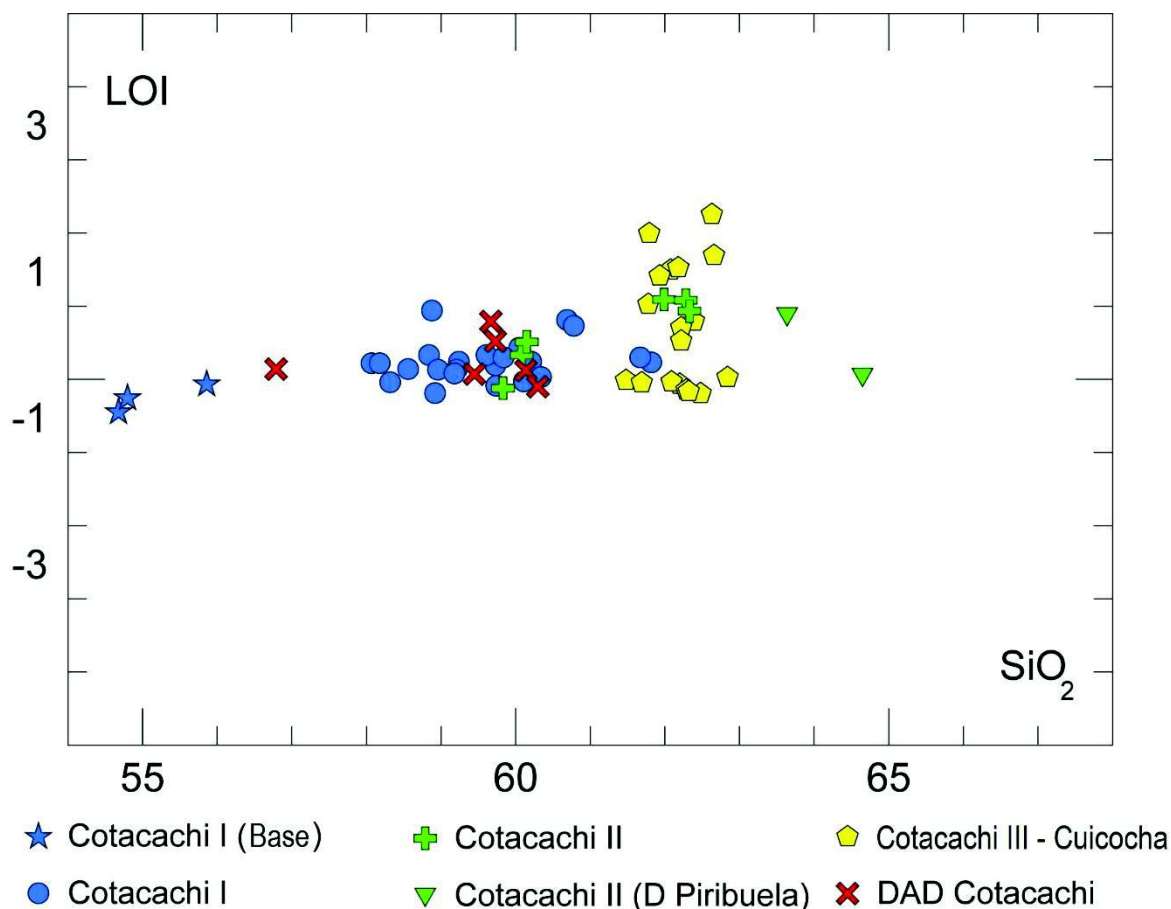


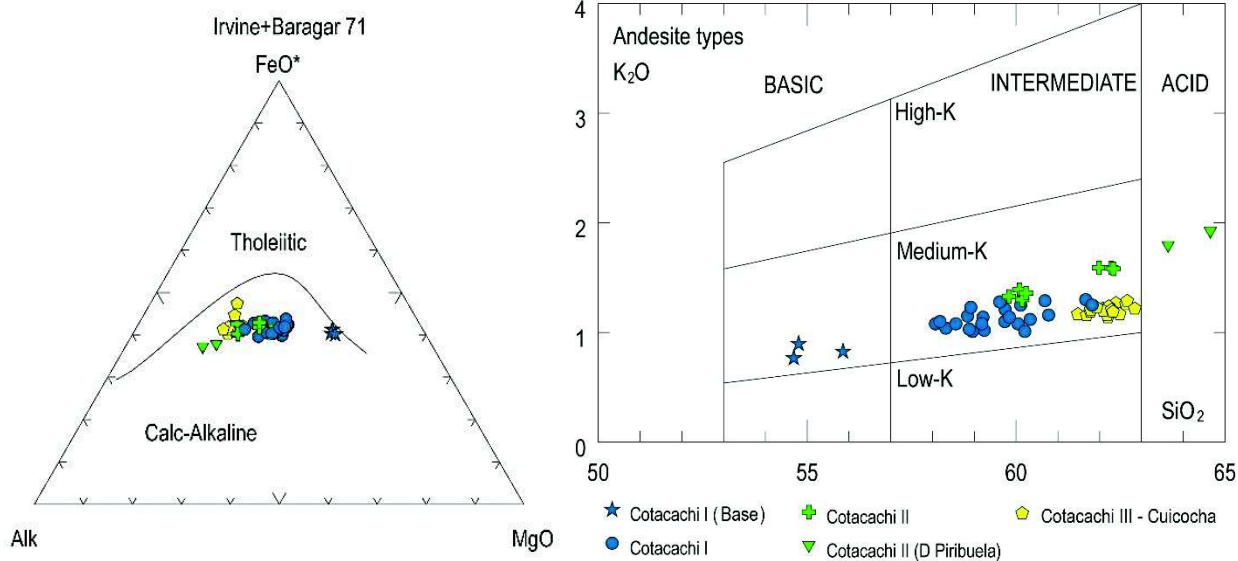
Figura 4.9. Diagrama LOI vs. SiO₂.

El LOI nos puede dar una idea de la calidad de los resultados obtenidos en el análisis químico, así como una idea del grado de alteración de las rocas, cantidad de volátiles, materia orgánica y carbonatos presentes en ellas. Generalmente la pérdida al fuego es proporcional al contenido de SiO₂, en base a esto se pueden aceptar valores relativamente altos para rocas más ácidas. Para las rocas del Cotacachi podemos

observar que los valores de LOI son menores que 3 % wt, (Figura 4.9) indicando que los procesos antes mencionados no han afectado a las rocas analizadas dando resultados analíticos de buena calidad.

4.2.1 ELEMENTOS MAYORES (ÓXIDOS)

La clasificación geoquímica de las rocas se realizó utilizando los diagramas de variación del contenido de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) respecto al sílice (SiO_2) de Peccerillo y Taylor (1979) y también el contenido de K_2O respecto al sílice de Gill (1981) (Figura 4.10). Las rocas del CVCC son calco-alcálicas de contenido medio de K_2O , que varían desde andesitas basálticas hasta dacitas; algunas de las andesitas basálticas ricas en olivino y piroxeno se acercan al límite toleítico del diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971).



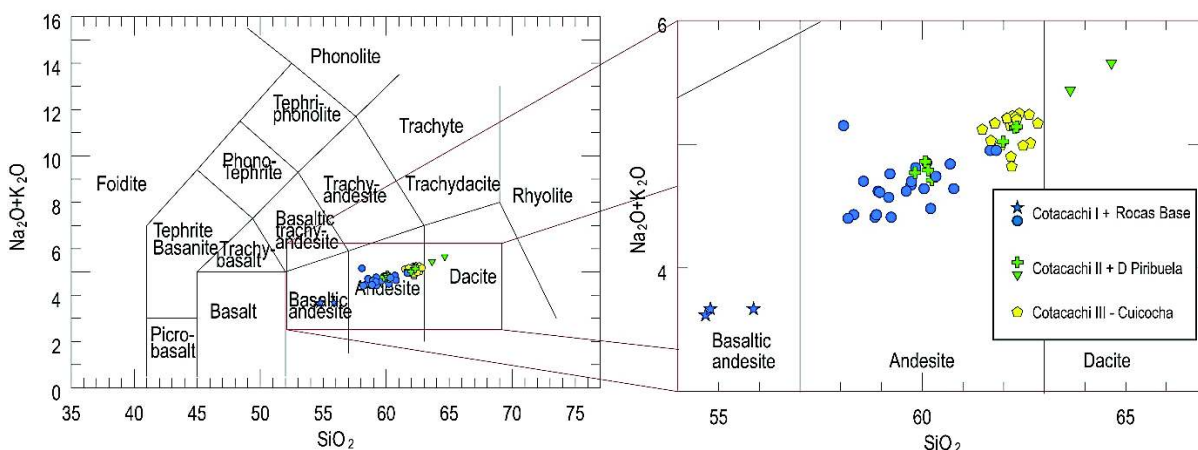


Figura 4.10. Diagramas de clasificación del tipo de roca: a) Irvine y Baragar, 1971 (AFM) b) Gill, 1981 - K_2O vs. SiO_2 y c) Peccerillo y Taylor, 1979 - $(Na_2O + K_2O)$ vs. SiO_2 .

Los diagramas HARKER (Figura 4.11) muestran correlaciones negativas para: $MgO > FeO^* > CaO \gg TiO_2$ y correlaciones positivas para: $K_2O > Al_2O_3 > Na_2O$. Las muestras de COTACACHI I - BASE: COTA 02, COTA 34 y MM 1B, son particularmente enriquecidas en MgO (8,20 – 7,69 % wt) y constituyen el inicio de una tendencia lineal que se mantiene para todos los óxidos. En COTACACHI II se observa que las rocas del domo PIRIBUELA son más ricas en K_2O con ~ 1,92 % wt y son las rocas más ácidas del Volcán Cotacachi.

El contenido de sílice varía para las diferentes unidades: 1) Las rocas de COTACACHI I varían entre 56 - 62 % wt. 2) Las rocas de COTACACHI II varían entre 60 - 62 % wt. 3) Las rocas y depósitos volcanoclásticos de COTACACHI III - CUICOCHA varían entre 61 - 63 % wt.

Las rocas relacionadas a los domos MUYURCU (COTA 07), PIRIBUELA (COTA 23 y 26), los domos satélite (COTA 14, 15 y 16) y dique (COTA 11) del flanco sur del volcán, difieren muy levemente de la tendencia original indicando que podrían estar asociados al mismo proceso de diferenciación.

