Informe del mes de abril de 2026

Jorge Enrique Barón Vélez

Geólogo consultor- Petrógrafo

Magíster en Patrimonio Cultural - Universidad de los Andes

Proyecto FIAN - Documentación, estudios e intervenciones de los hipogeos en estado de conservación crítico en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro. ICANH

Entrega 4. Contexto geológico - Análisis científicos: petrografía y espectroscopía Raman - Entendimiento de la disgregación - Materialidad de los recubrimientos de origen natural y antrópico.

Tabla de contenido

1. Resumen. 3
2. Introducción y objetivos. 4
2.1 Generalidades 4
2.2 Características geomorfológicas del área y otros aspectos geológicos. 5
2.3 Unidades litológicas. 5
2.3.1 Miembro San Andrés de la Formación Popayán. 6
2.4 Objetivos 7
2.4.1 General. 7
2.4.2 Específicos. 7
3. Metodología 7
3.1 Equipo 7
3.2 Contexto de las muestras colectadas. 7
3.3 Procesamiento de las muestras. 8
3.4 Criterios de clasificación y descripción petrográfica 9
4. Resultados 9
4.1 Características petrográficas generales 9
4.2 Mecanismo de disgregación de la roca soporte de los hipogeos 11
4.3 Síntesis de procesos de alteración y deterioro 13
4.4 Resultados de los análisis científicos aplicados a los recubrimientos de origen antrópico y natural 15
4.5 Consideraciones sobre los recubrimientos de origen antrópico 15
4.6 Consideraciones sobre los recubrimientos naturales 16
4.6 Consideraciones sobre la procedencia de las materias primas de los recubrimientos antrópicos 17
5. Conclusiones 18
5.1 Respecto del origen y características constructivas de las rocas soporte de los hipogeos 18
5.2 Sobre la alteración y el deterioro de las muestras analizadas 19
5.2 Respecto de los recubrimientos antrópicos 19
5.2 Respecto de los recubrimientos naturales 20
5.2 Respecto de la procedencia de materiales 20
6. Recomendaciones 21
Bibliografía 22
Anexo 1. Petrografía 23
Anexo 2. Espectroscopía Raman 74

1. Resumen.

A partir del análisis petrográfico, se determinó que la roca soporte de los hipogeos de los Altos de Segovia y San Andrés es de origen volcanoclástico y corresponde a tobas no soldadas, en ocasiones con evidencia de retrabajamiento sedimentario. Estas rocas están constituidas esencialmente por fragmentos de diversa naturaleza, embebidos en una matriz particulada de carácter arcilloso y microcristalino. La litología analizada en ambas zonas geográficas presenta amplias similitudes texturales y composicionales; sin embargo, se reconocen diferencias sutiles.

Considerando en conjunto las características petrográficas de los ejemplares estudiados, se deducen dos estadios o etapas de alteración. Una **primera etapa** se relaciona con la transformación del vidrio volcánico, presente no solo como fragmentos, sino como partículas finas que constituyen la matriz de las rocas. Esto se manifiesta como disolución, liberación de iones (p.ej. Si, Al, Na, K, Ca, etc.), producción de un gel amorfo rico en sílice y aluminio y finalmente neoformación de minerales de arcilla. Si la dinámica descrita se perpetúa en el tiempo, se llega a la **segunda etapa** de alteración, la cual estará directamente relacionada con procesos de formación de suelos o pedogénesis. El desarrollo consiste en: apertura de grietas y microfracturas debido a expansión-contracción, generada por hidratación-deshidratación de arcillas, influenciada por ciclos de humectación y secado. A través de estos nuevos caminos de permeabilidad, se produce infiltración de fluidos desde el horizonte del suelo suprayacente a los hipogeos (iluviación), lo que da lugar progresivamente a la generación de arcilla secundaria (*clay cutans*), en conjunto con óxido de hierro y materia orgánica. Con el tiempo, el contenido de arcilla aumenta, produciendo desprendimiento de fragmentos (disgregación), lo que genera un material consistente pero blando y poco resistente y la estructura original de la fábrica de las rocas cambia, pasando de un armazón clasto-soportado a uno matriz-soportado.

De acuerdo con las evidencias macroscópicas y microscópicas obtenidas en los hipogeos del Alto de Segovia, se deduce que estos están localizados en un nivel equivalente al horizonte C de un perfil de suelo en desarrollo. Al comparar el grado de alteración de las rocas de Segovia y San Andrés, se reconocen etapas distintas dentro de una misma trayectoria evolutiva. Los rasgos observados indican que, en San Andrés, el material se encuentra en un estado más próximo al sustrato rocoso original, con menor influencia de procesos pedogenéticos en comparación con Segovia.

Con base en los resultados obtenidos con las técnicas analíticas de petrografía y espectroscopía Raman, se evidencia una recurrencia en la composición de los recubrimientos antrópicos, especialmente en las capas de enlucido. Las características microscópicas sugieren el uso de una técnica constructiva semejante y una posible procedencia común de las materias primas. Los componentes empleados incluyen arcilla, yeso en forma de cristales fragmentados, material volcanoclástico derivado de la desintegración de tobas no soldadas y posiblemente yeso finamente particulado. Se infiere que la técnica constructiva habría involucrado trituración, probable tratamiento térmico del yeso a baja temperatura para activar su capacidad de fraguado y amasado previo a la aplicación de la mezcla. En conjunto, estos rasgos apuntan a un conocimiento tecnológico por parte de los fabricantes. En cuanto a las capas pictóricas, se identificaron pigmentos negros (materia orgánica carbonizada y grafito), pigmento rojo (hematita) y pigmento café rojizo a amarillento correspondiente a arcilla naturalmente teñida con óxidos e hidróxidos de hierro.

Aunque el número de muestras analizadas es limitado y no necesariamente representativo, la comparación entre los recubrimientos antrópicos de los hipogeos de los Altos de Segovia y San Andrés permite identificar algunas diferencias en la materialidad y en la técnica constructiva.

2. Introducción y objetivos.

2.1 Generalidades

El Parque Arqueológico de Tierradentro, se ubica en la zona rural aledaña al municipio de Inza, más exactamente en la parte nororiental, y al sur de la Inspección de San Andrés de Pisimbalá, en el departamento del Cauca. Cerca de la Inspección de San Andrés, se encuentra la quebrada que lleva el mismo nombre y que tiene como afluentes las quebradas San Isidro, Cabuyo e Higuerón. Según García Núñez y Castro Guerra (2018), la microcuenca de la quebrada San Andrés (Figura 1), se localiza en zonas adyacentes a las coordenadas N (X)=777.350 y E (Y)=1.114.615, origen Oeste, a una altura de 1850 metros sobre el nivel del mar. El área está enmarcada por un entorno montañoso, con altitudes que oscilan entre 1.600 y 1.900 metros y los hipogeos están emplazados en diversos montículos entre los que se cuentan los altos de: Segovia, San Andrés, El Aguacate y El Duende (Figura 2).

El casco urbano del municipio de Inza se sitúa al oriente del departamento del Cauca, y dista 91 kilómetros de la ciudad de Popayán y 30 kilómetros del municipio de La Plata (Huila). Al sitio se puede llegar desde los dos lugares mencionados.

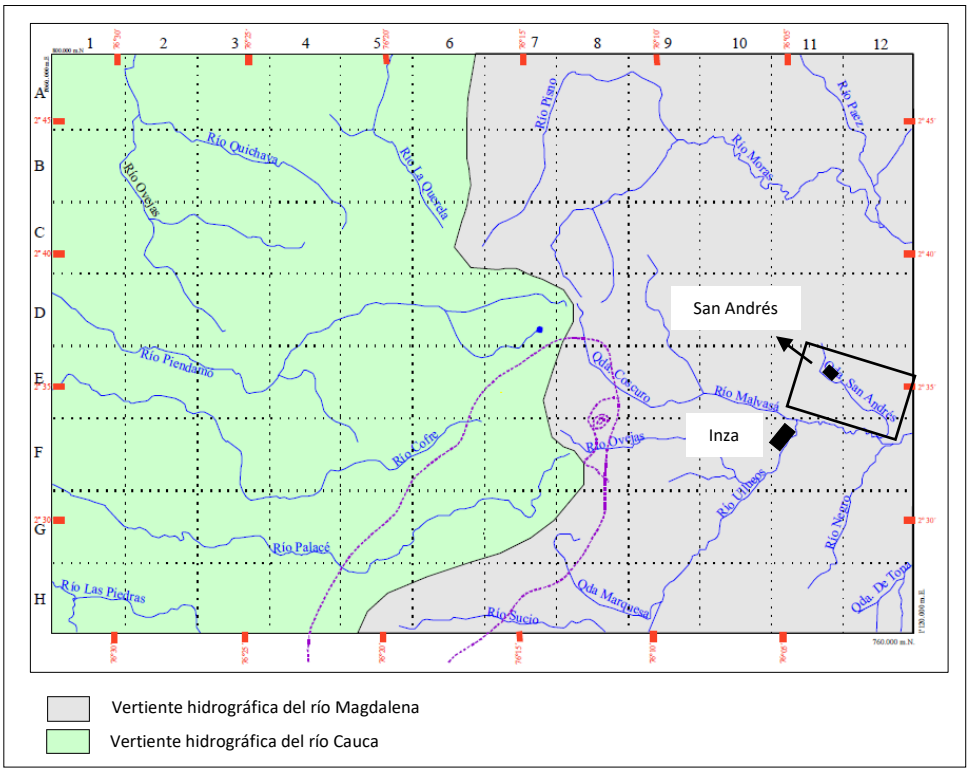


Figura 1. Mapa de la red hidrográfica de la plancha 343 Silvia. Resaltado en el recuadro negro se encuentran los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro. Fuente: Ruiz y Marquínez (2003), *Geología de la Plancha 343 Silvia*, escala 1:100.000, INGEOMINAS.

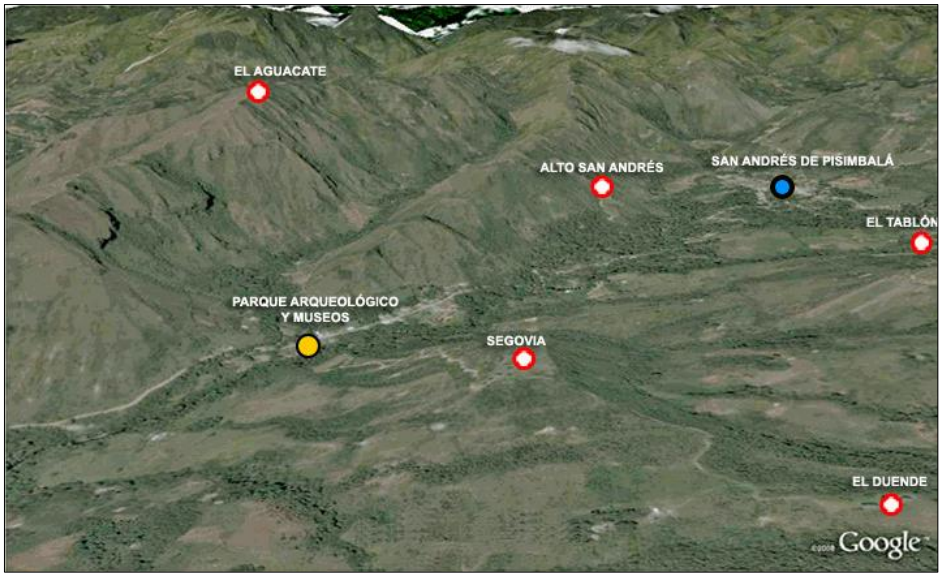


Figura 2. Vista panorámica de las zonas aledañas a la Inspección de San Andrés de Pisimbalá, en la que se pueden apreciar los altos del Aguacate, San Andrés, Segovia y El Duende. Fuente: *Tierradentro 3D* (2018).

2.2 Características geomorfológicas del área y otros aspectos geológicos.

García Núñez y Castro Guerra (2018) señalan que la microcuenca de la quebrada San Andrés, se ubica en una zona de alta pendiente, de origen estructural, caracterizada por una morfología de valles angostos en V, con laderas cortas a moderadas e inclinaciones superiores a 25°. La quebrada presenta una dirección preferencial NW–SE y drena sobre rocas de origen volcánico y esquistos del Complejo Cajamarca. Estas condiciones geomorfológicas y litológicas favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, particularmente flujos de detritos, los cuales pueden ser desencadenados por eventuales lluvias intensas.

El municipio de Inza es atravesado por varias fallas, entre las que se incluyen las de Inzá, El Molino, Calambayú, El Grillo y la del río Símbola. En particular la falla de Inzá, cruza la inspección de San Andrés de Pisimbalá y se considera una estructura antigua que marca el contacto entre las rocas paleozoicas del Complejo Cajamarca y las rocas cretácicas de la Formación Coquiyú (García Núñez & Castro Guerra, 2018).

2.3 Unidades litológicas.

Ruiz y Marquínez (2003), en la memoria explicativa de la Plancha 343 Silvia a escala 1:100.000, describen la geología regional del área, incluyendo rasgos estructurales y las principales unidades litoestratigráficas. Para el sector de interés, señalan la presencia de rocas con edades que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario y destacan que, en la zona de San Andrés de Pisimbalá, afloran rocas del Complejo Cajamarca, las cuales se encuentran cubiertas por vulcanitas asignadas a la Formación Popayán, así como en menor proporción, por depósitos coluviales y aluviales. Dentro del área comprendida por la Plancha 343 Silvia, la Formación Popayán constituye la unidad de mayor extensión superficial, desarrollándose sobre la Cordillera Central en el sector del páramo de las Delicias y extendiéndose hacia ambos flancos de la cordillera. Litológicamente, se encuentra subdividida en tres miembros: La Venta, Polindará y San Andrés.