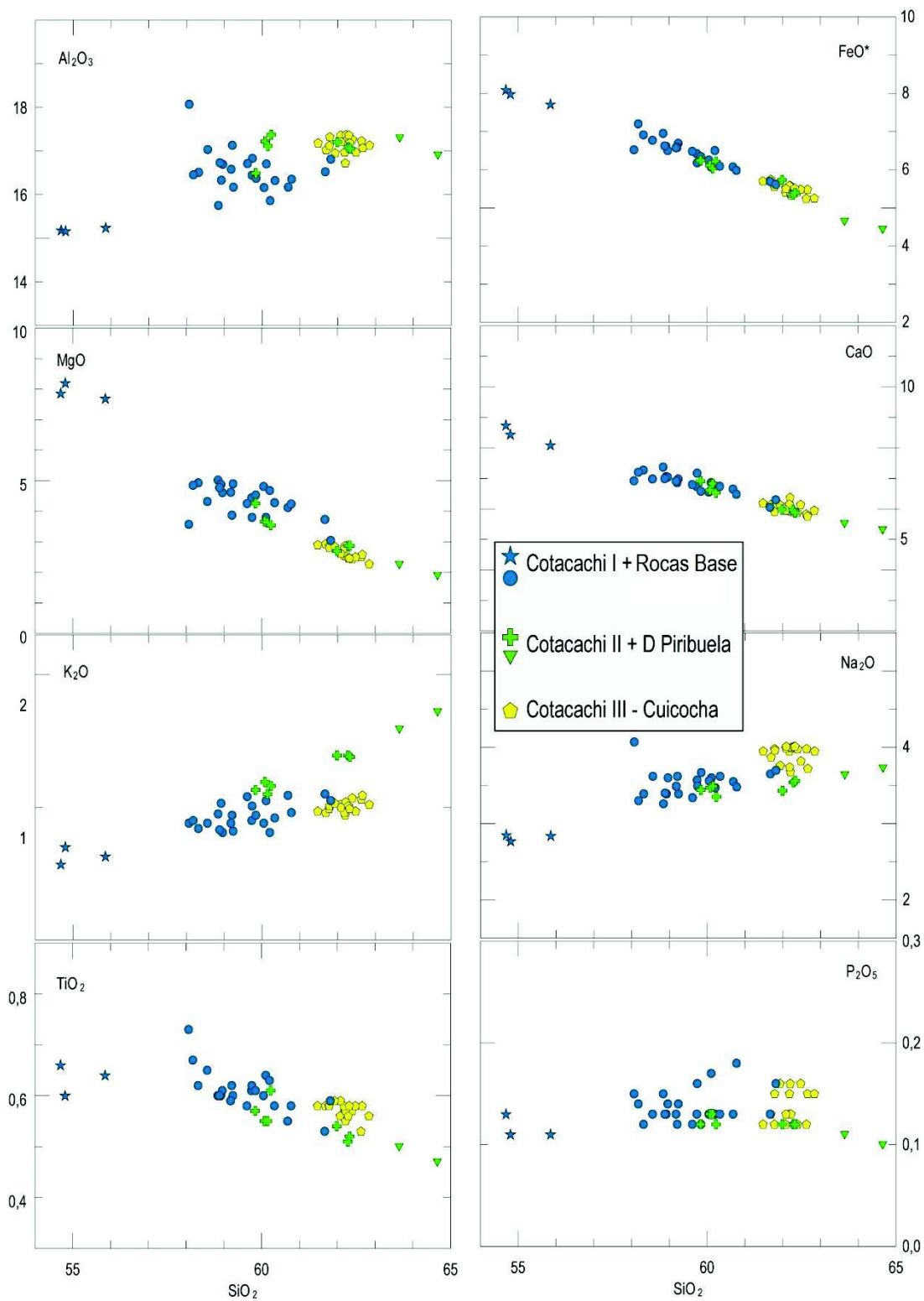


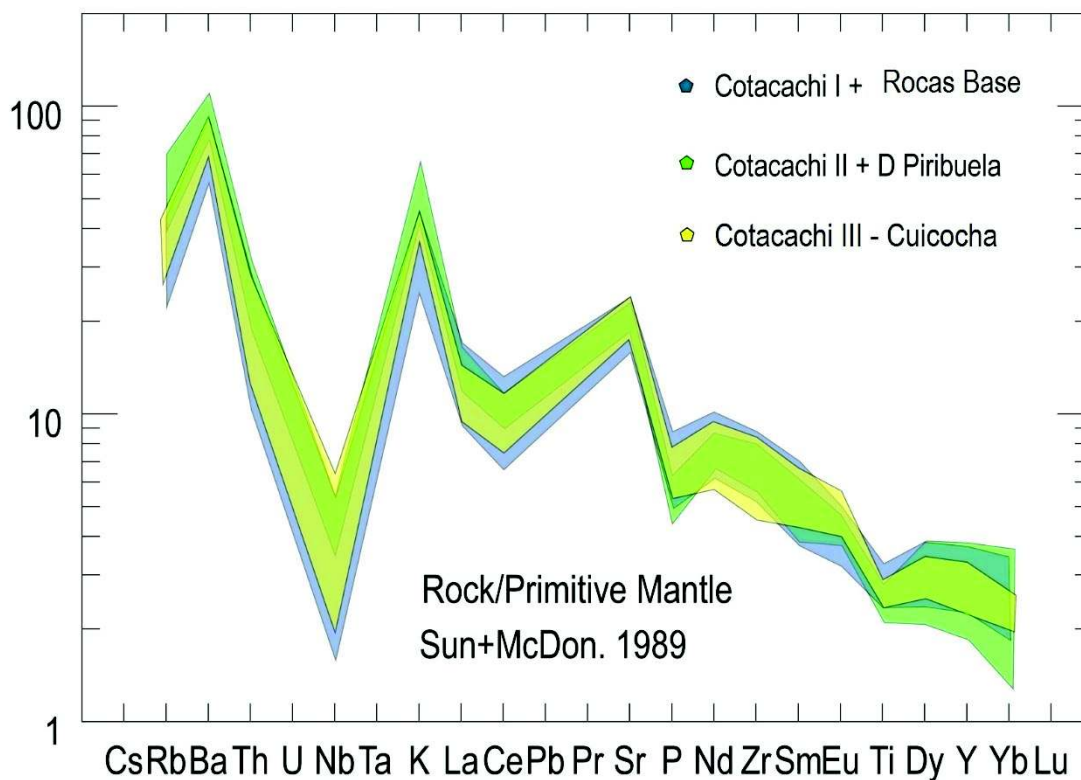
Figura 4.11. Diagramas HARKER para las rocas del Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha.

4.2.2 ELEMENTOS TRAZA

El contenido de elementos en traza se presenta en los diagramas de variación composicional que utilizan al sílice como índice de diferenciación (Figura 4.13).

Para las unidades COTACACHI I, II y III se observa que los HFSE (p.e., Th, Nb), LREE (p.e., La, Ce) y los LILE (p.e., Rb, Ba, Sr) se comportan como incompatibles, mientras que el Sc, V, Zr, Cr, Ni, Co, los MREE (p.e., Gd, Dy) y HREE (p.e., Er, Yb, Y) tienen un comportamiento compatible (Figura 4.13).

Los diagramas de REE y multielementales o “spider” normalizados a las condritas y al manto primitivo de Sun & McDon (1989) (Figura 4.12) muestran el fraccionamiento de los HREE con respecto a los LREE; la anomalía en Nb y el enriquecimiento en K son típicos de arcos volcánicos continentales (Wilson, 1994).



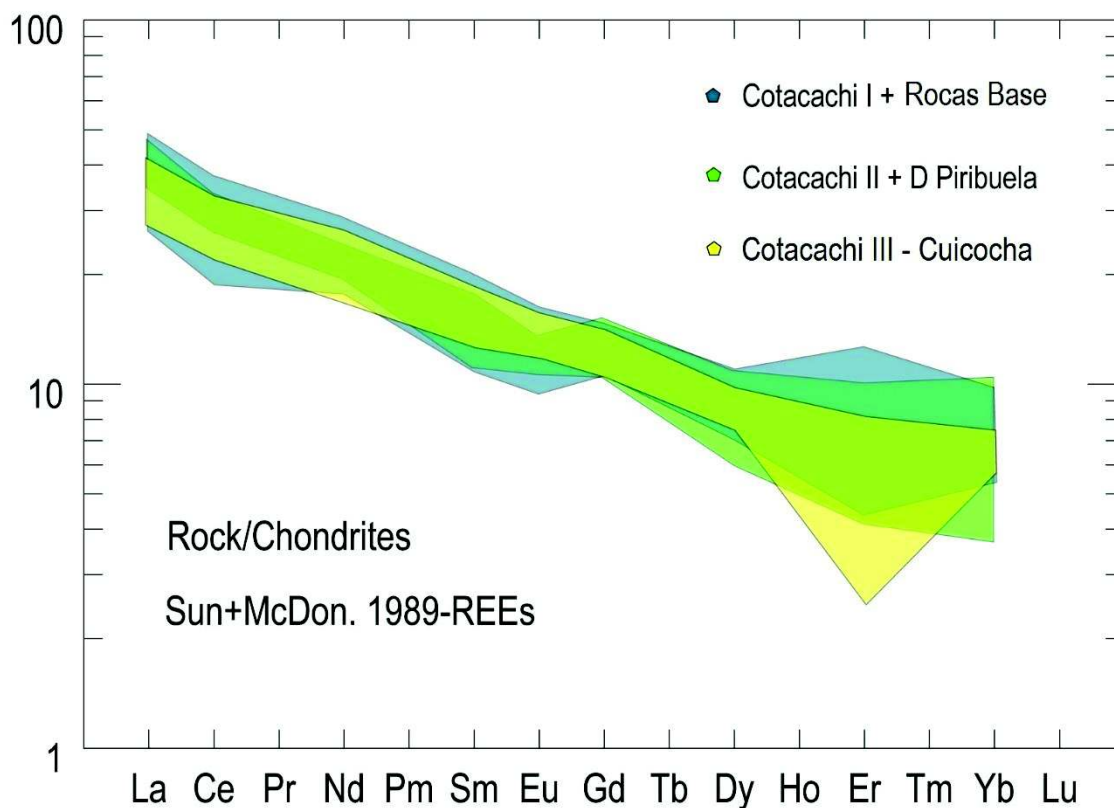


Figura 4.12. Diagrama de tipo “Spider” y Tierras Raras (REE) para las unidades mayores de COTACACHI - CUICOCHA respecto a las condritas y manto primitivo.