2.3.1 Miembro San Andrés de la Formación Popayán.

De todos, el miembro San Andrés es el de mayor relevancia para el trabajo de investigación, debido a que en él se excavaron los hipogeos de Tierradentro (Figura 3). Está compuesto por rocas volcanoclásticas del neógeno y suprayace rocas de edades Cretácica (Formación Coquiyú) y paleozoica (Complejo Cajamarca).

Según Ruiz y Marquínez (2003), el miembro San Andrés corresponde a una secuencia volcanoclástica continua, dominada por **aglomerados de origen fluviovolcánico** asociados a flujos de ceniza y detritos. Estos depósitos se presentan en cuerpos con espesores que pueden alcanzar los 25 m y se intercalan, hacia la parte media de la sucesión, con niveles de **arenitas pumáceas** de tonalidad gris amarillenta pálida, cuyo tamaño de grano alcanza localmente la fracción lapilli.

Los aglomerados están conformados por clastos subangulares a subredondeados de andesitas, pórfidos andesíticos y rocas metamórficas, inmersos en una matriz de granulometría arena fina a gruesa compuesta por vidrio volcánico, cuarzo, biotita y fragmentos de pómez. Por su parte, **las arenitas pumáceas** presentan colores que varían desde gris claro hasta blanco amarillento o pardo claro, variación atribuida a procesos de oxidación de minerales ferromagnesianos. Su composición está dominada por granos de pómez, acompañados en menor proporción por biotita y cuarzo, dispersos en una matriz de ceniza volcánica. Estos niveles arenosos muestran un grado de soldadura de moderado a bueno, lo que favorece el desarrollo de laderas abruptas, casi verticales, rematadas por crestas planas y estrechas, rasgo morfológico distintivo del sector de San Andrés.

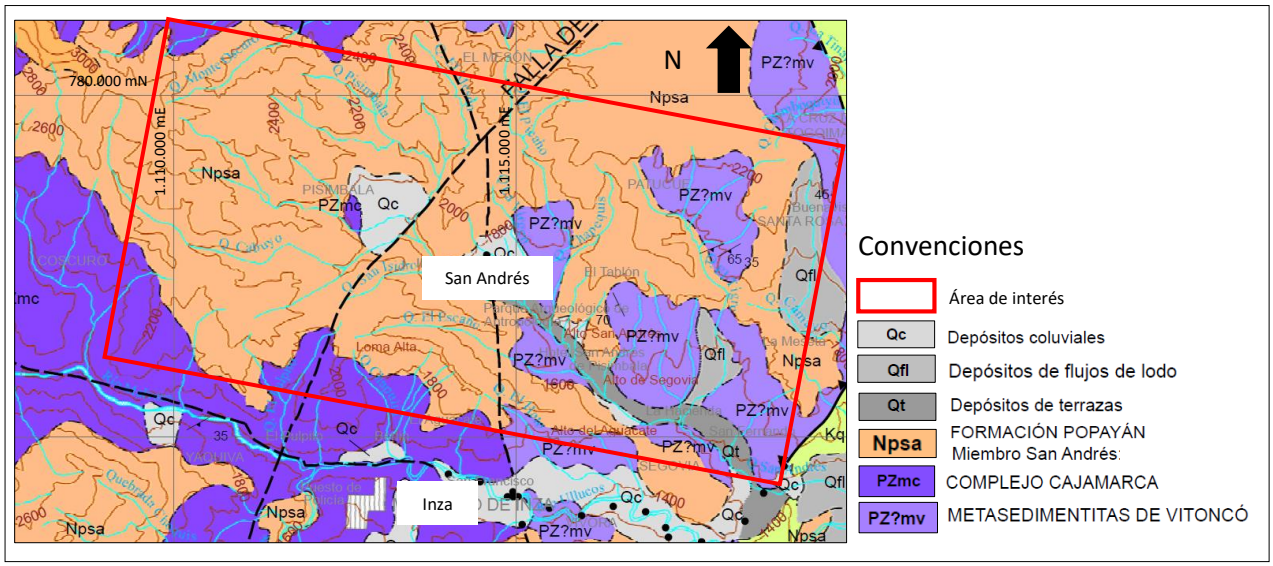


Figura 3. Mapa geológico del área de interés, localizada en los alrededores de San Andrés de Pisimbalá. Fuente: Ruiz y Marquínez (2002), *Geología de la Plancha 343 Silvia*, escala 1:100.000, INGEOMINAS (versión digital 2009). Base cartográfica IGAC.

2.4 Objetivos

2.4.1 General.

Caracterizar la roca soporte de los hipogeos de Tierradentro mediante petrografía y espectroscopía Raman, evaluando su grado de alteración. En muestras que incluyan capas de enlucido y/o película pictórica, inferir aspectos tecnológicos asociados a su elaboración, con el fin de aportar criterios técnicos para su conservación e intervención.

2.4.2 Específicos.

-Determinar las características texturales y composicionales de la roca soporte.
-Evaluar los procesos de alteración y deterioro, con énfasis en el mecanismo de disgregación.
-Analizar la materialidad y la técnica de elaboración en capas de enlucido y película pictórica.

3. Metodología

3.1 Equipo

La observación macroscópica detallada de las muestras colectadas, se llevó a cabo mediante una lupa binocular (estereomicroscopio) Zeiss Stemi 305, equipada con un sistema de zoom continuo que permite un rango de aumentos entre 8X y 40X. El equipo presenta una distancia de trabajo de 110 mm y una resolución máxima del orden de 2.5 µm.

El estudio petrográfico se realizó utilizando un microscopio polarizante Zeiss Axio Scope A1 Pol, provisto de cinco objetivos (2.5X, 5X, 10X, 20X y 50X), que permiten la observación en luz transmitida y reflejada, alcanzando aumentos efectivos comprendidos entre 25X y 500X.

La espectroscopía Raman empleada para analizar la materialidad de capas de enlucido y películas pictóricas, se efectuó con un microscopio Olympus BX41 (Horiba, modelo Xplora), equipado con objetivos de 10×, 50× y 100×, y con láseres de 532 nm, 638 nm y 785 nm. El sistema presenta un rango de desplazamiento Raman entre 50 y 4000 cm^{-1}.

3.2 Contexto de las muestras colectadas.

La mayor parte de los ejemplares extraídos están representados por pequeños fragmentos con orientación de perfil, destinados al examen de la microestratigrafía. Los especímenes están principalmente compuestos por soporte de roca con recubrimientos de origen natural y antrópico. Estos últimos pueden estar constituidos por capas de enlucido o por capas de enlucido suprayacidas por películas de pigmento. En menor proporción se obtuvieron muestras sin orientación, destinadas a evaluar procesos de deterioro asociados a disgregación y presencia de sales. La muestra 3, está formada por dos fragmentos (M3Ay M3B) que corresponden casi exclusivamente a recubrimientos desprendidos del soporte de roca y la 16 (M16-SA1), fue obtenida durante una de las visitas realizada el año pasado por el grupo del Proyecto FIAN (Tabla1).

Muestra	Código	Propósito	Alto	Tipo	Ubicación
1	M1-S10	Microestratigrafía	Segovia	Roca con enlucido y pigmento	Pilar 1-LadoB
2	M2-S10			Roca con capa negra	Pilastra 3
3	M3A-S12			Enlucido con pigmento	Nicho 4-Pared A
	M3B-S12			Enlucido con residuo de roca	Nicho 3
4	M4-S12			Roca con enlucido y pigmento	Nicho 5
5	M5-S12			¿Roca impregnada con sal?	Nicho 5-Base
6	M6-S21			Roca con capa negra	Pilar 1-ParedA
7	M7-S21			Roca con capa orgánica	Bóveda faltante
8	M8-S11			Roca con enlucido	Pilar 1
9	M9-S11	Deterioro		Roca impregnada con sal	Pilastra 4
10	M10-S5	Microestratigrafía		Roca con capa negra	Bóveda 2-Pared
11	M11-S5			Roca impregnada con sal	Bóveda 2-Pared
12	M12-SA1		San Andrés	Roca con enlucido	Nicho 2-Pared A
13	M13-SA1			Roca con enlucido y costra	Nicho 2-Pared D
14	M14-SA8			Roca con capa negra (delgada)	Pared bóveda
15	M15-SA8	Deterioro		Roca sin recubrimientos	Pared entrada
16	M16-SA1	Caracterización		Roca sin recubrimientos	Pilastra 2

Tabla 1. Muestras colectadas de hipogeos de Tierradentro para realizar análisis científicos.

3.3 Procesamiento de las muestras.

Antes de suministrar las muestras al laboratorio que fabrica los insumos necesarios para realizar los análisis científicos, ellas fueron fotografiadas y descritas empleando un estereomicroscopio. Debido a que los especímenes colectados se caracterizan por ser notoriamente delicados y friables, se optó por obviar la prueba con agua, así como la limpieza que usualmente se hace de ellos.

Los insumos empleados consisten en: (1) secciones delgadas, utilizadas tanto para petrografía como para espectroscopía Raman, y (2) montajes en portaobjetos de pequeños fragmentos desprendidos de los recubrimientos (naturales o de carácter antrópico), destinados exclusivamente al estudio por espectroscopía Raman.

Las secciones delgadas se elaboran impregnando las muestras en una resina epóxica teñida de azul, bajo condiciones de vacío. Esta resina proporciona cohesión a los materiales, dada su naturaleza deleznable, y permite resaltar la porosidad y la interconexión de los poros. Una vez endurecida, las muestras se adhieren a vidrios portaobjetos y se pulen con discos diamantados hasta alcanzar un espesor aproximado de 30 µm, lo que permite el paso de la luz y su observación en el microscopio de polarización.

Para los montajes de fragmentos de recubrimientos naturales o antrópicos, se sigue un procedimiento similar, aunque en este caso no es necesario emplear resina coloreada ni alcanzar un espesor específico de 30 µm.

Finalmente, una vez realizado el análisis de espectroscopía Raman, a las secciones delgadas se le añade un cubreobjetos para su posterior observación en el microscopio petrográfico.

3.4 Criterios de clasificación y descripción petrográfica

Considerando la naturaleza volcanoclástica del material estudiado, la clasificación textural se basó en los sistemas propuestos por Fisher (1961) y Schmid (1981), mientras que la clasificación composicional siguió el esquema de Schmid (1981). Para la nomenclatura de la escala de tamaño de grano se siguieron los criterios establecidos por Fisher (1966) y Schmid (1981). La descripción de cristales libres sin evidencias de fragmentación se realizó conforme a los lineamientos de Mackenzie et al. (1982), en tanto que para los granos fragmentados se aplicaron los criterios de redondez y esfericidad propuestos por Folk (1951) y Powers (1953).

4. Resultados

4.1 Características petrográficas generales

Las muestras escogidas para realizar la arqueometría, provienen de hipogeos de dos de los altos del Parque geológico de Tierradentro: Segovia y San Andrés (Ver Anexo 1 - Petrografía). De manera general, se puede afirmar que las rocas son de carácter volcanoclástico y corresponden a tobas no soldadas. Están constituidas esencialmente por fragmentos diversos, embebidos en una matriz (o material intersticial) particulada microcristalina.

La litología analizada de ambas zonas geográficas comparte muchas similitudes texturales y composicionales, no obstante, hay diferencias sutiles. Desde el punto de vista textural, el tamaño de los fragmentos corresponde a ceniza gruesa (según Schmid, 1981) y eventualmente a lapilli. Los clastos exhiben en general contornos muy angulares a angulares y forma elongada. La selección de las rocas del Alto de Segovia tiende a ser buena a moderada, mientras que las del Alto de San Andrés, moderada a pobre, debido a que en ellas hay más alta proporción de fragmentos gruesos. Con respecto al grado de redondeamiento, no es raro encontrar que los granos de mayor tamaño en las muestras de San Andrés, exhiban contornos subredondeados a bien redondeados, lo que apunta a que en esta zona los depósitos volcánicos fueron retrabajados por procesos sedimentarios.

Desde el punto de vista composicional, la población de fragmentos identificada en las rocas de los dos altos mencionados ostenta alta susceptibilidad a la alteración. Está representada por: (1) clastos de pumita y detritos de vidrio volcánico con microcristales incluidos; (2) cristales y fragmentos de cristales de plagioclasa, hornblenda, biotita y minerales opacos (ilmenita–magnetita); y (3) fragmentos líticos volcánicos variados, tanto cognados como accidentales, tales como: andesita, dacita y basalto. En las rocas de San Andrés, los fragmentos líticos incluyen además tobas soldadas, diorita y detritos metamórficos regionales con textura foliada (cuarcita, meta-areniscas, esquistos y meta-basitas). Aunque la mayoría de los granos se presentan frescos, los clastos de pumita ostentan en numerosas muestras evidencias de disolución y, en algunos casos, están prácticamente ausentes, lo que sugiere su remoción parcial o total durante los procesos de alteración.

La matriz de las rocas constituye un rasgo distintivo que permite diferenciar los materiales de los altos seleccionados para el estudio. En Segovia, está compuesta principalmente por minerales de arcilla de carácter secundario (Figura 4), dispuestos como recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), formados por procesos de iluviación asociados a la infiltración de fluidos desde el suelo suprayacente a los hipogeos. En algunos casos, se reconocen sectores relictos en los que la matriz consiste en una mezcla de arcilla y vidrio volcánico particulado, interpretados como remanentes del material aglutinante original. En San Andrés, el material intersticial se caracteriza por la presencia de minerales de arcilla

entremezclados con partículas de vidrio volcánico (Figura 5) que varían desde frescas hasta incipientemente devitrificadas o hidratadas.

Características de la matriz en la muestras del Alto de Segovia

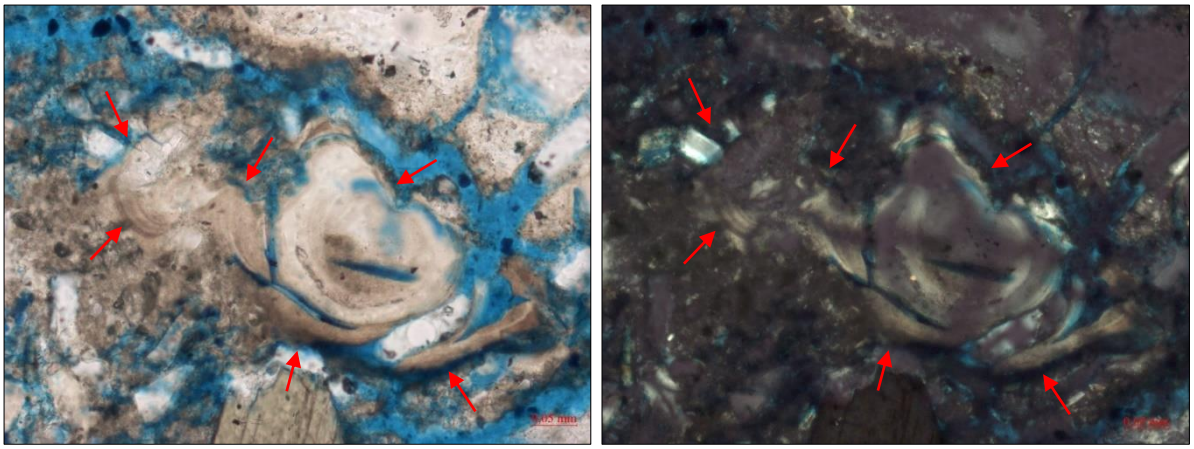


Figura 4. Muestra 2 (M2-S10). Detalle de arcilla secundaria dispuesta en la forma de recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), ocluyendo grietas y oquedades en las muestras del Alto de Segovia. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 0.62 mm.

Características de la matriz en la muestras del Alto de San Andrés

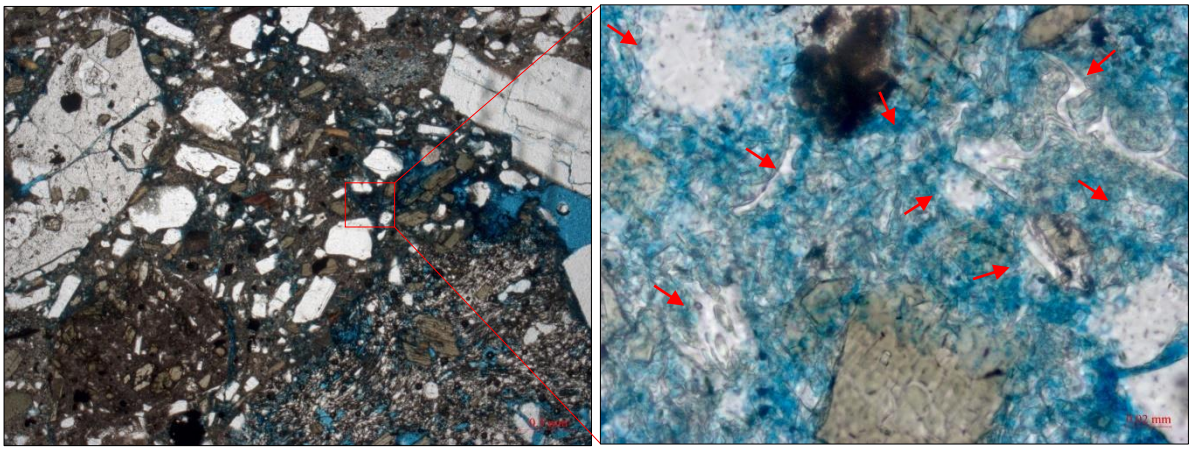


Figura 5. Muestra 16 (M16-SA1). Matriz formada por partículas frescas de vidrio volcánico (señaladas por flechas rojas), predominante en las muestras del Alto de San Andrés. Nicoles paralelos. Longitud de la fotografía izquierda: 5.2mm. Longitud de la fotografía derecha: 0.32 mm.

La porosidad es de carácter secundario y está representada por: (1) oquedades irregulares producidas por desprendimiento de material, (2) espacios primarios intrapartícula en clastos de pumita; (3) porosidad de matriz en medio de las finas partículas de vidrio volcánico, (4) intersticios generados por hidratación y posterior disolución del vidrio volcánico que forma la matriz y (5) grietas y microfracturas irregulares y circungranulares, producidas por contracción debida a deshidratación.

4.2 Mecanismo de disgregación de la roca soporte de los hipogeos

Considerando en conjunto las características petrográficas de los ejemplares analizados en las dos zonas de estudio (Segovia y San Andrés), se deducen dos estadios o etapas de alteración.

Una primera etapa se relaciona con la transformación del vidrio volcánico, presente no solo como fragmentos, sino como partículas finas que constituyen la matriz de las rocas. Esto se manifiesta como huellas de disolución en el interior de clastos de pumita (Figura 6) y como devitrificación, hidratación y disolución del material particulado de la matriz.

Evidencias de alteración de vidrio volcánico

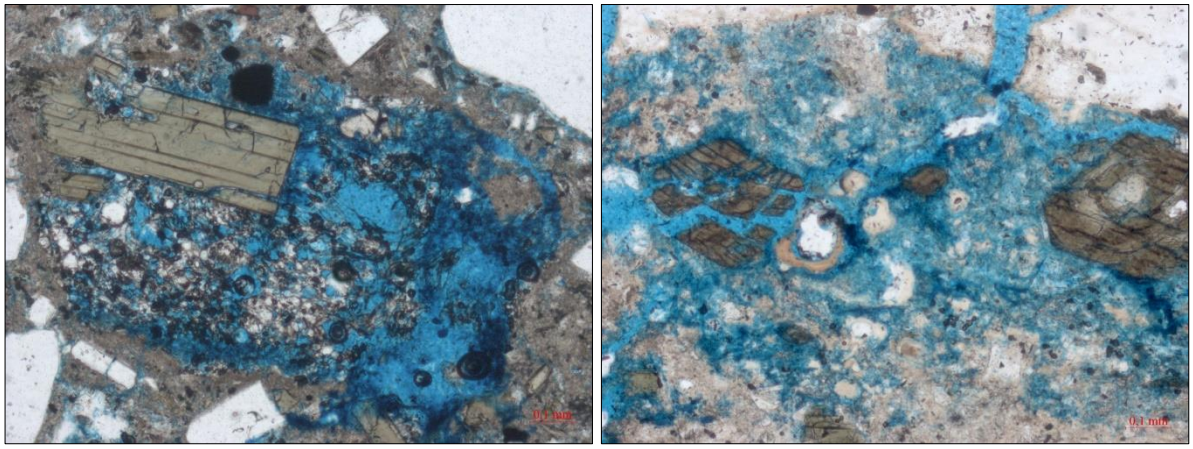


Figura 6. Izquierda: detalle de fragmento de pumita parcialmente disuelto (M16-SA1). Derecha: zonas azules en la matriz generadas por disolución (M2-S10). Nicoles paralelos. Longitud de las fotografías: 1.3mm.

La alteración tiende a iniciarse en el vidrio volcánico debido a que: (1) es en extremo susceptible al contacto con el agua, razón por la cual es considerado el material más inestable de todos y (2) los sectores donde se localiza el vidrio, por ser microporosos, coinciden con sitios de alta circulación de fluidos. El proceso ocurre debido a que este material por su carácter amorfo y químicamente desordenado, es propenso a adsorber agua hidratándose y debilitando su estructura. Al ocurrir esto, una parte se disuelve liberando iones (p.ej. Si, Al, Na, K, Ca, etc.), mientras que otra, evoluciona hacia un gel amorfo rico en sílice y aluminio. Este gel, en interacción con otros iones en solución, da lugar a la neoformación de minerales de arcilla (Figura 7).

Si la dinámica descrita se perpetúa en el tiempo, se llega a la **segunda etapa** de alteración, la cual estará directamente relacionada con procesos de formación de suelos o pedogénesis. Debido a ciclos naturales de expansión-contracción, generados por hidratación-deshidratación de arcillas, ocurre cambio volumétrico y apertura de espacios en la forma de grietas y microfracturas (Figura 7). A través de estos nuevos caminos de permeabilidad, se produce infiltración de fluidos desde el horizonte del suelo suprayacente a los hipogeos, lo que da lugar progresivamente a recubrimientos arcillosos en la forma de películas y masas concéntricas o alargadas (*clay cutans*), que terminan ocluyendo poros y aglutinando granos. Estos recubrimientos pueden desarrollarse en conjunto con óxido de hierro y materia orgánica que también son transportados por los fluidos percolantes (Figura 8). Con el tiempo, el contenido de arcilla aumenta, produciendo desprendimiento de fragmentos (disgregación), lo que genera un material consistente pero blando y poco resistente, la estructura original de la fábrica de las rocas cambia, *pasando de un armazón clasto-soportado a uno matriz-soportado*. En una fábrica flotante, la resistencia NO la otorga el contacto grano-grano, sino la matriz (Figura 9).

Apariencia de la matriz parcialmente transformada en minerales de arcilla

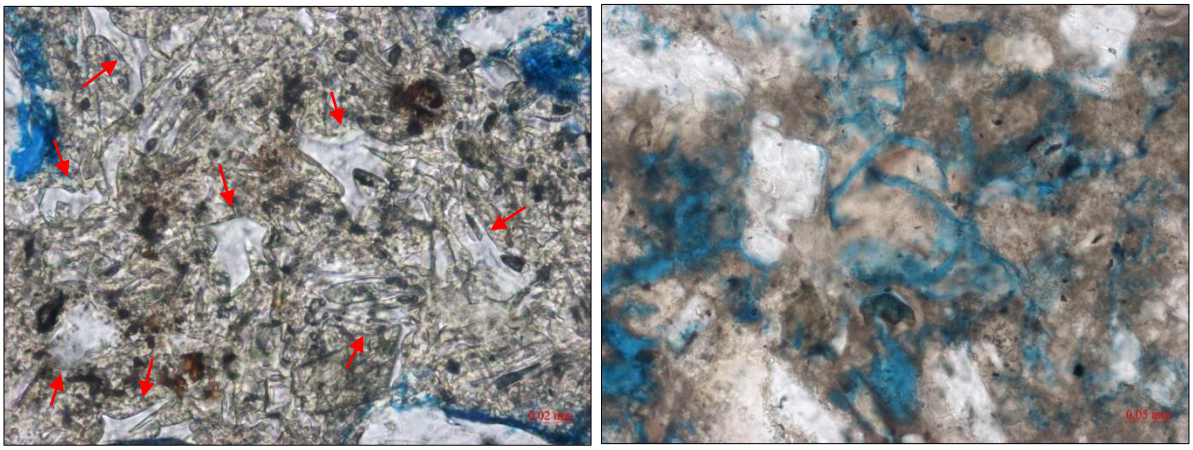


Figura 7. Izquierda: observe matriz constituida por partículas de vidrio volcánico (señalada por flechas rojas), embebidas en una masa de minerales de arcilla (M5-S12). Derecha: detalle de arcilla intersticial agrietada debido a expansión-contracción generada por hidratación-deshidratación (M1-S10). Nicoles paralelos. Longitud de la fotografía izquierda: 0.31 mm. Longitud de la fotografía derecha 0.62 mm.

Desarrollo de arcilla secundaria (clay cutans)

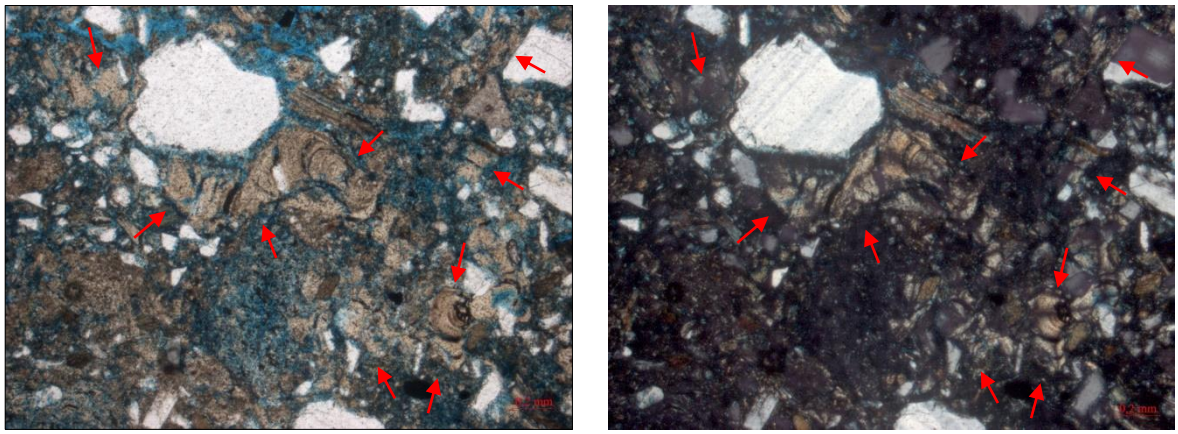


Figura 8. Muestra 6 (M6-S21). Ejemplo de arcilla secundaria, dispuesta como recubrimientos concéntricos (flechas rojas) producidos por infiltración de fluidos desde el horizonte de suelo suprayacente. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

La arcillosidad secundaria no solo tapiza paredes de poros de grietas y microfracturas, sino también canales generados por raíces y cavidades producidas por insectos. La depositación se produce principalmente por floculación atribuida a cambios en la química del fluido (modificación del pH por introducción de iones en el sistema). Al mecanismo que desarrolla los recubrimientos por infiltración vertical-floculación, típicos de perfiles de suelos, se le conoce como iluviación.