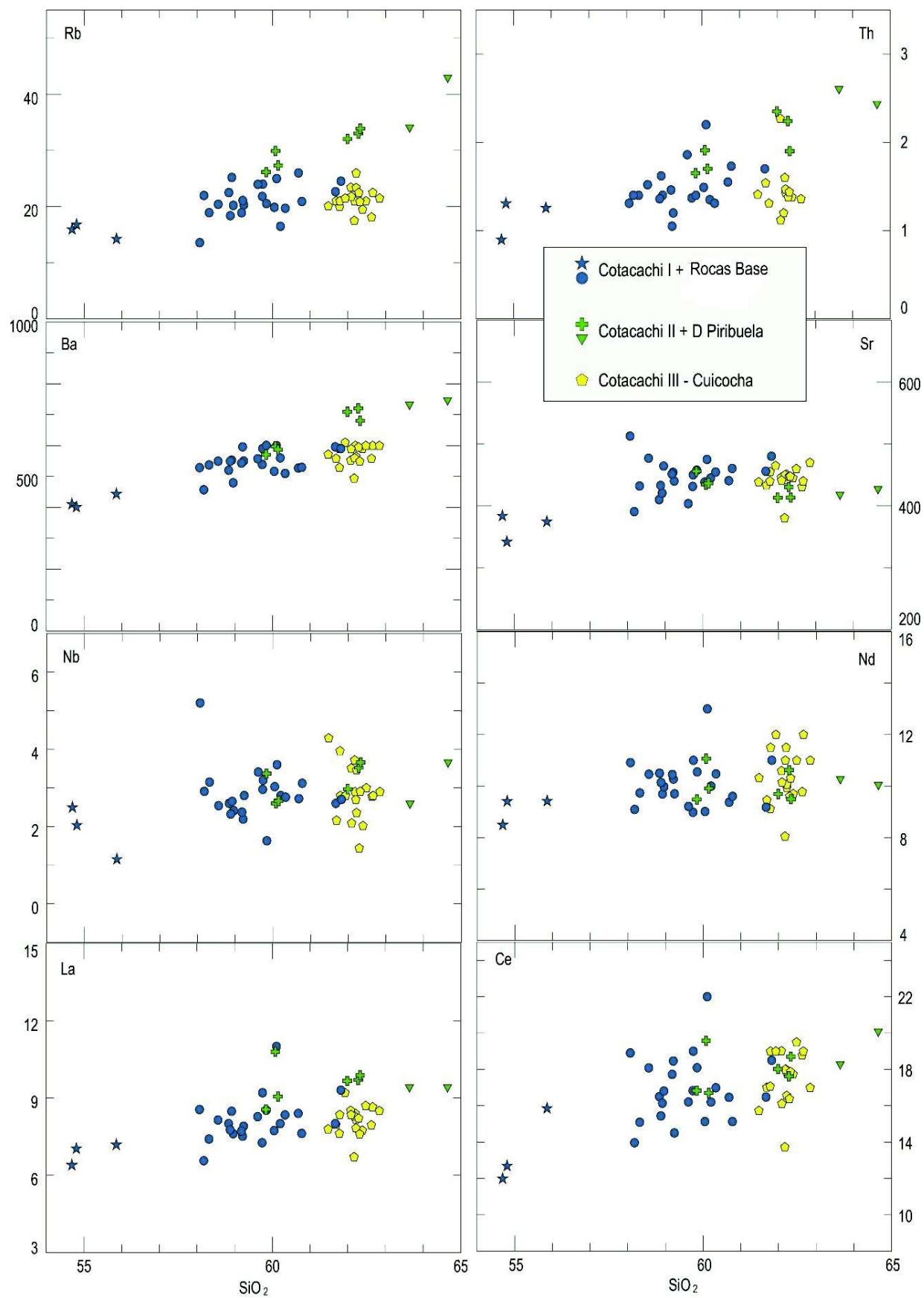
4.2.2.1 COTACACHI I y II

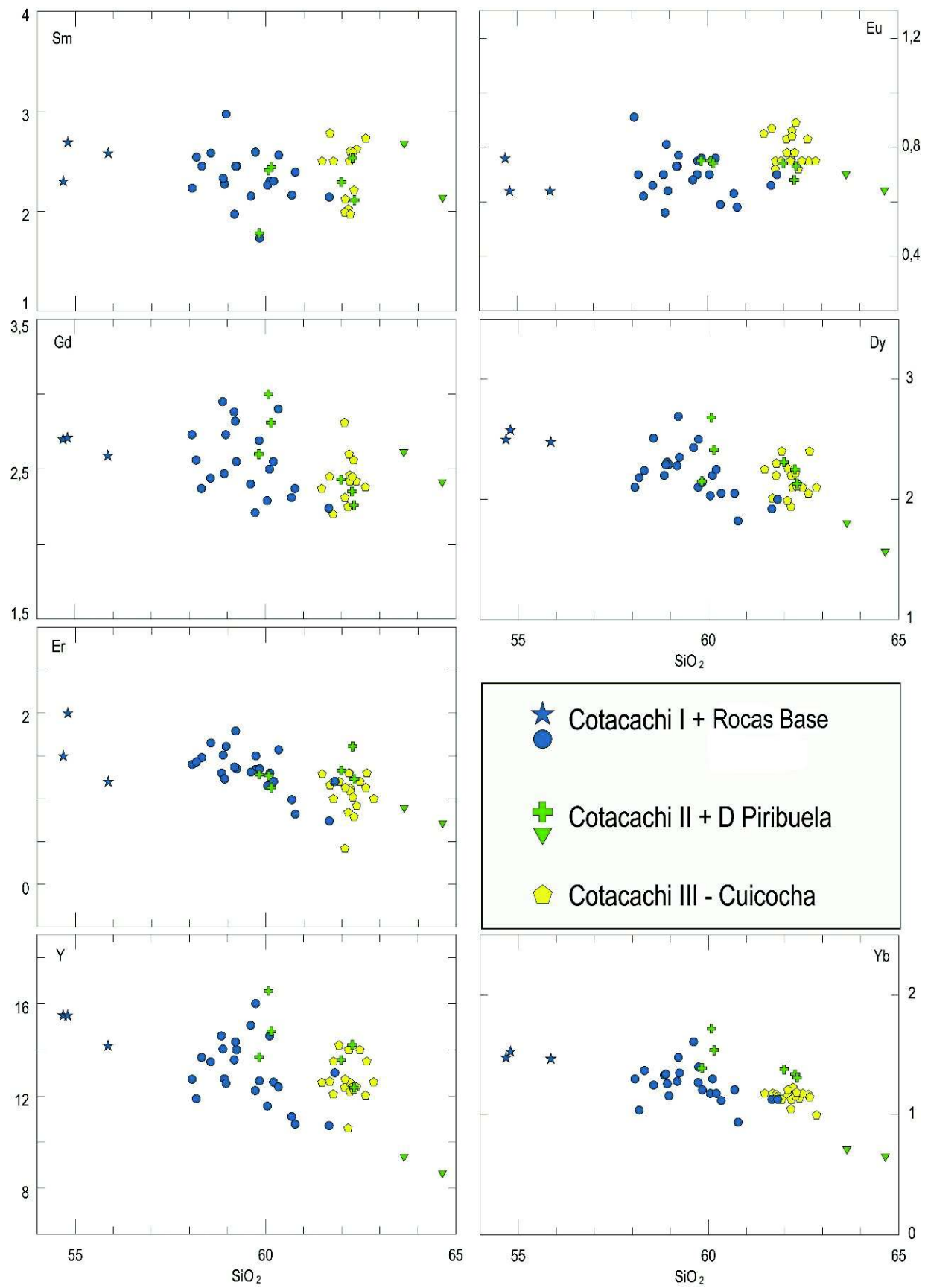
4.2.2.1.1 Flujos de lava

Se observan débiles anomalías en Eu relacionadas al fraccionamiento y acumulación de plagioclasa en el reservorio, en microscopio se evidencian como cúmulos cristalinos para las rocas de COTACACHI I – SUPERIOR y COTACACHI II – VENTO CENTRAL.

4.2.2.1.1 Domos y diques

Anomalías de Sm relacionadas a la cristalización fraccional de anfíbol son evidenciadas en menor cantidad para COTACACHI II y serían atribuidas especialmente para sus domos PIRIBUELA y MURUCU.





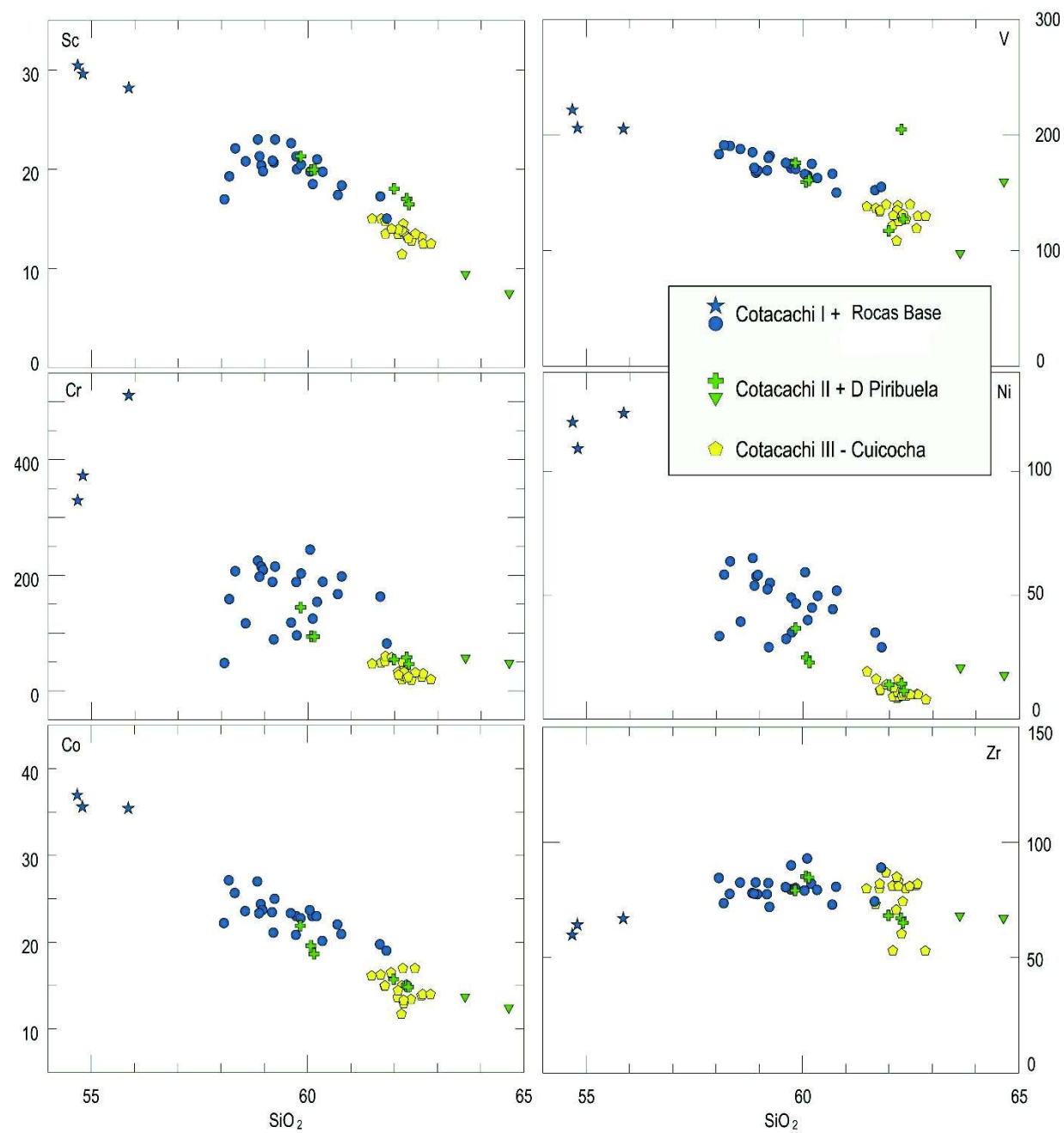


Figura 4.13. Diagramas Pseudo- HARKER para elementos traza, Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha.

4.2.2.2 AVALANCHA DE ESCOMBROS NORORIENTAL: COTACACHI I y COTACACHI II – VENTO CENTRAL

Gráficos simples muestran las relaciones tanto del K_2O vs. SiO_2 como del $Mg\#$ vs. SiO_2 , es evidente que los análisis químicos obtenidos para la colección de rocas del depósito de avalancha de escombros NE (COTA 17 A, B, C, D y E), muestran la misma correlación positiva para el K_2O y negativa para el $Mg\#$ respecto a las rocas de COTACACHI (Figura 4.14).

Este depósito de avalancha de escombros, incorpora rocas pertenecientes a las unidades: COTACACHI I – BASE, COTACACHI I - SUPERIOR y COTACACHI II – VENTO CENTRAL; posiblemente, produciéndose antes de la formación de la unidad COTACACHI III - CUICOCHA y al emplazamiento en el flanco oriental de los domos PIRIBUELA y LOMA NEGRA. El contenido de SiO_2 para esta colección de rocas de la avalancha está entre 57% y 66%.