Cambio de la fábrica original de las rocas

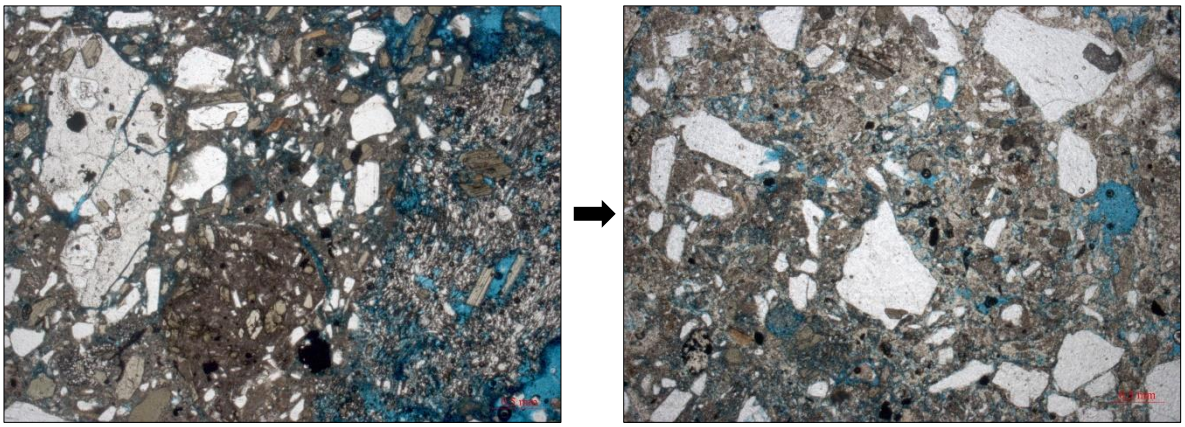


Foto 9. Ejemplo comparativo entre dos rocas de hipogeos con grado de alteración diferente. Observe en la foto Izquierda (M16-SA1), como los granos aparecen dispuestos en un arreglo clasto-soportado a matriz-soportado. Note en la foto derecha (M5-S12), como los fragmentos se encuentran completamente diseminados flotando en el material intersticial, que corresponde netamente a arcilla secundaria. Nicoles paralelos. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

De acuerdo con evidencias macroscópicas y microscópicas observadas y analizadas de muestras de los hipogeos en el Alto de Segovia, consistentes en indicadores de pedogénesis (raíces, resinas asociadas a raíces, galerías de insectos y recubrimientos arcillosos con óxido de hierro y materia orgánica) y de litología (aún se reconoce la estructura volcanoclástica de las rocas), se deduce que ellos se encuentran en el horizonte C del perfil del suelo que se está desarrollando en este momento.

Cuando se compara la naturaleza de la matriz de las rocas de Segovia y San Andrés, se identifican estados distintos dentro de una misma trayectoria evolutiva de alteración. En San Andrés, la presencia de vidrio volcánico fresco a incipientemente devitrificado o hidratado, asociado a minerales de arcilla, indica un sistema en el que la transformación del material original aún es incompleta. En contraste, en Segovia, la matriz está dominada por arcilla secundaria organizada en recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), lo que evidencia una etapa más avanzado de alteración, asociada a la incorporación de finos por iluviación y al reemplazo progresivo de la matriz volcánica original. Estos rasgos sugieren que, en San Andrés, el material se encuentra en un estado más próximo al sustrato rocoso original, con menor influencia de procesos pedogenéticos en comparación con Segovia.

4.3 Síntesis de procesos de alteración y deterioro

A partir de la integración de los resultados obtenidos mediante el análisis petrográfico y las observaciones de campo, se presentan dos esquemas que sintetizan los procesos de alteración y deterioro de las rocas de los hipogeos de Tierradentro (Tablas 2 y 3).

Alteraciones (cambios mineralógicos o fisicoquímicos del material)
• Disolución en fragmentos de pumita. • Disolución en la matriz de ceniza formada por partículas de vidrio volcánico. • Alteración del vidrio volcánico (pumita y matriz) a minerales de arcilla. • Aumento de arcillocidad por desarrollo de clay cutans generados por iluviación.
Procesos o mecanismos de deterioro
• Ciclos de humectación–secado (expansión–contracción). • Infiltración o circulación de agua. • Iluiviación de arcillas (formación de cutanes). • Acción biológica de raíces e insectos.
Manifestaciones de deterioro (daño observable)
• Apertura de porosidad por agrietamiento y microfracturamiento. • Ablandamiento y pérdida de competencia de la roca. • Disgregación del material. • Desprendimiento de fragmentos grandes. • Galerías de insectos. • Zonas humedecidas con desprendimiento asociado.
Deducciones o interpretaciones
• Apertura de porosidad por ciclos de humectación-secado. • Formación de recubrimientos (cutanes) por iluviación. • Zonas humedecidas por circulación de agua.

Tabla 2. Esquema conceptual de las transformaciones identificadas en las rocas de los hipogeos de Tierradentro.

Alteración primaria
• Disolución del vidrio volcánico. • Transformación a arcillas.
Alteración pedogenética
• Formación de recubrimientos arcillosos (clay cutans). • Aumento de arcillosidad.
Deterioro físico
• Microfracturamiento. • Aumento de porosidad. • Ablandamiento.
Deterioro estructural
• Disgregación. • Desprendimiento. • Colapso local.
Procesos activos
• Infiltración de agua. • Ciclos de humectación-secado. • Infiltración (Iluviación) de arcillas.

Tabla 3. Esquema jerárquico de los procesos de alteración y deterioro reconocidos en las rocas de los hipogeos de Tierradentro.

4.4 Resultados de los análisis científicos aplicados a los recubrimientos de origen antrópico y natural

A continuación, se presentan los resultados de la integración de las técnicas analíticas empleadas (petrografía y espectroscopía Raman) en el estudio de los recubrimientos de origen natural y antrópico presentes en la mayoría de las muestras de los hipogeos de Tierradentro (Tabla 4; Anexo 1-Petrografía; Anexo 2-Espectroscopía Raman).

Muestra	Código	Composición
1	M1-S10	**Capa blanca de enlucido**: arcilla / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
		Película de pigmento: óxido de hierro variedad hematita, entremezclado y teñido con materia orgánica amorfa y degradada.
2	M2-S10	**Recubrimiento**: capa arcillosa de origen natural, rica en materia orgánica.
3	M3A-S12	**Capa blanca de enlucido**: arcilla / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
		Capa pictórica: minerales de arcilla teñidos con óxido de hierro amorfo e hidratado (limonita).
	M3B-S12	**Capa blanca de enlucido**: arcilla (con evidencias de amasado) / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
4	M4-S12	**Capa blanca de enlucido**: arcilla (con evidencias de homogenización incompleta) / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
		Película de pigmento: Materia orgánica carbonizada.
6	M6-S21	**Recubrimiento**: capa arcillosa de origen natural, rica en materia orgánica.
7	M7-S21	**Recubrimiento**: capa arcillosa de origen natural, rica en materia orgánica.
10	M10-S5	**Recubrimiento**: capa arcillosa de origen natural, rica en materia orgánica.
12	M12-SA1	**Capa blanca (a crema) de enlucido**: arcilla / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
13	M13-SA1	**Capa 1 de enlucido de color crema**: arcilla / fragmentos de yeso / material volcanoclástico (toba) finamente particulado / presencia probable de yeso triturado.
		Capa 2 de enlucido de color blanco a crema: cristales de yeso fibroso / ocasionales fragmentos de yeso microcristalino / probable yeso triturado.
		Recubrimiento: óxido de hierro variedad hematita, mezclado con eventuales micas finas o minerales de arcilla.
14	M14-SA8	**Capa blanca (a crema) de enlucido**: arcilla / fragmentos de yeso / presencia probable de yeso triturado.
		Capa pictórica: fragmentos de rocas metamórficas con carbono grafitizado o grafito pobremente cristalino / minerales de arcilla / fragmentos de yeso / presencia probable de yeso triturado.

Tabla 4. Resultados de los análisis científicos (petrografía y espectroscopía Raman) aplicados a los recubrimientos de origen natural y antrópico.

4.5 Consideraciones sobre los recubrimientos de origen antrópico

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia una recurrencia en la materialidad de los recubrimientos antrópicos, particularmente en las capas de enlucido, lo cual permite plantear las siguientes consideraciones generales:

(1) Las características microscópicas de recubrimientos provenientes de distintos hipogeos, sugieren el uso de una técnica constructiva semejante y una posible procedencia común de las materias primas, aparentemente de origen local.

(2) Los materiales empleados en los morteros de enlucido incluyen arcilla, yeso en forma de cristales fragmentados, material volcanoclástico derivado de la desintegración de tobas no soldadas y probablemente yeso triturado.

(3) Los morteros con predominio de arcilla, posiblemente fueron utilizados para la homogenización de superficies irregulares.

(4) Aquellos con mayor proporción de yeso probablemente actuaron como aglomerantes con fraguado.

(5) La técnica constructiva involucró: (i) trituración de materiales, (ii) posible tratamiento térmico del yeso a baja temperatura (120–180 °C) para activar su capacidad de fraguado y (iii) amasado previo a la aplicación de la mezcla. En conjunto, estos rasgos sugieren un conocimiento tecnológico por parte de los fabricantes.

(6) En cuanto a la materialidad de las capas pictóricas, se identificaron: (i) pigmentos **negros** consistentes en materia orgánica carbonizada (carbón) y grafito; (ii) pigmento **rojo** representado por hematita; y (iii) pigmento **café rojizo-amarillento** correspondientes a arcilla naturalmente teñida con óxidos e hidróxidos de hierro.

(7) Aunque el número de muestras analizadas es limitado y no necesariamente representativo, la comparación entre los recubrimientos antrópicos de los hipogeos de los Altos de Segovia y San Andrés permite identificar algunas diferencias en la materialidad y en la técnica constructiva. En los ejemplares de Segovia se reconoce, de manera consistente, una sola capa de enlucido. En San Andrés, si bien la mayoría de las muestras analizadas también presentan un único nivel, en uno de los casos se identifican dos capas superpuestas (M13-SA1). En este ejemplar, la capa basal muestra mayor contenido arcilloso y carácter más granular, lo que sugiere una función de relleno y regularización de la superficie, mientras que la capa superior es relativamente más rica en material particulado de yeso y más pobre en fracción volcanoclástica. Cuando solo se reconoce una capa en las muestras de San Andrés, esta tiende a presentar características similares a las descritas para el nivel superior de la muestra 13. Adicionalmente, se observan diferencias en la composición del pigmento negro: en Segovia está asociado a materia orgánica carbonizada, mientras que en San Andrés corresponde a grafito.

4.6 Consideraciones sobre los recubrimientos naturales

Todos los recubrimientos naturales identificados están relacionados al proceso pedogenético de iluviación reconocido en los hipogeos del Alto de Segovia. Aunque comparten un origen común, cada tipología ha generado efectos de deterioro diferenciados. Están representados por:

(1) **Compuestos orgánicos disueltos**: generan manchado en la superficie de los enlucidos.

(2) **Capas delgadas formadas por arcilla y compuestos orgánicos**: recubren los enlucidos y favorecen procesos de deterioro bajo ciclos de humectación y secado.

(3) **Óxidos e hidróxidos de hierro:** dan lugar a manchas y coberteras, que contribuyen a la oclusión de poros y al deterioro superficial del enlucido.

4.6 Consideraciones sobre la procedencia de las materias primas de los recubrimientos antrópicos

En contextos constructivos preindustriales, la obtención de materias primas suele estar condicionada por la disponibilidad local y las limitaciones de transporte, lo que favorece el aprovechamiento de recursos cercanos al sitio de construcción, aunque no se descartan excepciones.

Para las capas de enlucido de tonalidad clara (de color blanco o crema), en las que se reconocen fragmentos de yeso cristalino y se deduce su presencia en forma finamente particulada, se propone como posible fuente la Formación Coquiyú, de edad cretácica, compuesta por rocas sedimentarias representadas por calizas, lodolitas calcáreas, limolitas calcáreas, shale y chert. En esta unidad se han reportado yacimientos de baritina (sulfato de bario), los cuales pueden coexistir con otros sulfatos como yeso o celestina, por lo que no se descarta su ocurrencia. Esta formación aflora en las proximidades de los hipogeos, particularmente en la vereda La Muralla, a lo largo del camino que conduce de Carmen de Viboral al Pedregal, pasando el río Negro (Figura 10).

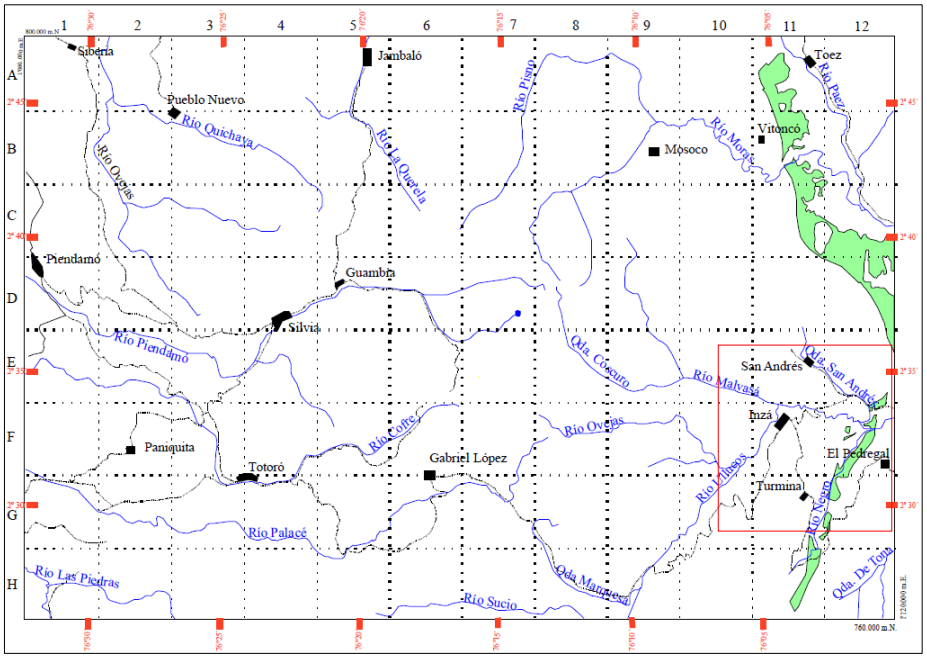


Figura 10. Mapa geológico del sector cercano a los hipogeos (recuadro rojo) en donde aflora la Formación Coquiyú, resaltar con el color verde. Fuente: Ruiz y Marquínez (2003), *Geología de la Plancha 343 Silvia*, escala 1:100.000, INGEOMINAS.

Para la capa pictórica de la muestra 14 (M14-SA8), de color negro debido a la presencia de grafito procedente de pequeños fragmentos de rocas metamórficas trituradas, se propone como fuente de materiales el Complejo Cajamarca, de edad paleozoica, conformado por esquistos verdes, **esquistos negros**, esquistos cuarzo micáceos y cuarcitas. También se observan **filitas carbonosas** y calcáreas, metalimolitas, metachert y esquistos sericíticos en el río Ullucos y en los alrededores de Inzá (Figura 11).

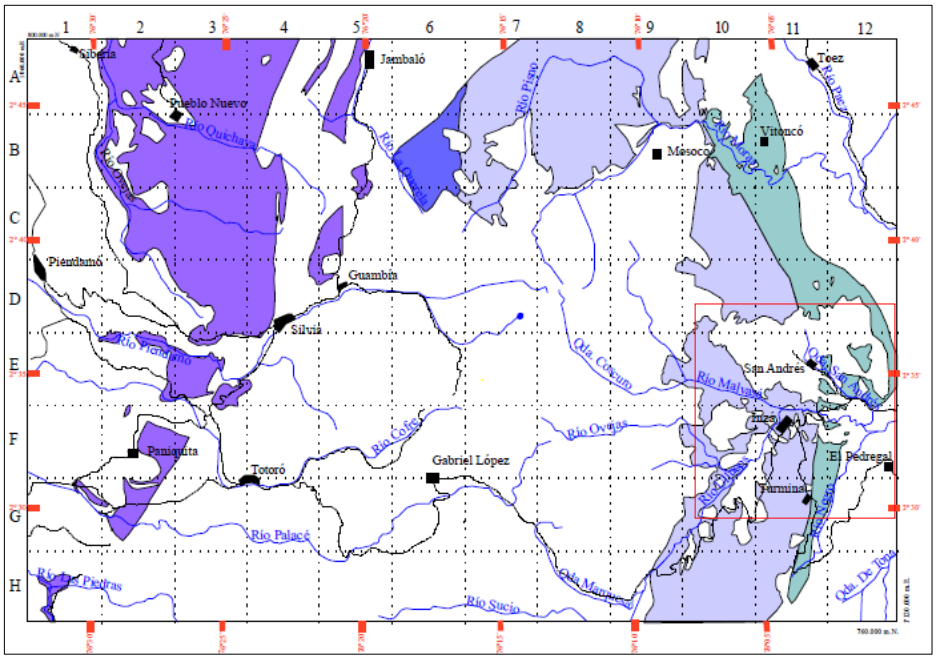


Figura 11. Mapa geológico del sector cercano a los hipogeos (recuadro rojo) en donde aflora el Complejo Cajamarca, resaltado por los colores violeta y verde. Fuente: Ruiz y Marquínez (2003), *Geología de la Plancha 343 Silvia*, escala 1:100.000, INGEOMINAS.

5. Conclusiones

5.1 Respecto del origen y características constructivas de las rocas soporte de los hipogeos

-Las rocas soporte de los hipogeos corresponde a una sucesión volcanoclástica heterogénea, integrada por depósitos piroclásticos no soldados y niveles retrabajados por procesos sedimentarios de alta energía, lo que explica la variabilidad litológica observada entre los distintos sectores.

-La presencia alternante de tobas no soldadas y depósitos fluvio-volcánicos, indica que la secuencia se formó mediante la interacción de procesos eruptivos y de retrabajamiento gravitacional e hídrico posteriores (p. ej.: derrumbes, transporte fluvial, flujos densos (lahares)).

-La excavación y labrado de los hipogeos estuvo favorecida por las propiedades petrofísicas del sustrato rocoso, particularmente su baja cohesión, elevada porosidad y carácter friable.

-Los procesos de alteración posteriores a la construcción de los hipogeos, han intensificado progresivamente la pérdida de cohesión del sustrato, aumentando su susceptibilidad al deterioro y desprendimiento.

5.2 Sobre la alteración y el deterioro de las muestras analizadas

-La combinación de materiales mineralógicamente inestables, baja cohesión original, alta porosidad y elevada permeabilidad confiere a las rocas una marcada susceptibilidad a la alteración.

-Debido a su naturaleza friable y a la abundancia de vidrio volcánico distribuido tanto en la matriz como en los fragmentos pumíticos, las rocas han sufrido hidratación, disolución y transformación progresiva a minerales de arcilla por circulación de agua.

-La alteración del vidrio volcánico y su transformación a arcillas favorecieron inicialmente la estabilización del conjunto granular al actuar como material ligante e impedir la dispersión de partículas finas; sin embargo, este proceso produjo simultáneamente una disminución de la competencia mecánica de la roca.

-Los ciclos de humectación y secado asociados a la hidratación–deshidratación de las arcillas generaron expansión–contracción, cambio volumétrico y apertura de grietas y microfracturas, incrementando la permeabilidad de las rocas.

-A través de estas grietas y microfracturas ocurrió infiltración e iluviación de arcillas, ocasionalmente acompañadas por óxidos de hierro, formando clay cutans que ocluyeron poros, fomentaron la disgregación del conjunto granular y reemplazaron progresivamente la matriz arcillosa originalmente generada por alteración del vidrio volcánico.

-El incremento de los ciclos de humectación y secado, posiblemente intensificado por cambios recientes en el régimen climático, ha favorecido la acumulación progresiva de arcilla iluviada y ha producido la modificación de la fábrica original de algunas de las rocas, que pasó de clasto-soportada o levemente matriz-soportada a enteramente matriz-soportada. Como resultado, se ha generado una litología relativamente consistente, pero blanda y mecánicamente débil, susceptible a pérdida de cohesión, desprendimientos y colapso local.

-Con base en indicadores litológicos y pedogenéticos identificados, se infiere que los hipogeos analizados en el Alto de Segovia, forman parte del perfil de meteorización y suelo desarrollado superficialmente, correspondiendo más específicamente al horizonte C.

5.2 Respecto de los recubrimientos antrópicos

-Los recubrimientos antrópicos analizados evidencian el empleo de una tradición constructiva coherente, basada en el uso combinado de materias primas locales y en procedimientos técnicos recurrentes, lo que sugiere la existencia de prácticas estandarizadas en la elaboración de enlucidos y capas pictóricas en los hipogeos.

-La composición de los morteros y la diferenciación funcional entre sus componentes sugieren un manejo intencional de los materiales, en el que la arcilla podría haber sido utilizada para la regularización de superficies, mientras que el yeso habría desempeñado un papel como posible aglomerante de fraguado, lo que apunta a un conocimiento empírico de sus propiedades físicas y químicas.

-La técnica constructiva inferida, que incluye trituración, posible activación térmica del yeso y amasado previo a la aplicación, pone de manifiesto un nivel de conocimiento tecnológico por parte

de los constructores, orientado al control de las propiedades del material y su comportamiento una vez aplicado.

La materialidad de las capas pictóricas revela el uso tanto de pigmentos minerales como de materiales naturales localmente disponibles, incluyendo compuestos carbonosos, rocas de color negro trituradas ricas en grafito, óxidos de hierro y arcillas ferruginosas teñidas, lo que sugiere una estrategia flexible en la obtención de colorantes, no limitada al uso de fases minerales puras.

Finalmente, las diferencias identificadas entre los recubrimientos de los Altos de Segovia y San Andrés, aunque basadas en un número limitado de muestras, apuntan a variaciones en la selección de materiales y en la configuración de los enlucidos, lo que podría reflejar adaptaciones locales, disponibilidad diferencial de recursos o posibles particularidades en las prácticas constructivas.

5.2 Respecto de los recubrimientos naturales

-Los recubrimientos naturales identificados en los hipogeos están estrechamente vinculados a procesos pedogenéticos, en particular a la iluviación de compuestos orgánicos y minerales finos desde el suelo suprayacente, lo que evidencia una interacción activa entre el suelo del entorno y las superficies intervenidas.

-La presencia de capas arcillosas ricas en materia orgánica sobre los enlucidos, indica la incorporación progresiva de materiales finos que, además de modificar el aspecto superficial, favorecen la retención de humedad y potencian los efectos de los ciclos de humectación y secado, contribuyendo al deterioro del material.

-La acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro, manifestada en forma de manchas y coberteras, refleja procesos de movilización y precipitación de hierro dentro del sistema, los cuales inciden en la oclusión de la porosidad y en la alteración superficial de los enlucidos.

-En conjunto, estos recubrimientos no solo constituyen manifestaciones visibles de procesos naturales, sino que actúan como agentes activos en la evolución del deterioro, al modificar las condiciones físicas y químicas de la superficie de los enlucidos.

5.2 Respecto de la procedencia de materiales

-La selección de materias primas para la elaboración de los recubrimientos antrópicos sugiere un patrón de aprovisionamiento local.

-Las características mineralógicas de los enlucidos, en particular la posible presencia de yeso en formas cristalinas y finamente particuladas, son compatibles con probables fuentes de minerales incluidas en rocas sedimentarias cercanas, como la Formación Coquiyú aflorantes en el área de estudio, lo que respaldaría la hipótesis de un aprovechamiento de recursos disponibles en el entorno inmediato.

-De manera análoga, la identificación de grafito en capas pictóricas negras, apunta al uso de rocas metamórficas regionales como fuente de materia prima, lo que demuestra el conocimiento y aprovechamiento de distintas litologías presentes en el paisaje circundante.

6. Recomendaciones

-Minimizar las fluctuaciones de humedad dentro de los hipogeos, ya que los ciclos de humectación y secado favorecen la expansión–contracción de las arcillas y el desarrollo de grietas. Para ello, se recomienda implementar monitoreo continuo de humedad relativa y temperatura mediante sensores ubicados tanto en la entrada como en el interior de los recintos, con el fin de identificar gradientes y variaciones estacionales.

-Mantener una ventilación suave, estable y controlada. Una mayor ventilación no necesariamente es beneficiosa, pues las corrientes directas y el efecto túnel pueden intensificar el secado, aumentar las fluctuaciones de humedad y acelerar el deterioro. Los cobertizos existentes no deberían retirarse de manera abrupta; por el contrario, se recomienda evaluar su funcionamiento y, de ser necesario, rediseñarlos para lograr un balance adecuado entre protección y ventilación.

-Controlar la infiltración de agua y el drenaje superficial alrededor de los hipogeos, evitando la entrada directa de escorrentía hacia los recintos y minimizando la circulación de agua a través de grietas y microfracturas.

-Implementar medidas de control biológico, particularmente frente al crecimiento de raíces y a la actividad de insectos u otros organismos que puedan abrir nuevas vías de permeabilidad y facilitar la infiltración de agua.

-Evitar intervenciones agresivas o la aplicación de consolidantes sin estudios previos detallados. Debido a la elevada sensibilidad de las rocas a los cambios de humedad, cualquier intervención podría modificar el equilibrio hídrico interno o producir sellamiento excesivo, agravando los procesos de alteración y deterioro en lugar de mitigarlos.

Bibliografía

-Fisher, R. V. (1961). Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks. Geological Society of America Bulletin, 72(9), 1409–1414. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1409:PCOVSA]2.0.CO;2

-Fisher, R. V. (1966). Rocks composed of volcanic fragments and their classification. Earth-Science Reviews, 1, 287–298.

-Folk, R. L. (1951). Stages of textural maturity in sedimentary rocks. Journal of Sedimentary Research, 21, 127–130.