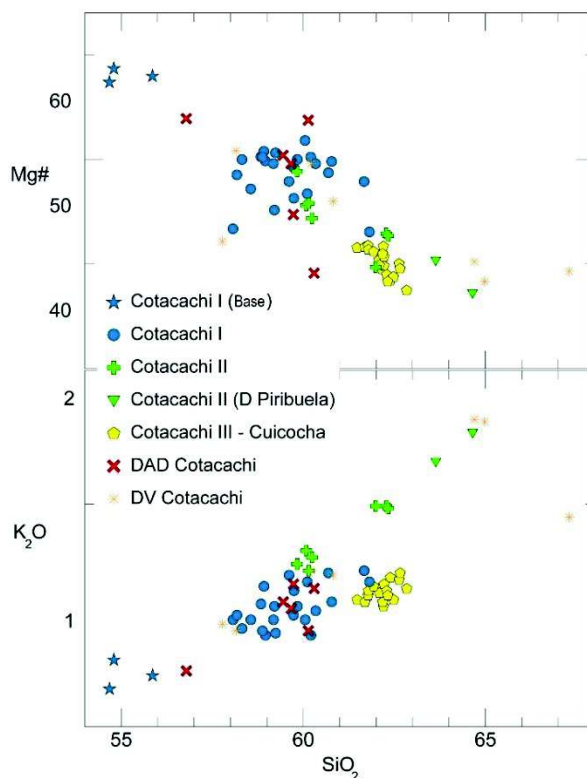


Figura 4.14. Diagramas K_2O vs. SiO_2 y $Mg\#$ vs. SiO_2 , se puede observar la afinidad de las muestras de roca obtenidas en el depósito de avalancha de escombros NE (DAD Cotacachi).

4.2.2.3 COTACACHI III - CUICOCHA

El Rb no muestra una tendencia clara, esto puede reflejar la presencia mínima o nula de feldespato alcalino (p.e., microclina o anortoclasa) en las rocas y depósitos volcanoclásticos asociados.

Anomalías en Yb representan el fraccionamiento de anfíbol y biotita para las rocas de esta unidad.

4.2.3 MODELO GEOQUÍMICO

En base a las relaciones propuestas por Schiano *et al.*, (2010) (**Figura 4.15**), hemos podido trabajar de manera breve los datos de la geoquímica de las unidades mayores del Volcán Cotacachi: COTACACHI I, II y III, con el fin de interpretar parte de los procesos magmáticos asociados a su evolución.

Se tomaron varios elementos representativos como el K_2O y trazas: LILE muy incompatible (p.e., Rb), HFSE moderadamente incompatible (p.e., Th) y un traza compatible (p.e., Co). Las relaciones propuestas entre ellos son: a) Rb vs. K_2O , b) Rb vs. Rb/Co, c) $1/Co$ vs. Rb/Co y d) Rb/Th vs. Rb; comparativamente, se observa que todas muestran correlaciones positivas cuyas curvas resultantes se ajustan muy bien con un modelo de cristalización fraccional, tanto para COTACACHI I y II como para COTACACHI III - CUICOCHA, confirmando la participación de este proceso como dominante en la evolución de los magmas del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha (CVCC).

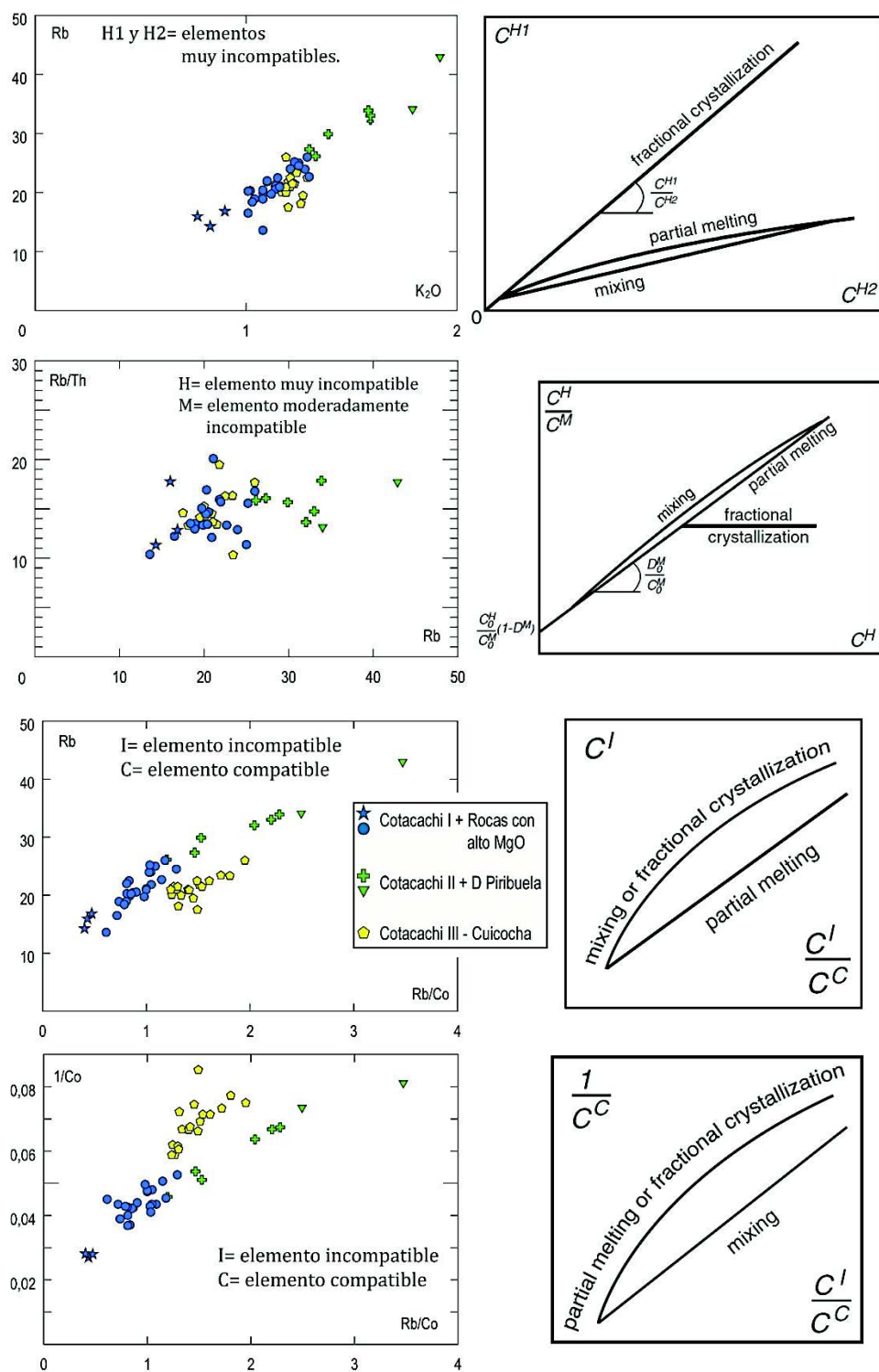


Figura 4.15. Diagramas de variación: a) Rb vs. K_2O , b) Rb/Th vs. Rb, c) Rb vs. Rb/Co y d) $1/Co$ vs. Rb/Co. Modificado de Schiano et al., 2010.

TABLA 01: Resumen de las descripciones petrográficas realizadas en este estudio, Complejo Volcánico Cotacachi - Cuicocha.

MUESTRA	% Ol	% Cpx	% Opx	% Amph	% Ca	% Pl	% Na	% K	% Spar	% Bio	% Óxidos	% Felisítica	Matriz Vítrea	Matriz FénoXls	%	Nombre de la Roca	Unidad	Textura
CUI 33	0	0	0	11	0	0	30	0	0	16	0	43	0	0	57	Dacita	Cotacachi III	glomeroporfídica
CUI 5	0	0	0	17	0	0	35	4	20	0	0	23	0	0	76	Dacita	Cotacachi III	porfírita
CUI 32	0	0	0	6	0	0	27	0	14	0	0	0	53	0	47	Dacita	Cotacachi III	pilotáxica
CUI 31A	0	0	0	9	0	12	0	0	0	0	1	0	78	0	21	Pómez dacítica	Cotacachi III	vesicular
CUI 31B	0	0	0	7	0	10	0	0	5	0	0	0	78	0	22	Pómez dacítica	Cotacachi III	vesicular
CUI 24A	0	0	0	7	0	23	0	0	6	0	0	0	62	0	36	Pómez dacítica	Cotacachi III	pilotáxica
CUI 24B	0	0	0	12	0	18	0	0	3	0	0	0	66	0	33	Pómez dacítica	Cotacachi III	vesicular
CUI 24C	0	0	0	25	0	30	0	0	5	0	0	0	39	0	60	Pómez dacítica - Volcanoclástico dacítico	Cotacachi III	epiclastica
CUI 17A	0	0	0	25	0	30	0	0	0	0	0	0	45	0	55	Andesita con hornblenda	Cotacachi III	porfírita
CUI 17B	0	0	0	27	0	28	0	0	0	0	0	0	46	0	54	Andesita con hornblenda	Cotacachi III	porfírita
CUI 18	0	0	0	7	0	33	0	0	8	15	0	37	0	0	48	Dacita	Cotacachi III	porfírita
CUI 1	0	2	0	18	35	0	0	0	0	5	0	16	24	0	55	Andesita hornbléndica	Cotacachi III	porfírita
CUI 19	0	0	0	12	0	28	0	0	8	10	0	42	0	0	48	Dacita	Cotacachi III	porfírita
CUI 2	0	0	0	10	0	35	0	3	6	5	0	19	18	0	57	Dacita	Cotacachi III	porfírita
CUI 26	0	15	0	0	25	0	0	0	0	1	0	30	29	0	40	Andesita basáltica	Cotacachi I	subofítica
CUI 34	0	12	6	0	30	0	0	0	0	0	0	35	17	0	48	Andesita	Cotacachi I	ofítica
CUI 3	6	13	12	0	33	0	0	0	0	0	0	36	0	0	64	Andesita basáltica	Cotacachi I	ofítica
CUI 4	0	15	5	0	20	0	0	0	0	0	0	49	8	0	40	Basalto - Andesítico	Cotacachi I	subofítica
CUI 7	0	20	6	0	30	0	0	2	0	4	0	24	14	0	58	Andesita basáltica	Cotacachi I	ofítica
CUI 28	4	8	2	0	37	0	0	0	0	0	0	49	0	0	51	Andesita basáltica (?)	Cotacachi I	glomeroporfídica
CUI 30	2	8	4	0	30	0	0	0	0	2	0	28	26	0	44	Andesita	Cotacachi I	glomeroporfídica
COTA-01	2	8	4	0	30	0	0	0	0	2	0	28	26	0	62	Andesita piroxénica	Cotacachi I	poikilitica