-García Núñez, J. R., & Castro Guerra, J. A. (2018). Evaluación geológica y de daños por flujo de detritos en la microcuenca de la quebrada San Andrés y recomendaciones para la construcción de puentes y obras de protección, sector Parque Arqueológico Tierradentro, municipio de Inzá, departamento del Cauca [Informe técnico]. Servicio Geológico Colombiano.

-Mackenzie, W. S., Donaldson, C. H., & Guilford, C. (1982). Atlas of igneous rocks and their textures. Wiley.

-Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research, 23, 117-119.

-Ruiz, S., & Marquínez, G. (2002). Geología de la plancha 343 Silvia (Escala 1:100.000) [Mapa geológico]. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear – INGEOMINAS. Versión digital 2009.

-Ruiz, S., & Marquínez, G. (2003). Geología de la plancha 343 Silvia (Escala 1:100.000) [Memoria explicativa]. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear – INGEOMINAS.

-Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geology, 9(1), 41–43. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1981)9<41:DNACOP>2.0.CO;2

-Tierradentro 3D. (2018). Localización de los hipogeos en el paisaje montañoso del Parque Arqueológico Tierradentro [Mapa panorámico]. https://tierradentro3d.com/index.html

Anexo 1. Petrografía

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 1	M1-S10

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm, eventualmente 0.5 - 0.99 mm) / ***Selección:** buena a moderada / ***Composición:** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Otras características:** presencia de parches irregulares negros. ¿Posible óxido de hierro? / ***Enlucido:** capa delgada de color blanco / ***Pigmento:** películas de pigmento de colores negro y rojo.



Figura 1. Observe aspecto granular marcado de la muestra y capa blanca de enlucido superpuesta por película de pigmento rojo entremezclada y/o cubierta por manchas de color negro (¿pigmento?). Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: fábrica heterogénea, con dominios principalmente matriz-soportados y en menor proporción clasto-soportados.
- Orientación primaria: ausencia de alineación preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: detritos sin deformación, no se reconocen clastos de pumita con deformación plástica.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.23 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.06 - 0.71 mm (ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular.
- Forma: predominantemente elongada, localmente subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: predominantemente flotantes; por sectores clastos dispuestos en contactos puntuales.
- Selección: buena

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (%):
- Cristales y fragmentos de cristales (30.9%): cristales incompletos frescos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita y granos opacos (tipo ilmenita y magnetita).

- Fragmentos de roca cognados y accidentales (2.1%). Se trata de líticos de origen volcánico consistentes en fragmentos de andesita (con textura microporfirítica) y rocas volcánicas lávicas con textura microcristalina.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)

El material intersticial (65.2%) se encuentra homogéneamente distribuido, constituye la fase que aglutina la porción fragmentaria de la roca y corresponde fundamentalmente a minerales de arcilla. Con base en sus características ópticas, se infiere que parte de esta fracción se originó por alteración de vidrio volcánico finamente particulado que formaba la matriz original, mientras que otra parte corresponde a arcilla infiltrada (por iluviación) desde los horizontes suprayacentes del suelo, lo que evidencia un reemplazo progresivo de la fábrica primaria por una fábrica con matriz arcillosa secundaria.

2.3. Otros

- Materia orgánica (1.8%): se presenta como masas amorfas distribuidas de manera discontinua, rellenando poros y microfisuras. En sectores superficiales, este material se concentra principalmente en la capa antrópica, tanto en el nivel de tonalidad clara como en la interfaz inmediatamente subyacente al pigmento rojo. Asimismo, se observa que los residuos orgánicos puede recubrir, englobar o superponerse parcialmente al pigmento.

3. Clasificación

3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)

Toba de ceniza, no soldada.

3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)

Toba cristalina-lítica.

4. Porosidad e interconexión de los poros

- Tipos de poros (21%): (1) oquedades amorfas por caída o desprendimiento de material (fragmentos y/o matriz) y (2) grietas y microfracturas irregulares atribuidas a deshidratación de la arcilla congregada en la matriz.
- Conectividad: nula a tortuosa.

5. Alteración e implicaciones para la conservación.

La alteración principal se interpreta como la transformación de la matriz original de la roca en minerales de arcilla, la cual habría estado constituida por partículas de vidrio volcánico. Adicionalmente, se reconocen recubrimientos arcillosos concéntricos (*clay cutans*), cuya presencia sugiere procesos de iluviación asociados a la infiltración de material fino desde horizontes superiores del suelo.

6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

- Características: sobre el soporte rocoso se reconocen dos recubrimientos de origen antrópico que a simple vista consisten en: (i) una capa de mortero inferior, de tonalidad blanca y (ii) una película delgada, superpuesta, de colores rojo y negro. ***La capa blanca*** presenta un espesor variable entre 0.5 y 0.9 mm y está constituida por: (1) posibles fragmentos de yeso, consistentes en: cristales aislados, clastos fibrosos y agregados microcristalinos; (2) fragmentos de toba (detritos de plagioclasa); y (3) una matriz fina cuyas características ópticas sugieren la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. La matriz exhibe dos niveles superpuestos: un nivel superior, que forma una banda inmediatamente subyacente al pigmento, en el que predomina la arcilla sobre los otros componentes, y un nivel inferior homogéneo. En algunos sectores, ambos niveles se observan parcialmente entremezclados. ***La capa pigmentaria*** presenta espesor entre 0.08 y 0.7 mm. El color rojo se asocia a hematita, mientras que el color negro, corresponde a materia orgánica no carbonizada.

Observaciones y deducciones: la presencia de fragmentos yeso en la capa blanca, sugiere su posible uso como material aglutinante. Siguiendo esta línea argumentativa, es probable que haya sido sometido a un tratamiento térmico previo a baja temperatura (120–180 °C), para favorecer

su capacidad de fraguado. Por otra parte, la distribución y morfología del material orgánico, concentrado tanto por encima como por debajo de la película de pigmento y asociado a poros y microfisuras, apunta a procesos de iluviación o infiltración de fluidos desde horizontes de suelo suprayacentes al hipogeo.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está compuesta por detritos de origen volcánico, embebidos en una matriz actualmente dominada por minerales de arcilla. Con base en sus características ópticas, se interpreta que esta matriz se originó, al menos en parte, por alteración de vidrio volcánico primario finamente particulado, mientras que otra fracción corresponde a arcilla infiltrada (iluviada) desde el suelo suprayacente. Este conjunto es consistente con un reemplazo progresivo de la fábrica original, por una fábrica con matriz arcillosa secundaria. La población granular está representada por: (1) cristales y fragmentos cristalinos (plagioclasa, hornblenda, biotita y óxidos opacos) y (2) líticos volcánicos (andesitas y rocas de carácter lávico). Sobre el soporte rocoso se reconocen dos recubrimientos de carácter antrópico: (i) una capa inferior de mortero de tonalidad blanca, constituida por clastos volcánicos y posibles fragmentos de yeso, embebidos en una masa fina cuya composición sugiere la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico triturado, y (ii) una película delgada superpuesta de colores rojo y negro, correspondiente respectivamente a pigmento de óxido de hierro (hematita) y materia orgánica, asociada a procesos de iluviación.

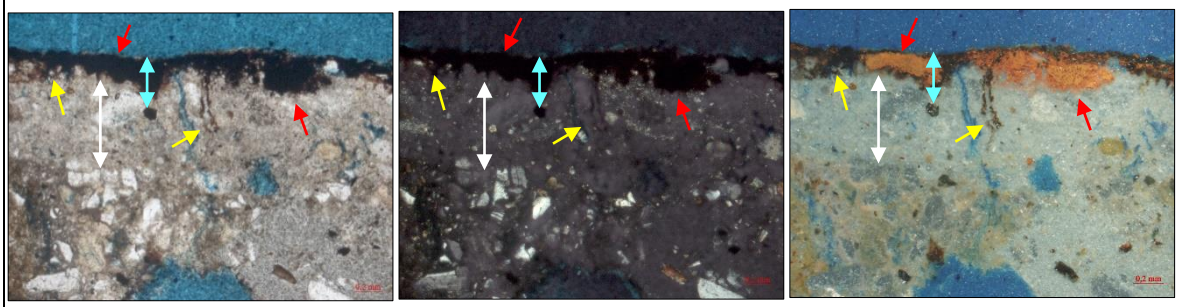


Figura 2. Detalle de recubrimiento de origen antrópico. Observe capa inferior de mortero (enmarcada por flecha blanca) y capa superior de pigmento (enmarcada por flecha azul). Note con luz reflejada inclinada, color negro a café de la materia orgánica (flechas amarillas) y color anaranjado brillante, del pigmento de hematita (flechas rojas). Izquierda nicoles paralelos. Centro nicoles cruzados. Derecha luz reflejada inclinada. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

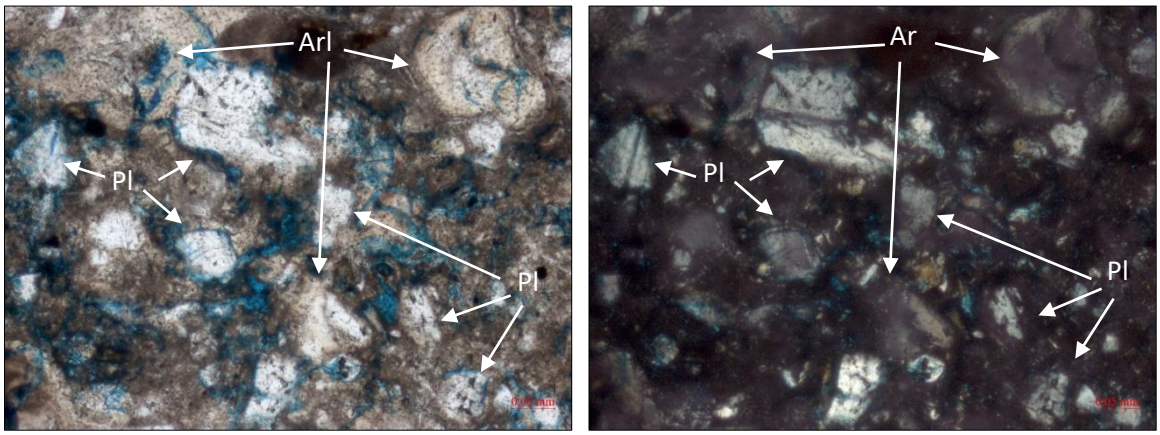


Figura 3. Ejemplos de fragmentos de plagioclasa (Pl) y concentraciones de arcilla (Ar) secundaria atribuida a infiltración (clay cutans). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 0.62 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 2	M2-S10

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm, ocasionalmente 0.5 - 0.99 mm, eventualmente 1 - 1.99 mm) / ****Selección:*** buena a moderada / ***Composición:** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda y fragmentos líticos de mayor tamaño (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente / ****Recubrimiento:*** no se diferencian niveles superpuestos que representen un enlucido y una película de pigmento. Se observa una capa negra homogénea, que al tacto es blanda.



Figura 4. Note apariencia granular del soporte de roca. Observe recubrimiento negro delgado y homogéneo. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: los fragmentos no se encuentran dispuestos de acuerdo con un arreglo preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: las partículas están libres de deformación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.29 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.08 - 0.63 mm (ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular.
- Forma: principalmente elongada, en menor proporción subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (3.8%): fragmentos alterados de pumita (devitrificados y transformados a minerales de arcilla).
- Cristales y fragmentos de cristales (37.1%): cristales incompletos y frescos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda y granos opacos (magnetita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (2.1%). Corresponden a líticos volcánicos alterados representados por fragmentos de andesita (con textura porfirítica y/o traquítica).

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
La matriz de la roca está fundamentalmente compuesta por minerales de arcilla (57%). Ella se observa irregularmente distribuida, en algunos sectores es predominante y casi libre de granos, mientras que en otros, aparece aglutinando fragmentos diversos. De acuerdo con sus características microscópicas, se deduce que se trata de arcilla infiltrada (por iluviación) desde el nivel de suelo suprayacente al hipogeo, lo que apunta a la ocurrencia de un reemplazamiento paulatino de la matriz original volcánica, por arcilla secundaria.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (18.7%): (1) espacios u oquedades amorfas atribuidas a desprendimiento de material o caída de fragmentos y/o matriz y (2) grietas y microfracturas irregulares generadas por pérdida de agua (deshidratación) de la arcilla que constituye la matriz. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La evolución de la roca se interpreta como el resultado de procesos superpuestos. En una etapa inicial, la matriz vítrea original sufrió desvitrificación y transformación a minerales de arcilla de carácter hinchable. Posteriormente, la friabilidad del material, junto con ciclos de humectación y secado, favoreció su disgregación, probablemente asociada a expansión y contracción del aglomerante intersticial. De manera simultánea, la infiltración de finos por iluviación desde horizontes superiores (suelo) condujo a la incorporación de arcilla secundaria, generando un reemplazo progresivo de la matriz original. Este proceso se tradujo en aumento de arcillocidad y pérdida de los elementos granulares que sustentaban la fábrica primaria de la roca.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.
❖ Características: el soporte rocoso está libre de enlucido y de pigmento y exhibe una capa superpuesta de color negro que al tacto es blanda. Esta capa desde el punto de vista microscópico, corresponde a minerales de arcilla entremezclados con materia orgánica. Observaciones y deducciones: con base en sus características microscópicas, se deduce que son el producto de infiltración o percolación de fluidos desde la parte superior del hipogeo. Se han desarrollado tanto en el interior de la roca, en la forma de recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), como en las paredes del recinto.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está constituida por fragmentos de origen volcánico, embebidos en un aglomerante esencialmente formado por minerales de arcilla, de cuyas propiedades microscópicas, se infiere que es el producto de infiltración (iluviación) desde el suelo que recubre el hipogeo. El conjunto detrítico está compuesto por: (1) clastos de pumita, en extremo alterados (devitrificados y transformados en arcilla), (2) cristales y fragmentos de cristales (plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda y granos opacos (magnetita)) y (3) líticos volcánicos tipo andesita. El soporte rocoso está libre de enlucido y de pigmento y exhibe una capa superpuesta de color negro que al tacto es blanda. Esta capa desde el punto de vista microscópico, corresponde a minerales de arcilla entremezclados con materia orgánica.

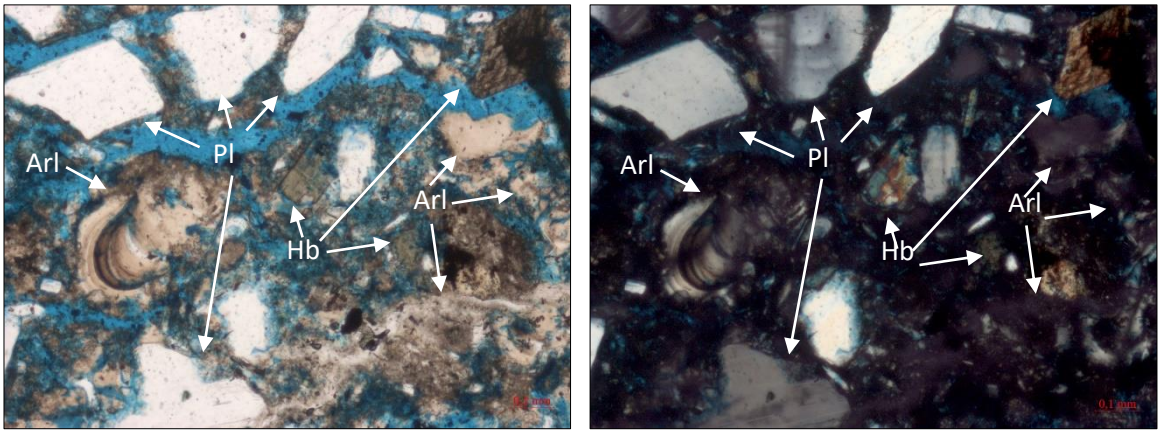


Figura 5. Detalle de recubrimiento de origen antrópico. Observe capa inferior de mortero (enmarcada por flecha blanca) y capa superior de pigmento (enmarcada por flecha azul). Note con luz reflejada inclinada, color negro a café de la materia orgánica (flechas amarillas) y color anaranjado brillante, del pigmento de hematita (flechas rojas). Izquierda nicoles paralelos. Centro nicoles cruzados. Derecha luz reflejada inclinada. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

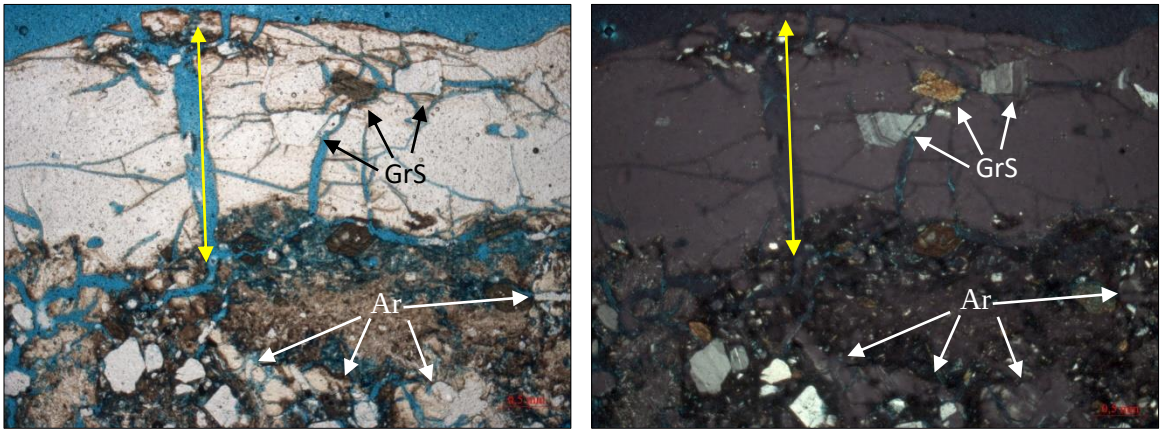


Figura 6. Detalle de capa de arcilla generada por iluviación (enmarcada por flecha amarilla). Observe granos desprendidos del soporte de roca (GrS) incluidos en el recubrimiento y arcilla atribuida a iluviación (Ar) rellenando grietas en el soporte (Ar). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 3	M3A-S12

Descripción macroscópica

***Observaciones:** el fragmento es extremadamente pequeño y frágil. Está esencialmente formado por el enlucido y la película pictórica que recubren la pared del hipogeo. El soporte está casi ausente, apenas se presenta una franja delgada lateralmente discontinua. Por su tamaño reducido, se considera que la descripción del soporte que se presenta a continuación, otorga luces a cerca de su constitución, pero no es representativa / ***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm) / ***Selección:** buena / ***Composición:** feldespato (dominante), hornblenda y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Enlucido:** capa de color blanco, formada por partículas granulares (tamaño arena muy fina a fina) embebidas en una matriz aparentemente homogénea. / ***Pigmento:** película de pigmento de color café rojizo.



Figura 7. Apariencia del recubrimiento antrópico. Observe capa blanca inferior, que corresponde a un posible mortero, suprayacida por nivel delgado de color café rojizo-amarillento, que representa la película de pigmento. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica de la capa de enlucido de color blanco

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.

1.2. Características de los fragmentos

- Tamaño promedio: 0.19 mm (arena de grano fino).
- Rango de tamaño: 0.03 - 0.8 mm (limo grueso - arena gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. En ocasiones subangular.
- Forma: principalmente elongada, en menor proporción subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena a moderada

2. Composición

2.1. Fragmentos

- Fragmentos de roca volcánica (7.8%): de ellos se infiere que son el producto de la disgregación o fragmentación mecánica de las mismas rocas que forman el soporte de los hipogeos. Están representados por minerales y fragmentos de roca tales como: plagioclasa, hornblenda, biotita, minerales opacos y clastos de pumita entre otros.
- Fragmentos de yeso (5.2%): cristales fibrosos y agregados de yeso microcristalino.

2.2. Matriz
El material intersticial (87%) está formado por dos niveles que se superponen: (1) Superior: minerales de arcilla que constituyen una banda que infrayace la capa de color café rojizo-amarillento; (2) inferior: posiblemente formado por yeso, arcilla y toba pulverizada.
3. Propuesta de la materialidad de la capa blanca
El revestimiento o enlucido presenta una matriz fina de composición heterogénea, en la que se infiere la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. En ella se encuentran dispersos fragmentos de yeso, incluidos cristales fibrosos, así como detritos de origen volcánico (clastos de toba).
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (8.6%): (1) oquedades producidas por desprendimiento de material y (2) grietas y microfracturas irregulares. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Deducciones.
La presencia de yeso, en forma de cristales aislados, fragmentos y agregados microcristalinos, sugiere su incorporación en la matriz como resultado de la mezcla con otros componentes finos, tales como arcilla y material volcanoclástico pulverizado. En este contexto, es probable que el yeso haya sido sometido a un tratamiento térmico previo (120-180 °C) para favorecer su capacidad de fraguado.
Descripción microscópica de la capa de pigmento de color café rojizo-amarillento
Las características microscópicas de esta capa indican que está constituida predominantemente por minerales de arcilla, con presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (tipo limonita) que le confieren la tonalidad observada (amarillo tenue a naranja pálido bajo luz reflejada inclinada).

Resumen

Capa de enlucido de color blanco: revestimiento o enlucido formado por una matriz fina de composición heterogénea, en la que se infiere la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. En ella se encuentran dispersos fragmentos de yeso, incluidos cristales fibrosos, así como detritos de origen volcánico (clastos de toba). **Capa de pigmento de color café rojizo-amarillento**: nivel delgado predominantemente constituido por minerales de arcilla, con presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (tipo limonita) que le confieren la tonalidad observada (amarillo tenue a naranja pálido) bajo luz reflejada inclinada.

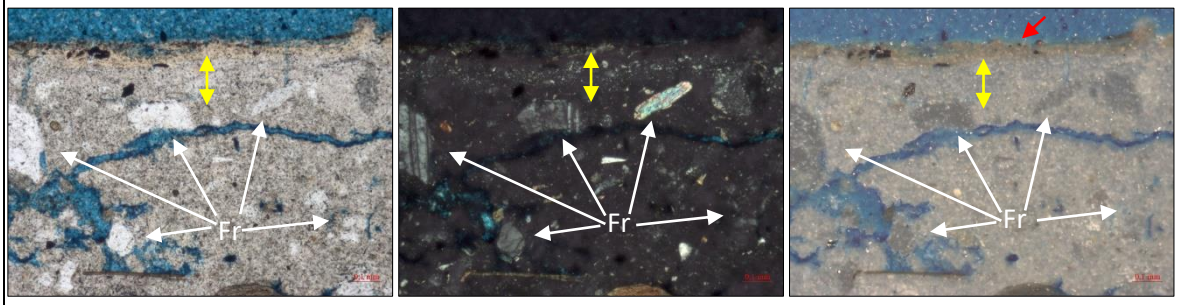


Figura 8. Características generales de la capa blanca de enlucido. Observe fragmentos diversos (Fr) de la roca volcánica que constituye la estructura de los hipogeos, diseminados en la matriz. Note nivel superior de la capa de enlucido (enmarcado por flecha amarilla), principalmente formado por minerales de arcilla. Vea en la foto derecha, color de reflexión naranja pálido a amarillo de la capa superior (señalada por flecha roja), debido a la presencia de hidróxido de hierro. Izquierda nicoles paralelos. Centro nicoles cruzados. Derecha luz reflejada inclinada. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

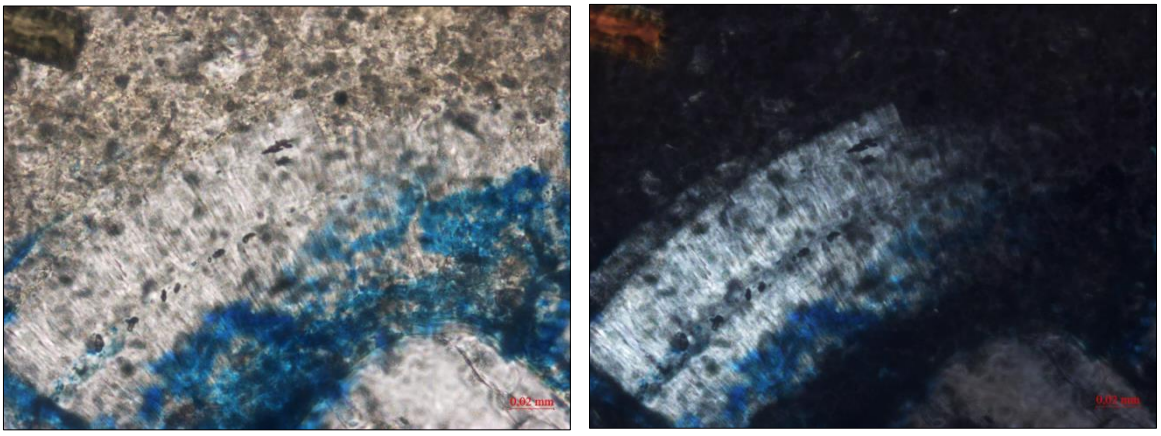


Figura 9. Detalle de cristal de yeso fibroso embebido en la matriz de la capa blanca de enlucido. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 0.31 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 3	M3B-S12
Descripción macroscópica	
****Observaciones:*** el fragmento corresponde a un remanente de la capa de enlucido sin película pictórica. El soporte es casi ausente y se presentan como un nivel apenas visible que es lateralmente discontinuo. Debido a lo anterior, la descripción no es representativa / ****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** de color blanco a crema, compuesto por detritos (tamaño arena muy fina a fina) englobados por una matriz uniforme. / ****Pigmento:*** ausente.	