COTA-02	6	12	8	0	22	0	0	0	0	1	48	5	48	5	48	Basalto – Andesítico (rico en OI)	Cotacachi I	subofítica
CUI 9	0	7	4	0	40	0	0	0	0	2	47	0	47	0	51	Andesita	Cotacachi I	glomeroporfídica
COTA-03	8	11	7	0	13	5	0	0	0	3	45	8	45	8	44	Basalto - Andesítico	Cotacachi I	poikilitica
COTA-04	6	13	7	0	15	0	0	0	0	0	48	11	48	11	41	Basalto - Andesítico	Cotacachi I	glomeroporfídica
COTA-05	0	11	7	0	20	0	0	0	0	5	0	57	0	38	38	Basalto andesítico	Cotacachi I	glomeroporfídica
COTA 08	5	10	7	0	15	0	4	0	0	2	9	48	9	41	41	Basalto alcalino (?)	Cotacachi I	subofítica
COTA 07	0	12	8	10	30	0	0	1	5	5	24	10	24	10	61	Andesita	Cotacachi II	glomeroporfídica
COTA 10	2	9	5	0	25	15	3	0	4	4	0	37	0	63	63	Andesita alcalino (?)	Cotacachi II	poikilitica
COTA 11	5	7	10	0	35	10	0	0	1	0	0	32	0	68	68	Andesita	Cotacachi II	glomeroporfídica
COTA 12	0	8	4	4	37	0	0	0	0	0	7	40	7	53	53	Andesita	Cotacachi II	glomeroporfídica
COTA 13B	0	8	6	8	20	0	0	0	0	3	7	48	7	42	42	Andesita	Cotacachi II	poikilitica
COTA 14	5	8	4	7	20	0	0	0	0	7	0	49	0	44	44	Andesita	Cotacachi II	ofítica
COTA 15	5	11	8	0	30	0	0	0	6	6	0	40	0	54	54	Andesita basáltica	Cotacachi II	glomeroporfídica
COTA 16	5	15	5	5	30	0	4	0	3	3	0	33	0	64	64	Andesita basáltica alcalina (?)	Cotacachi II	glomeroporfídica
COTA 17A	0	10	5	0	35	0	0	0	4	4	15	31	15	50	50	Andesita	DAD Cotacachi	subofítica
COTA 17B	0	20	8	0	25	0	0	0	5	5	30	12	30	53	53	Basalto - Andesítico	DAD Cotacachi	ofítica
COTA 17C	0	6	3	0	0	0	0	0	3	3	0	48	0	9	9	Andesita	DAD Cotacachi	glomeroporfídica
COTA 17D	0	12	2	3	28	0	0	0	3	3	25	27	25	45	45	Andesita basáltica	DAD Cotacachi	glomeroporfídica
COTA 17E	0	9	0	0	35	0	0	0	1	1	40	15	40	44	44	Andesita	DAD Cotacachi	porfiritica

TABLA 02: Datos Geoquímicos de roca total para elementos Mayores y Traza, Volcán Cotacachi. (Base IRD, Base IG-EPN).

ID	UNIDAD	SiO2 (N)	TiO2 (N)	Al2O3 (N)	Fe2O3* (N)	MnO (N)	MgO (N)	CaO (N)	Na2O (N)	K2O (N)	P2O5 (N)	LOI	Total	Mg#	FeO
CUI 33	COTACACHI III	61,48	0,58	17,18	6,33	0,10	2,90	6,19	3,95	1,17	0,12	-0,01	100,00	47,57	5,70
CUI 5	COTACACHI III	62,20	0,57	16,72	6,20	0,10	2,86	6,37	3,68	1,14	0,16	-0,06	100,00	47,70	5,58
CUI 32	COTACACHI III	61,69	0,58	17,02	6,38	0,10	2,93	6,13	3,87	1,16	0,13	-0,04	100,00	47,63	5,74
CUI 31A	COTACACHI III	62,17	0,56	17,29	6,08	0,10	2,56	5,95	3,95	1,20	0,13	12,23	100,00	45,50	5,47
CUI 31B	COTACACHI III	62,39	0,57	17,26	6,01	0,10	2,43	5,88	3,98	1,27	0,12	0,80	100,00	44,42	5,41
CUI 24A	COTACACHI III	62,08	0,56	17,36	6,00	0,10	2,62	5,95	3,99	1,22	0,12	1,50	100,00	46,40	5,40
CUI 24B	COTACACHI III	62,22	0,57	17,37	5,93	0,10	2,53	5,92	3,99	1,24	0,13	0,71	100,00	45,84	5,33
CUI 24C	COTACACHI III	62,22	0,55	17,23	5,95	0,10	2,63	6,00	4,00	1,19	0,13	0,53	100,00	46,70	5,36
CUI 12	COTACACHI III	62,18	0,58	16,97	6,20	0,10	2,77	6,15	3,74	1,16	0,15	1,53	100,00	46,98	5,58
CUI 17A	COTACACHI III	61,78	0,58	17,12	6,19	0,10	2,86	6,06	3,98	1,19	0,12	1,03	100,00	47,79	5,57
CUI 17B	COTACACHI III	62,09	0,59	17,21	6,11	0,10	2,62	5,96	4,01	1,20	0,13	-0,03	100,00	45,91	5,50
CUI 17C	COTACACHI III	62,63	0,53	17,23	5,82	0,09	2,51	5,83	3,98	1,26	0,12	2,26	100,00	46,04	5,24
CUI 13A	COTACACHI III	61,79	0,58	17,32	6,17	0,10	2,81	5,91	3,96	1,21	0,15	2,00	100,00	47,39	5,55
CUI 13C	COTACACHI III	61,93	0,59	16,95	6,29	0,10	2,84	6,14	3,76	1,23	0,16	1,42	100,00	47,21	5,66
CUI 15	COTACACHI III	62,66	0,58	17,07	6,09	0,10	2,58	5,76	3,72	1,29	0,15	1,70	100,00	45,58	5,48
CUI 18	COTACACHI III	62,29	0,56	17,36	5,98	0,10	2,47	5,89	4,01	1,21	0,12	-0,14	100,00	45,00	5,38
CUI 26	COTACACHI I	58,07	0,73	18,07	7,24	0,10	3,57	6,92	4,07	1,08	0,15	0,22	100,00	49,36	6,52
CUI 1	COTACACHI III	62,48	0,58	16,97	6,09	0,10	2,50	6,14	3,82	1,17	0,16	-0,19	100,00	44,80	5,48
CUI 19	COTACACHI III	62,32	0,58	17,18	6,12	0,10	2,46	5,92	4,01	1,19	0,12	-0,16	100,00	44,35	5,51
CUI 2	COTACACHI III	62,84	0,56	17,13	5,83	0,09	2,27	5,95	3,95	1,22	0,15	0,03	100,00	43,49	5,25
CUI 34	COTACACHI I	59,73	0,61	16,44	7,13	0,11	4,44	6,73	3,57	1,10	0,13	0,19	100,00	55,24	6,42
CUI 3	COTACACHI I	60,11	0,64	16,70	6,75	0,11	3,80	6,86	3,60	1,25	0,17	-0,03	100,00	52,71	6,07
CUI 4	COTACACHI I	58,84	0,60	15,75	7,73	0,12	5,02	7,37	3,26	1,15	0,15	0,33	100,00	56,25	6,95
CUI 7	COTACACHI I	59,74	0,62	16,83	6,87	0,11	3,80	7,17	3,49	1,21	0,16	-0,09	100,00	52,29	6,18
CUI 9	COTACACHI I	61,82	0,59	16,81	6,23	0,10	3,03	6,30	3,70	1,25	0,16	0,23	100,00	49,06	5,61

CUI 28	COTACACHI I	60,05	0,60	16,16	6,95	0,11	4,81	6,55	3,56	1,08	0,13	0,43	100,00	57,80	6,25
CUI 30	COTACACHI I	59,61	0,58	16,71	7,20	0,12	4,25	6,80	3,34	1,28	0,12	0,33	100,00	53,89	6,48
CHI 91	COTACACHI I	60,21	0,63	15,86	7,22	0,11	4,68	6,68	3,47	1,01	0,13	0,24	100,00	56,22	6,50
MM 1B	U BASALES	54,68	0,66	15,18	8,99	0,15	7,86	8,74	2,85	0,77	0,13	-0,44	100,00	63,39	8,09
MM 2	COTACACHI I	59,24	0,60	16,17	7,43	0,12	4,90	6,98	3,39	1,02	0,14	0,24	100,00	56,63	6,69
COTA-01	COTACACHI I	58,32	0,62	16,51	7,68	0,12	4,93	7,27	3,39	1,04	0,12	-0,04	100,00	55,98	6,91
COTA-02	U BASALES	55,86	0,64	15,24	8,57	0,14	7,69	8,09	2,84	0,83	0,11	-0,06	100,00	63,97	7,71
COTA-03	COTACACHI I	59,21	0,62	17,13	7,32	0,12	3,87	6,86	3,62	1,14	0,12	0,13	100,00	51,16	6,58
COTA-04	COTACACHI I	58,56	0,65	17,03	7,53	0,12	4,32	6,98	3,62	1,08	0,13	0,14	100,00	53,18	6,77
COTA-05	COTACACHI I	59,84	0,61	16,37	7,04	0,11	4,53	6,58	3,67	1,14	0,12	0,30	100,00	55,99	6,34
COTA 07	COTACACHI I	61,67	0,53	16,52	6,32	0,10	3,73	6,05	3,65	1,30	0,13	0,30	100,00	53,88	5,69
COTA 08	COTACACHI I	58,92	0,60	16,33	7,35	0,12	4,88	7,06	3,39	1,23	0,13	-0,19	100,00	56,77	6,61
COTA 10	COTACACHI II	59,83	0,57	16,49	6,94	0,11	4,26	6,91	3,44	1,33	0,12	-0,12	100,00	54,84	6,24
COTA 11	DIQUE // COTACACHI II	60,08	0,55	17,22	6,79	0,11	3,66	6,61	3,47	1,39	0,13	0,33	100,00	51,60	6,11
COTA 12	COTACACHI II	60,15	0,55	17,11	6,70	0,11	3,63	6,83	3,49	1,30	0,13	0,51	100,00	51,79	6,03
COTA 13B	COTACACHI I	60,69	0,55	16,17	6,75	0,11	4,12	6,65	3,55	1,29	0,13	0,81	100,00	54,71	6,07
COTA 14	COTACACHI II	61,99	0,54	17,20	6,36	0,09	2,70	5,98	3,43	1,59	0,12	1,09	100,00	45,70	5,73
COTA 15	COTACACHI II	62,28	0,51	17,08	5,94	0,09	2,87	5,97	3,54	1,59	0,12	1,08	100,00	48,92	5,34
COTA 16	COTACACHI II	62,33	0,52	17,05	5,99	0,10	2,87	5,87	3,56	1,58	0,12	0,93	100,00	48,69	5,39
COTA 023	DOMO PIRIBUELA	63,64	0,50	17,30	5,17	0,07	2,26	5,53	3,64	1,79	0,11	0,88	100,00	46,34	4,65
COTA 026	DOMO PIRIBUELA	64,65	0,47	16,91	4,93	0,07	1,90	5,32	3,73	1,92	0,10	0,05	100,00	43,23	4,44
COTA 029	COTACACHI I	58,96	0,61	16,69	7,22	0,11	4,61	7,04	3,60	1,01	0,14	0,13	100,00	55,84	6,50
COTA 031	COTACACHI I	58,18	0,67	16,45	8,01	0,12	4,85	7,20	3,30	1,10	0,14	0,22	100,00	54,52	7,20
COTA 032	COTACACHI I	60,78	0,58	16,35	6,65	0,10	4,24	6,48	3,48	1,16	0,18	0,73	100,00	55,79	5,98
COTA 033	COTACACHI I	60,34	0,58	16,32	6,77	0,10	4,28	6,74	3,62	1,12	0,13	0,03	100,00	55,59	6,09
COTA 034	U BASALES	54,80	0,60	15,16	8,86	0,15	8,20	8,44	2,77	0,90	0,11	-0,25	100,00	64,69	7,98
COTA 035	COTACACHI I	59,18	0,59	16,58	7,31	0,11	4,62	6,91	3,49	1,08	0,13	0,08	100,00	55,60	6,57
COTA 036	COTACACHI I	58,88	0,60	16,73	7,35	0,12	4,77	6,99	3,40	1,03	0,13	0,94	100,00	56,21	6,62
COTA 17B	AVALANCHANE	59,45	0,56	16,19	7,07	0,11	4,62	7,13	3,58	1,16	0,14	0,07	100,00	56,39	6,36

ID	UNIDAD	V	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Th
COTA 17C	AVALANCHANA NE	56,79	8,12	0,56	16,20	8,12	0,12	6,12	7,83	3,30	0,85	0,12	100,00	59,89	7,30						
COTA 17D	AVALANCHANA NE	60,14	6,64	0,50	15,92	6,64	0,10	4,97	6,79	3,78	1,03	0,12	100,00	59,74	5,97						
COTA 17E	AVALANCHANA NE	59,67	6,91	0,49	16,58	6,91	0,12	4,37	7,10	3,50	1,13	0,13	100,00	55,58	6,22						
CUI 33	COTACACHI III	138,20	47,08	16,14	19,28	20,10	438,57	12,58	79,96	4,29	571,38	7,79	15,73	10,32	2,50	0,85	2,37	2,25	1,29	1,18	1,41
CUI 5	COTACACHI III	139,00	46,00	17,00	16,00	21,50	450,00	14,00	82,00	2,70	600,00	8,40	18,00	11,50	2,50	0,75	2,60	2,20	1,30	1,20	1,60
CUI 32	COTACACHI III	136,72	49,18	16,25	16,23	21,04	433,38	12,63	73,16	2,16	558,12	7,96	17,01	9,46	2,78	0,87	2,45	2,01	1,16	1,18	1,54
CUI 31A	COTACACHI III	108,60	19,82	11,73	8,51	17,51	380,29	10,60	70,78	3,72	494,27	6,71	13,73	8,05	2,02	0,76	2,25	1,94	0,84	1,05	1,20
CUI 31B	COTACACHI III	127,39	19,24	13,42	9,40	19,49	445,04	12,39	79,97	2,02	590,21	7,74	17,74	9,70	2,62	0,72	2,42	2,12	0,92	1,14	1,38
CUI 24A	COTACACHI III	121,89	32,47	13,64	9,10	23,44	446,00	12,37	81,15	3,51	552,54	8,51	19,02	10,59	1,99	0,83	2,81	1,99	0,42	1,16	2,27
CUI 24B	COTACACHI III	125,30	25,46	12,94	9,20	23,36	450,75	12,58	83,21	2,36	562,95	8,17	17,84	9,94	2,60	0,86	2,46	2,20	1,12	1,12	1,43
CUI 24C	COTACACHI III	125,39	32,70	13,33	10,53	25,99	442,05	12,20	80,92	3,46	564,12	7,83	16,56	10,07	1,97	0,84	2,42	2,10	1,09	1,23	1,47
CUI 12	COTACACHI III	135,00	50,00	15,00	11,00	21,00	450,00	14,00	85,00	2,90	560,00	8,30	18,00	11,00	0,00	0,75	0,00	2,20	1,30	1,13	0,00
CUI 17A	COTACACHI III	134,05	51,12	14,97	11,67	19,99	439,95	12,08	79,92	3,96	528,63	7,62	17,07	9,12	2,50	0,72	2,20	2,20	1,00	1,17	1,31
CUI 17B	COTACACHI III	130,59	27,80	14,44	12,74	21,81	441,23	12,72	53,07	2,09	588,89	8,35	16,12	10,15	2,12	0,78	2,31	2,26	1,13	1,21	1,12
CUI 17C	COTACACHI III	119,29	24,29	13,84	10,11	18,12	430,60	12,03	81,37	2,78	557,78	7,95	18,78	9,78	2,73	0,83	2,38	2,05	1,13	1,17	1,36
CUI 13A	COTACACHI III	135,00	60,00	15,00	12,00	21,00	455,00	13,50	82,00	2,80	590,00	8,35	19,00	11,50	0,00	0,75	0,00	2,30	1,20	1,15	0,00
CUI 13C	COTACACHI III	140,00	58,00	16,50	14,00	21,50	465,00	14,20	87,00	2,80	610,00	9,20	19,00	12,00	0,00	0,75	0,00	2,40	1,20	1,13	0,00
CUI 15	COTACACHI III	130,00	30,00	14,00	10,00	22,50	440,00	13,50	82,00	2,80	600,00	8,65	19,00	12,00	0,00	0,75	0,00	2,40	1,30	1,15	0,00
CUI 18	COTACACHI III	128,90	22,40	15,10	9,45	22,49	447,50	12,40	60,39	1,44	595,02	8,21	16,38	9,60	2,59	0,78	2,45	2,22	1,02	1,16	1,38
CUI 26	COTACACHI I	183,37	48,12	22,20	33,50	13,59	512,58	12,72	84,52	5,20	528,36	8,55	18,90	10,91	2,23	0,91	2,73	2,10	1,40	1,30	1,31
CUI 1	COTACACHI III	140,00	32,00	17,00	10,00	21,00	460,00	14,00	81,00	3,00	600,00	8,70	19,50	11,00	0,00	0,75	0,00	2,10	1,20	1,18	0,00
CUI 19	COTACACHI III	131,52	24,58	14,80	10,50	20,91	447,78	12,28	74,37	2,91	549,04	7,60	17,87	10,31	2,21	0,89	2,56	2,11	0,79	1,19	1,44
CUI 2	COTACACHI III	130,00	20,00	14,00	8,00	21,50	470,00	12,60	53,00	2,90	600,00	8,50	17,00	11,00	0,00	0,75	0,00	2,10	1,00	1,00	0,00
CUI 34	COTACACHI I	171,42	188,25	20,84	48,99	21,82	431,18	12,23	79,58	2,96	538,70	7,26	16,83	8,98	2,59	0,70	2,21	2,10	1,34	1,27	1,37
CUI 3	COTACACHI I	165,00	125,00	23,00	40,00	25,00	475,00	14,60	93,00	3,60	600,00	11,00	22,00	13,00	2,30	0,75	2,50	2,20	1,30	1,30	2,20
CUI 4	COTACACHI I	185,00	225,00	27,00	65,00	22,50	410,00	14,60	78,00	2,60	520,00	8,00	16,50	10,50	0,00	0,70	0,00	2,20	1,30	1,33	0,00
CUI 7	COTACACHI I	175,00	96,00	23,00	35,00	24,00	450,00	16,00	90,00	3,20	590,00	9,20	19,00	11,00	0,00	0,75	0,00	2,50	1,50	1,40	0,00
CUI 9	COTACACHI I	155,00	82,00	19,00	29,00	24,50	480,00	13,00	89,00	2,70	590,00	9,30	18,50	11,00	0,00	0,70	0,00	2,00	1,20	1,13	0,00
CUI 28	COTACACHI I	166,09	244,22	23,69	59,25	19,87	438,22	11,56	79,04	3,03	516,34	7,73	15,13	9,01	2,26	0,70	2,29	2,03	1,15	1,18	1,49
CUI 30	COTACACHI I	175,81	118,02	23,34	32,39	23,95	403,36	15,06	80,57	3,41	557,42	8,27	16,21	9,21	2,15	0,68	2,40	2,43	1,31	1,61	1,86
CHI 91	COTACACHI I	175,00	154,00	23,00	45,00	16,50	445,00	12,60	82,00	2,80	560,00	8,00	16,20	10,00	2,30	0,76	2,55	2,25	1,20	1,18	1,35
MM 1B	U BASALES	222,00	330,00	37,00	120,00	16,00	384,00	15,50	60,00	2,50	411,00	6,40	12,00	8,50	2,30	0,76	2,70	2,50	1,50	1,48	0,90
MM 2	COTACACHI I	182,00	215,00	25,00	55,00	20,30	440,00	14,00	72,00	2,80	550,00	7,90	14,50	9,70	2,45	0,77	2,55	2,35	1,35	1,35	1,20
COTA-01	COTACACHI I	190,53	207,04	25,67	63,68	18,91	431,88	13,67	77,62	3,15	537,36	7,40	15,09	9,73	2,45	0,62	2,37	2,24	1,48	1,37	1,40
COTA-02	U BASALES	205,47	511,45	35,45	123,60	14,30	374,68	14,18	67,09	1,16	443,88	7,19	15,87	9,43	2,58	0,64	2,59	2,48	1,20	1,47	1,26
COTA-03	COTACACHI I	180,14	89,01	21,10	29,03	21,09	454,12	14,34	82,32	2,19	595,44	7,51	18,46	10,27	2,45	0,73	2,82	2,69	1,79	1,48	1,05

COTA-04	COTACACHI I	187,85	116,90	23,58	39,35	20,41	476,95	13,48	82,53	2,54	549,26	8,14	18,08	10,46	2,58	0,66	2,44	2,51	1,65	1,25	1,52
COTA-05	COTACACHI I	170,55	203,19	22,75	46,60	20,53	457,43	12,65	80,16	1,63	600,37	8,52	18,09	10,55	1,73	0,76	2,69	2,14	1,35	1,21	1,40
COTA 07	COTACACHI I	152,29	163,04	19,75	34,92	22,67	455,81	10,71	74,35	2,60	596,00	8,00	16,48	9,18	2,14	0,66	2,24	1,92	0,74	1,13	1,70
COTA 08	COTACACHI I	167,32	215,01	24,38	57,62	25,19	420,44	12,74	82,55	2,65	552,66	8,48	16,14	9,69	2,27	0,81	2,47	2,31	1,23	1,26	1,62
COTA 10	COTACACHI II	175,86	144,30	21,87	36,65	26,14	455,83	13,68	79,09	3,37	570,50	8,55	16,83	9,48	1,78	0,75	2,60	2,15	1,28	1,39	1,65
COTA 11	DIQUE // COTACACHI II	159,34	94,01	19,58	24,86	29,90	434,42	16,55	85,13	2,60	596,91	10,79	19,57	11,06	2,41	0,75	3,00	2,68	1,27	1,72	1,91
COTA 12	COTACACHI II	160,87	93,81	18,64	22,78	27,31	436,18	14,80	84,69	2,66	586,72	9,05	16,70	9,91	2,44	0,74	2,81	2,41	1,13	1,54	1,70
COTA 13B	COTACACHI I	166,41	167,41	22,04	44,34	26,00	440,57	11,10	72,95	2,72	526,97	8,40	16,46	9,37	2,16	0,63	2,31	2,05	0,99	1,21	1,55
COTA 14	COTACACHI II	117,16	54,13	15,71	13,77	32,05	412,96	13,56	68,27	2,97	708,93	9,66	18,02	9,69	2,29	0,74	2,43	2,31	1,33	1,38	2,35
COTA 15	COTACACHI II	204,76	57,88	14,98	14,32	33,02	430,15	14,21	67,06	3,52	720,22	9,70	17,62	10,62	2,53	0,68	2,35	2,25	1,61	1,34	2,24
COTA 16	COTACACHI II	127,36	46,31	14,84	11,36	33,88	413,18	12,36	65,07	3,66	680,36	9,88	18,70	9,49	2,11	0,73	2,26	2,13	1,23	1,31	1,90
COTA 023	DOMO PIRIBUELA	97,18	55,92	13,64	20,47	34,02	417,41	9,34	67,86	2,58	730,97	9,40	18,26	10,26	2,67	0,70	2,61	1,80	0,89	0,71	2,60
COTA 026	DOMO PIRIBUELA	159,10	47,28	12,35	17,43	42,87	426,51	8,64	66,78	3,65	745,28	9,40	20,06	10,03	2,13	0,64	2,41	1,56	0,71	0,65	2,43
COTA 029	COTACACHI I	169,26	208,96	23,70	58,17	20,22	464,20	12,54	77,49	2,41	479,19	7,61	16,81	9,97	2,97	0,64	2,73	2,29	1,61	1,16	1,40
COTA 031	COTACACHI I	191,08	158,73	27,13	58,32	21,98	390,46	11,88	73,56	2,91	456,75	6,56	13,96	9,09	2,54	0,70	2,56	2,18	1,43	1,04	1,40
COTA 032	COTACACHI I	150,11	197,92	20,93	51,83	20,91	460,15	10,78	80,66	3,12	529,25	7,62	15,13	9,60	2,39	0,58	2,37	1,82	0,82	0,94	1,73
COTA 033	COTACACHI I	162,75	188,74	20,14	49,74	19,72	454,50	12,39	79,37	2,76	509,51	8,34	16,99	10,47	2,56	0,59	2,90	2,05	1,57	1,12	1,31
COTA 034	U BASALES	206,25	372,80	35,62	109,29	16,86	342,12	15,49	64,35	2,04	401,49	7,04	12,70	9,42	2,69	0,64	2,71	2,58	2,00	1,53	1,31
COTA 035	COTACACHI I	169,37	188,45	23,44	52,39	18,90	451,36	13,56	77,45	2,37	543,07	7,71	17,72	10,45	1,97	0,73	2,88	2,28	1,37	1,28	1,46
COTA 036	COTACACHI I	171,61	197,54	23,33	53,88	18,38	432,77	14,03	77,73	2,32	549,22	7,76	15,44	10,14	2,33	0,56	2,95	2,29	1,51	1,34	1,36
COTA 17B	AVALANCHA NE	162,61	168,64	22,09	47,18	24,29	452,05	12,23	78,23	3,14	531,47	9,69	19,90	10,69	1,99	0,68	2,49	2,23	1,19	1,20	2,26
COTA 17C	AVALANCHA NE	178,83	284,17	27,67	82,76	12,66	416,49	12,18	60,41	2,35	459,30	6,08	13,61	8,17	2,37	0,71	2,33	2,04	1,20	1,17	1,16
COTA 17D	AVALANCHA NE	142,57	248,87	24,05	70,22	16,73	473,15	9,51	69,10	2,38	482,25	6,86	15,28	7,60	1,99	0,67	2,31	1,80	0,95	1,01	1,33
COTA 17E	AVALANCHA NE	165,52	202,40	21,49	40,57	19,70	446,47	11,82	67,08	2,97	596,13	7,44	14,61	8,58	1,87	0,59	2,19	1,83	1,06	1,24	1,45

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Estratigrafía de Unidades Mayores

El Volcán Cotacachi está constituido por al menos 3 unidades mayores que en orden cronológico desde la más antigua son: COTACACHI I (Base, Superior, Avalancha de escombros NW) y COTACACHI II (Vento Central, Avalancha de escombros NE, Depósitos Piroclásticos y Laháricos del flanco SE, Domos), la última pertenece a una caldera ubicada en su flanco sur: COTACACHI III – CUICOCHA (Domo Pre-caldera, Depósitos Piroclásticos y Domos Post-caldera).

Petrografía

- **COTACACHI I** (Ol + Cpx + Opx + Plag Ca \pm Plag Na \pm Kspar); representada por andesitas basálticas y andesitas.
- **COTACACHI II** (Ol + Cpx + Opx + Amph + Plag Ca \pm Kspar); representada por andesitas, ocasionalmente con escasos fenocristales de anfíbol y en el caso de sus domos por dacitas.
- **COTACACHI III – CUICOCHA** (Amph + Plag Na + Bio \pm Kspar); representada por andesitas y sus domos post-caldera por dacitas.

En muestra de mano, es típico de las rocas del volcán Cotacachi presentar textura glomeroporfídica con cúmulos de piroxeno y mayor cantidad de fenocristales de plagioclasa respecto a las rocas de sus volcanes vecinos (p.e., Imbabura).

Geoquímica

Las rocas del CVCC presentan afinidades típicas de magmatismo de arco continental. COTACACHI I, II y COTACACHI III – CUICOCHA muestran correlaciones similares para elementos mayores (excepto COTACACHI III, cuya tendencia difiere

levemente en K_2O vs. SiO_2) y traza, siendo interpretadas como el resultado de un proceso dominante de cristalización fraccional.

- *Hipótesis: Los productos volcánicos asociados a la unidad COTACACHI III - CUICOCHA podrían ser interpretados como el resultado de un proceso de migración magmática hacia zonas menos profundas desde la cámara principal. Al producirse esta migración se forma un nuevo reservorio a menor profundidad. Durante la migración y corta estadía del magma en su nuevo reservorio, varias causas generan una mayor diferenciación y se refleja en un cambio leve de la tendencia composicional de sus productos volcánicos en superficie.*

Estratigrafía de la Avalancha Nororiental

El depósito de avalancha de escombros nororiental sobreyace a los depósitos de la avalancha de escombros de Chachimbiro (evento Huanguillaro) y subyace a los depósitos de la avalancha del volcán Imbabura. Los depósitos de colapso de domo, tanto de Loma Negra como de Piribuela se posicionan al tope de toda la secuencia volcánica y volcanoclástica de Cotacachi I y II en su flanco oriental.

Posible origen de la Avalancha Nororiental

La química de las rocas pertenecientes a esta avalancha, muestran afinidades similares a las tendencias observadas en las unidades COTACACHI I y II, en base a esto podemos interpretar que este evento tuvo su origen durante la construcción del segundo edificio del Volcán Cotacachi y fue anterior al emplazamiento de sus domos (p.e., Piribuela). Las edades propuestas por otros autores para las avalanchas de Chachimbiro (evento Huanguillaro) e Imbabura sugieren la ocurrencia de la avalancha nororiental entre 102 ka y ~44 ka.

Morfología del edificio volcánico

Se caracteriza por una base pseudo-elíptica alargada en sentido E – O, muy potente y con relieves suavizados por los depósitos volcanoclásticos recientes o

anteriores re-trabajados. La parte superior se observa como una pirámide con pendientes muy fuertes, constituida por rocas muy erosionadas y afectadas por glaciación.

Grandes escarpes se abren hacia el NE y NW del volcán, corresponden a los remanentes de anfiteatros asociados a los eventos destructivos que han afectado al Volcán Cotacachi.

La depresión más importante se encuentra al sur del volcán donde se asienta la Laguna de Cuicocha, presenta una morfología alargada en sentido E-O, está afectada por fallas y corresponde a una caldera volcánica.

En este estudio se ha podido reconocer al Volcán Cotacachi como un volcán central a partir del cual varios centros de emisión se han desarrollado: Domos Muyurcu, Domo Loma Negra, Domo Piribuela, Domo Cuicocha, Caldera Cuicocha (Domos Wolf Norte y Sur, Domo Yerovi) y Domos satélite del flanco sur; todos estos forman un solo complejo volcánico llamado “Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha”.

Síntesis interpretativa de su evolución:

- 1)** Dataciones K/Ar sugieren que las primeras fases eruptivas del Cotacachi (COTACACHI I) tuvieron lugar hace al menos ~162 ka y continuaban a los ~108 ka, con erupciones importantes cuyos productos en superficie son potentes flujos de lava de composición andesítico - basáltica, intercalados con brechas volcánicas monolíticas andesíticas. Una base rocosa representada por andesitas basálticas magnesianas, podría constituir el punto de inicio de actividad del volcán Cotacachi, anterior a 162 ka y construido directamente sobre el Basamento Ígneo Cretácico. Un escarpe abierto hacia el NW del volcán y las rocas contenidas en su depósito, evoca la posibilidad que este primer edificio colapsó, dando lugar a una nueva etapa en la evolución del volcán.
- 2)** Comienza a levantarse el segundo edificio (COTACACHI II), constituido principalmente por andesitas. La actividad fue explosiva y sus evidencias son los grandes depósitos de flujos piroclásticos que se encuentran en su flanco SE.
- 3)** El segundo evento destructivo tiene lugar mientras se levanta el edificio de COTACACHI II, se lo asocia a un escarpe abierto hacia el NE del volcán y a un depósito

de avalancha de escombros expuesto en el río Ambi, la geoquímica de sus rocas incluye parte de las unidades COTACACHI I y II.

4) Varios domos (p.e., Cuicocha, Muyurcu, Loma Negra y Piribuela) se formaron en las periferias de Cotacachi, sus depósitos de tipo “Block and Ash Flow” se posicionan sobre toda la secuencia volcánica anterior que incluye los productos volcanoclásticos de COTACACHI I y II – VENTO CENTRAL. En el cráter varias coladas de lava superpuestas, cierran el período de actividad de COTACACHI II.

5) El domo Cuicocha al sur de Cotacachi, tuvo una gran explosión que lo destruyó y dejó una morfología de tipo “caldera” hace ~ 3,1 ka (hoy laguna de Cuicocha), seguida de actividad explosiva, que depositó flujos, oleadas y caídas piroclásticas.

6) El emplazamiento de los domos post-caldera Wolf y Yerovi, así como posibles depósitos volcanoclásticos posteriores marcan el final de la actividad del CVCC hasta el presente.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda incrementar el muestreo de rocas para análisis petrográficos, geoquímicos y cronológicos (p.e., dataciones) del Complejo Volcánico Cotacachi – Cuicocha, para fortalecer el conocimiento de la evolución y la actividad eruptiva de su volcán central (volcán Cotacachi).

Realizar el muestreo, análisis granulométrico y de componentes de los depósitos asociados a la actividad del volcán Cotacachi, para caracterizar sus dinamos eruptivos.

Realizar el estudio a detalle de la avalancha Noroccidental del Volcán Cotacachi, para establecer su potencial zona de origen y una edad relativa de ocurrencia del evento.

Definir los sistemas de esfuerzos asociados a las fallas presentes alrededor de la Caldera Cuicocha, para compararlo con el régimen de esfuerzos asociado a los sistemas de fallas que han afectado al edificio del volcán Cotacachi (p.e., Sistema de fallas Billecocha - Huayrapungo).

CAPÍTULO 6

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, D. (2009). The influence of active tectonics on the structural development and flank collapse of Ecuadorian arc volcanoes. Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur D'université. Université Blaise Pascal, France, 239 pp.

Aspden, J.A., McCourt, W.J. y Brook, M., (1987). Geometrical control of subduction-related magmatism; the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. *J. Geol. Sot. London*, Vol. 147, p. 893-905.

Barbieri, F., Coltelli M., Ferrara G., Innocenti F., Navarro J.M. and Santacroce R., (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine* 125 (1), 1-14

Bernard B, Robin C, Beate B, Hidalgo S. (2011). Nuevo modelo evolutivo y actividad eruptiva reciente del volcán Chachimbiro. Extended Abstract in the "7mas Jornadas en Ciencias de la Tierra", Escuela Politécnica Nacional, November 23–25, Quito (Ecuador), pp 119–122

Bernard, B. y Andrade, D. (2011). Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental. Quito: IG-EPN/IRD.

Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., Quijozaca, J. (2014). The 3640 – 3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bull Volcanol* (2014) 76:849, pp. 20, DOI 10.1007/s00445-014-0849-z.

Boland, M.P., Pilatasig, L.F., Ibadango, C.E. McCourt, W.J., Aspden, J.A., Hughes, R.A., Beate, B., (2000). Geology of the Western Cordillera between 0° - 1° N, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica, Informe No. 10. CODIGEM – BGS, 72 p. Quito – Ecuador.

Chiaradia, M., (2009). Adakite – like magmas from fractional crystallization and melting – assimilation of mafic lower crust (Eocene Macuchi arc, Western Cordillera, Ecuador). Elsevier, Vol 265, p. 468-487.

Clapperton, Ch. (1983). The Glaciation of the Andes. *Quaternary Science review*; Vol. 2; pp. 83 – 155.

Clapperton, Ch. (1986). Glacial Geomorphology, Quaternary Glacial Sequence and Palaeoclimatic Inferences in the Ecuadorian Andes. International Geomorphology, Part II; Edited by V. Gardiner; pp. 844 – 870.

Clapperton, Ch. y McEwan, C. (1985). Late Quaternary Moraines in the Chimborazo Area, Ecuador. Arctic and Alpine Research; Vol. 17; No. 2; pp. 135 – 142.

Clapperton, Ch. y Vera, R. (1986). The Quaternary glacial sequence in Ecuador: a re-interpretation of the work of Walter Sauer. Journal of Quaternary Science; Vol. 1; pp. 45 – 56.

Cole, J.W., Milner, D.M., Spinks, K.D. (2005). Calderas and caldera structures: a review. Earth-Science Reviews 69 (2005) 1 – 26.

Cotten, J., Le Dez, A., Bau, M., Carrof, M., Maury, R.C., Dulski, P., Fourcade, S., Bohn, M. et Brousse, R. (1995). Origin of anomalous rare-earth element and Yttrium enrichments in subaerial exposed basalts: Evidence from French Polynesia. Chemical geology 119, p. 115-138.

Ego, F., (1995a). Accomodation de la convergence oblique dans une chaine de type cordilleraire: Les Andes d'Equateur. These de Doctorat. Université Paris XI Orsay; 281 pp.

Ego, F., Sebrier, M., Lavenu, A., Yopez, H. y Egüez A., (1996). Quaternary state of stress in the northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes., Tectonophysics, 259, p. 101 – 136.

Egüez, A. y Aspden, J. (1993). The Meso - Cenozoic Evolution of the Ecuadorian Andes. Mem. Second International Symposium Andean Geodynamics; Ext. Abstract; Oxford – UK; pp. 179 - 181.

Egüez, A., (1986). Evolution Cenozoique de la Cordillere Occidentale Septentrionale d'Equateur (0°15'S–01°10'S), les Mineralisations Associees [Ph.D. thesis]: Paris, Université Pierre et Marie Curie, 116 p.

Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C., Dart, R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. International Lithosphere Program – USGS. May 2003 Version. Open-File Report 03-289.

- Egüez, A., Yepes H., (1993).** Estudios sismotectónicos y de peligro sísmico para el proyecto hidroeléctrico Chespi, Informe de 62 p., Quito, INECEL.
- Feininger, T., y Bristow, C.R. (1980).** Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geol. Rundsch.* 3, 849 – 874.
- Gill, J.B., (1991).** Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, p. 389, Berlin.
- Gill, R. (2010).** Igneous rocks and processes – A practical Guide. 472 pp.
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S. y Collot, J., (1999).** Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168, pp. 255 – 270.
- Hall, M., Samaniego, P., LePennec, J., y Johnson, J. (2008).** Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal*, 176, 1-6.
- Hall, M.L. (1977).** El volcanismo en el Ecuador. IPGH; Sección Nacional del Ecuador; Quito; pp. 95 – 96.
- Hall, M.L. y Beate, B. (1991).** El Volcanismo Plio – Cuaternario en los Andes del Ecuador. *Estudios de Geografía: El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana*; pp. 5 – 13.
- Hidalgo, S. (2006).** Les interactions entre magmas calco-alcalins “Classiques” et Adakitiques: Exemple du Complex Volcanique Atacazo-Ninahuilca (Equateur), Tesis Doctoral, Université Blaise Pascal, 333 p.
- Hillebrandt, C. (1989).** Estudio geovolcanológico del complejo volcánico Cuicocha-Cotacachi y sus aplicaciones, Provincia de Imbabura. Quito: EPN. Tesis de Maestría Escuela Politécnica Nacional. pp. 214.
- Hughes, R. y Bermúdez, R., (1997).** Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 0° 00' and 1° 00' S. Proyecto de Desarrollo minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y geológica. Informe No. 4. CODIGEM – BGS, 75 p. Quito Ecuador.
- Hughes, R.A. y Pilatasig, L., (2002).** Cretaceous and Tertiary Block accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador: *Tectonophysics*, Vol. 345, p. 29-48.
- Irvine, T. y Baragar, W., (1971).** A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, p. 523-548.

Kerr, A.C., Aspden, J.A., Tarney, J., Pilatasig, L.F., (2002). The nature and provenance of accreted oceanic Blocks in Western Ecuador: geochemical and tectonic constrains: *Journal of the Geological Society*, Vol. 159, p. 577-594.

Kunts, M. A., Rowley, P. D., MacLeod, N. S., Reynolds, R. L., McBroome, L. A., Kaplan, A. M., Lidke, D. J. (1981). Petrography and particle-size distribution of piroclastic-flow, ash-cloud, and surge deposits. The 1980 eruptions of Mount ST. Helens, Washington. Edited by Peter W. Lipman and Donal R. Mullineaux. U. S. GEOLOGICAL SURVEY PROFESIONAL PAPER 1250. p. 525 – 539.

Lebras, M., Megard, F., Dupuy, C., and Dostal, J., (1987). Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador: *Geological Society of America Bulletin*, v. 99, p. 69–578, doi: 10.1130/0016-7606(1987)99<569:GATSOP>2.0.CO; 2.

LePennec, J., Ruiz, A.G., Eissen, J., Hall, M., y Fornari, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene – early Holocene eruptions al Volcano Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and geothermal Research*, 206, 121-135.

Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallón Plate: *Tectonophysics*, v. 404, p. 237-264.

McCourt, W.J., Aspden, J.A., Brooks, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: Continental growth by multiple accretion: *Journal of the geological Society of London*, v. 141, p. 831-845.

McCourt, W.J., Duque, P. y Pilatasig, L.F., (1997). Geology of the Western Cordillera between 1° - 2° S, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológico, Informe No. 3, CODIGEM – BGS, 69 p. Quito – Ecuador.

Monzier M, Robin C, Hall, M.L., Cotton, J., Mothes, P., Eissen, J.P., Samaniego, P. (1997). Les adakites d'Équateur: modèle préliminaire. *Comptes Rendus Acad Sci, Paris*, 324 (IIa): pp 545–552.

Nelson, S. and Montana, A. (1992). Sieve textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. Department of Earth and Space Sciences, UCLA, Los Angeles, California 90024-1567, U.S.A. 8 pp.

Nocquet, J.M., Villegas – Lanza, J.C., Chlien, M., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrin, P., Cisneros, D., Alvarado, A., Audin, L., Bondoux, F., Martin, X., Font, Y., Régnier, M., Vallée, M., Tran, T., Beauval, C., Maguiña - Mendoza, J. M., Martinez, W., Tavera, H., Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature geoscience*, 7, 287-291.

OLADE/INECEL, (1980-1983). Estudio de reconocimiento de los recursos Geotérmicos de la República del Ecuador., Informe Geo-vulcanológico, Quito. pp. 55 – 64.

Pidgen, A. (2014). Cuicocha Volcano, Ecuador: reconstruction of major explosive phases through investigation of associated pyroclastic deposits.

Pierre Schiano., M. Monzier., J.-P. Eissen., H. Martin., K. T. Koga, (2010). Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contrib Mineral Petrol* (2010) 160: 297 – 312. Springer – Verlag 2009. DOI 10.1007/s00410-009-0478-2.

Rollinson, Hugh R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation. p. 108-109.

Sauer, W. (1965). Geología del Ecuador. Primera edición; Editorial del Ministerio de Educación; Quito; pp. 383.

Soulas, J.P., (1988). Informe de misión en el Ecuador., Proyecto UNDRO-EPN. Programa de prevención y planificación para desastres en el Ecuador y países vecinos. UNDRO, Geneve, Suisse, 21 p.

Soulas, J.P., Egüez, A., yepes, H. y Perz, V.H., (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes ecuatorianos y el extremo Sur de Colombia., *Bol. Geol. Ecuat*, 2, 1, p. 3-11.

Spikings, R.A., Winkler, W., Hughes, R.A., y Handler, R., (2005). Thermochronology of Allochthonous Blocks in Ecuador: unraveling the accretionary and post-accretionary history of the Northern Andes: *Tectonophysics*, Vol. 399, p. 195 – 220.

Stübel y Reiss, (1987). Las Montañas Volcánicas del Ecuador – Retratadas y descritas Geológica – Topográficamente por Alphons Stübel. Archivo Histórico del Banco Central del Ecuador - UNESCO. ISBN: 9978-43-567-0. pp 512 (36A, 36B, 37).

Stübel, A., (1886). Skizzen aus Ecuador. Asher Edition, Berlin, 176 pp.

Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., y Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*; Vol. 15; No. 2; pp. 157 – 171.

Vallejo, C., (2007). Evolution of the western cordillera in the Andes of Ecuador (late Cretaceous – Paleogene). Swiss federal institute of technology Zürich. Doctoral thesis ETH No. 17023, 145 p. Unpublished.

Van Thournout, F., (1991). Stratigraphy, magmatism and tectonism in the Ecuadorian northwestern cordillera: Metallogenic and Geodynamic implications. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 150 p.

Whymper, E. (1892). Viajes a través de los majestuosos Andes del Ecuador, colección Tierra Incógnita, No. 4. Edición corregida y aumentada de la versión española de C. Bahamonde, Quito, ediciones Abya-Yala, 1994, p. 448.

Wilson, M., (1994). Igneous petrogenesis. A global Tectonic Approach. Chapman y Hall London-Great Britain, 416 p.

Winter, T., and Lavenue, A., (1989b). Morphological and micro-tectonic evidence for a major active right lateral strike-slip fault across central Ecuador (South America). pp. 123-139.

Witt, C., Bourgois, J., Michaud, F., Ordoñez, M., Jimenez, M., Sosson, M., (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as a response to the north Andean Block tectonic escape. *Tectonics*, 25, TC 3017, doi: 10.1029/2004TC001723, 2006.

Wolf, T. (1892). Geografía y geología del Ecuador. Brockhaus, Leipzig. 671 pp. (1933). *Geography and geology of Ecuador* (Flanagan, J.W., transl.). Grand & Toy, Toronto. 684 pp.

MAPA GEOLÓGICO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO COTACACHI - CUICOCHA. PROVINCIA DE IMBABURA - ECUADOR



Director: Dr. Daniel Andrade.

Elaborado por: Marco Andrés Almeida Vaca.

Instituto Nacional de Investigación Geológica
Mariano Neaigüing