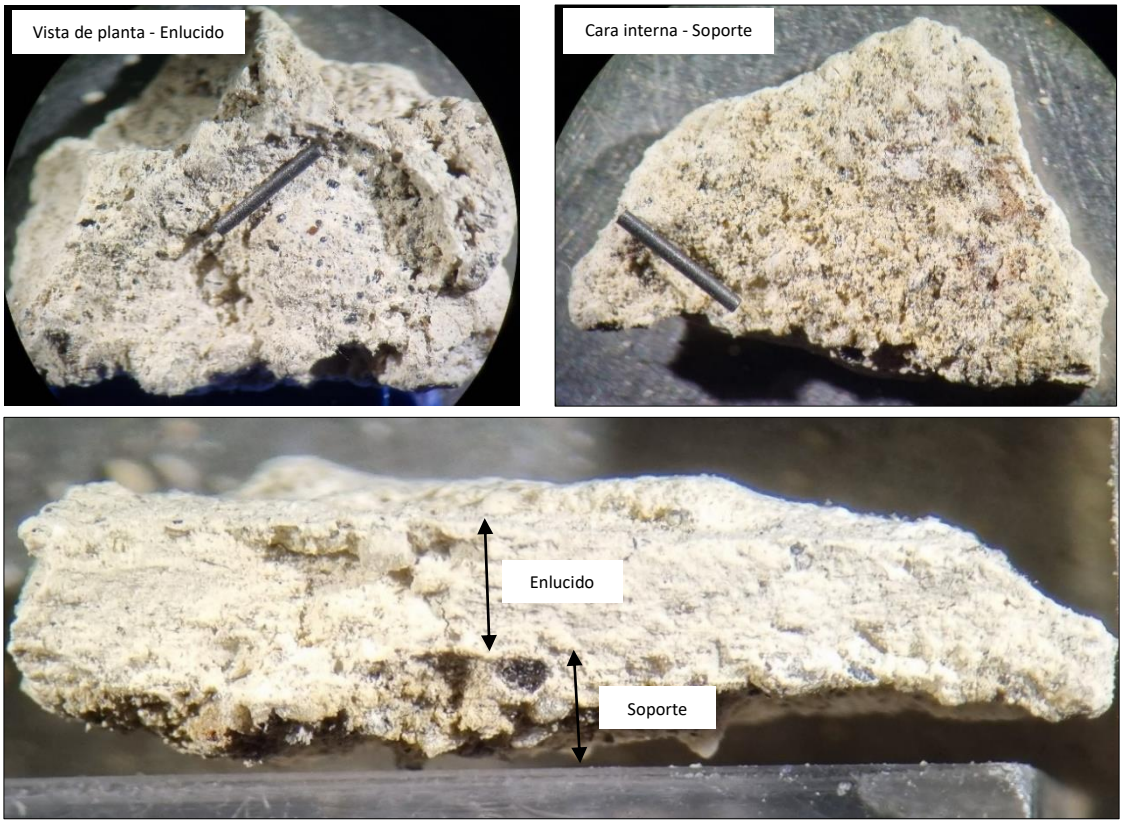


Figura 10. Aspecto macroscópico de la capa blanca de enlucido. Observe en la foto inferior, remanentes del soporte de roca. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica de la capa de enlucido de color blanco
1. Textura
1.1. Fábrica
❖ Tipo de soporte: matriz-soportado.
1.2. Características de los fragmentos
❖ Tamaño promedio: 0.21 mm (arena de grano fino). ❖ Rango de tamaño: 0.03 - 0.95 mm (limo grueso - arena gruesa). ❖ Redondez: muy angular y angular. En ocasiones subangular a subredondeada. ❖ Forma: principalmente elongada, en menor proporción subequidimensional.
1.3. Contactos entre fragmentos y selección
❖ Contactos: flotantes. ❖ Selección: moderada a pobre.

2. Composición
2.1. Fragmentos
❖ Fragmentos de roca volcánica (6.7%): con base en sus características se deduce que proviene de la desintegración mecánica de las mismas rocas que forman la estructura de los hipogeos. Se identificaron minerales y líticos representados por: plagioclasa, hornblenda, biotita, minerales opacos, clastos de pumita y detritos de rocas volcánicas tipo andesita. ❖ Fragmentos de yeso (4.3%): cristales fibrosos.
2.2. Matriz
Con base en el aspecto microscópico del material intersticial (89%), se deduce que está constituido por minerales de colores vivos (arcilla), entremezclados con sectores oscuros. De las zonas oscuras se infiere que corresponden a una mezcla formada por: arcilla, yeso y toba pulverizada.
3. Propuesta de la materialidad de la capa blanca
Revestimiento o enlucido constituido por una matriz fina de composición mixta, que sugiere la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. La fracción granular está representada por fragmentos de yeso (incluyendo cristales fibrosos) y por detritos volcánicos diversos (clastos de toba).
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (13.4%): (1) espacios amorfos grandes producidos por desprendimiento de material y (2) microfracturas y grietas irregulares. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Deducciones.
El yeso reconocido, dispuesto como cristales aislados, sugiere su incorporación en la matriz como resultado de la mezcla con otros constituyentes finos, tales como arcilla y material volcanoclástico pulverizado. No se descarta que haya sido previamente sometido a un tratamiento térmico a baja temperatura (120–180°C), con el fin de favorecer el fraguado del material.

Resumen

Capa de enlucido de color blanco: revestimiento o enlucido constituido por una matriz fina de composición mixta, que sugiere la presencia de arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. La fracción granular está representada por fragmentos de yeso (incluyendo cristales fibrosos) y por detritos volcánicos diversos (clastos de toba).

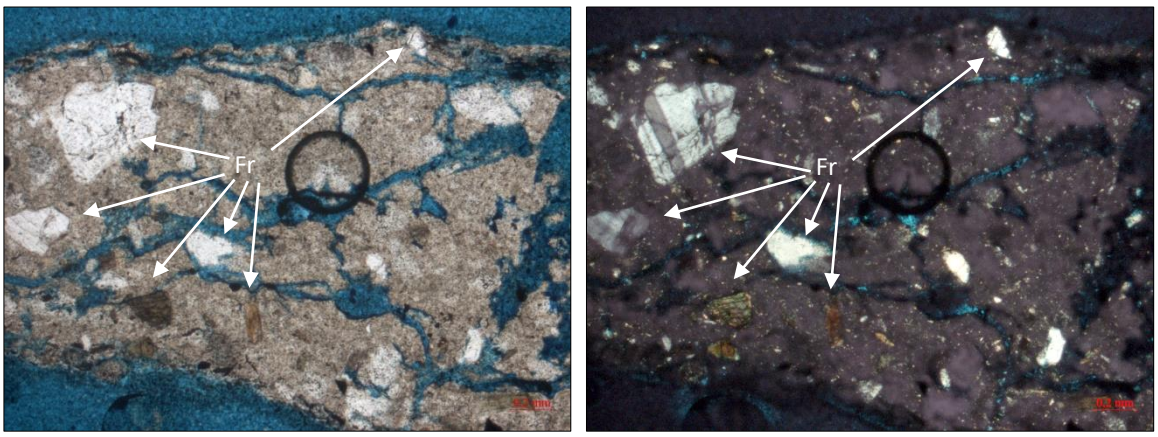


Figura 11. Aspecto microscópico de la capa blanca de enlucido. Note fragmentos volcánicos variados (Fr), englobado en la matriz. Observe grietas y microfracturas, lo que indica que el material es friable. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

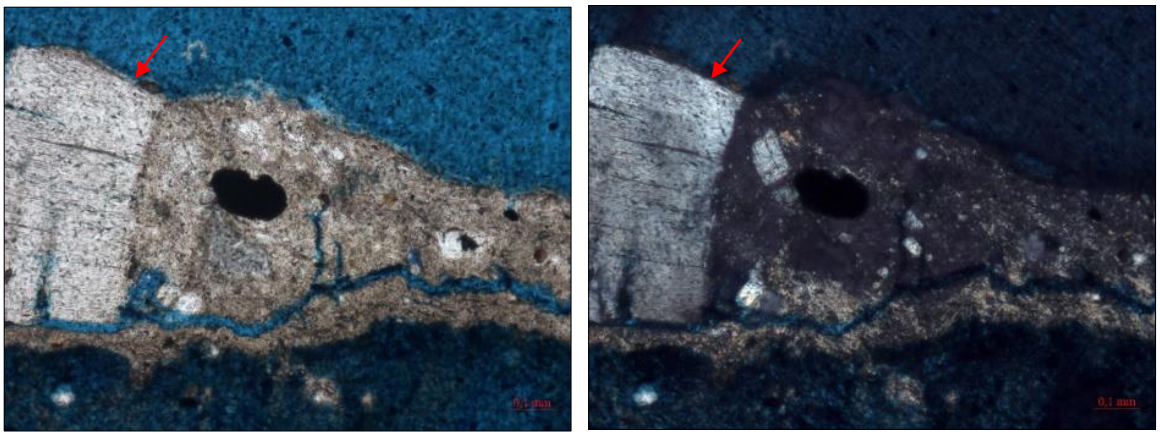


Figura 12. Detalle de cristal de yeso fibroso señalado por flecha roja. Observe matriz de colores vivos (arcilla), entremezclada con zonas oscuras posiblemente compuestas por yeso microcristalino, arcilla y material volcánico triturado. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 4	M4-S12

Descripción macroscópica

***Observaciones:** el fragmento está esencialmente constituido por el enlucido y la película pictórica que recubren la pared del hipogeo. ***Enlucido**: corresponde a una capa delgada de color crema compuesta por partículas clásticas (tamaño arena muy fina a fina) embebidas en una matriz homogénea / ***Pigmento**: consiste en una película fina de color gris oscuro a negro, con granos del enlucido incluidos en ella.

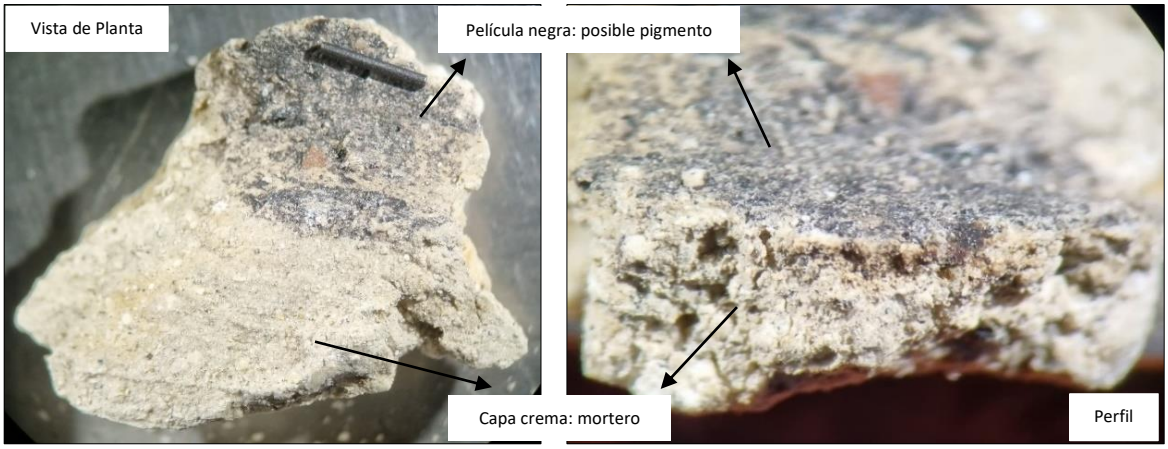


Figura 13. Características macroscópicas del recubrimiento antrópico. Note capa de color crema, que forma un mortero con aspecto granular. Superpuesta al mortero, se presenta un recubrimiento gris oscuro a negro que corresponde a la película pictórica. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica de la capa de enlucido de color blanco

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.

1.2. Características de los fragmentos

- Tamaño promedio: 0.21 mm (arena de grano fino).
- Rango de tamaño: 0.04 - 1.4 mm (limo grueso - arena muy gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. En menor proporción subangular a subredondeada.
- Forma: principalmente elongada, ocasionalmente subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena a moderada

2. Composición

2.1. Fragmentos

- Fragmentos de roca volcánica (10.3%): con base en sus características se deduce que son el resultado de la disgregación o fragmentación mecánica de rocas de la misma naturaleza de las que forman el soporte de los hipogeos. Esta población se encuentra principalmente compuesta por minerales y fragmentos de roca tales como: plagioclasa, hornblenda, biotita, fragmentos de pumita y minerales opacos (magnetita e ilmenita).
- Fragmentos de yeso (24.3%): cristales fibrosos y agregados de yeso microcristalino.
- Aglomerados de matriz oscura (3.4%) en medio del nivel predominantemente arcilloso (localizado en la parte superior de esta capa), debido a pobre amasado: En el interior de los aglomerados oscuros se presentan cristales fibrosos de yeso.

2.2. Matriz
La matriz (62%) está formada por tres capas de base a tope: (1) nivel oscuro (inferior), (2) nivel en el que predominan minerales finos laminares de colores vivos (arcilla), entremezclados con sectores oscuros, (3) nivel oscuro superior. De acuerdo con los rasgos microscópicos de los niveles oscuros, se deduce que posiblemente están compuestos por: arcilla, yeso y tobas trituradas.
3. Propuesta de la materialidad de la capa de color crema
El revestimiento o enlucido está compuesto por una matriz fina de composición heterogénea (arcilla, yeso y material volcánico finamente particulado), dispuesta en tres niveles: el inferior y el superior exhiben tonalidad oscura, el intermedio está dominado por arcilla de colores vivos, entremezclada con sectores oscuros. En la matriz se encuentran embebidos clastos volcánicos (disgregados o triturados de tobas) y fragmentos de yeso (cristales fibrosos y agregados microcristalinos). En el nivel intermedio, se reconocen además aglomerados oscuros, asociados a un amasado incompleto, que contienen cristales fibrosos de yeso.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (17%): (1) oquedades amorfas creadas por desmoronamiento asociado a friabilidad y (2) grietas y microfracturas irregulares. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Deducciones.
El yeso, presente como cristales aislados y como agregados microcristalinos de tonalidad oscura, sugiere su incorporación en la matriz junto con otros componentes finos, como arcilla y material volcanoclástico. La posibilidad de un tratamiento térmico previo a baja temperatura (120–180 °C) no se descarta, en relación con el desarrollo de propiedades de fraguado.
Descripción microscópica de la capa de pigmento de color café rojizo-amarillento
Las propiedades ópticas de la película de pigmento indican que corresponde a materia orgánica carbonizada.

Resumen

Capa de enlucido de color crema: revestimiento o enlucido compuesto por una matriz fina de composición heterogénea (arcilla, yeso y material volcánico finamente particulado), dispuesta en tres niveles: el inferior y el superior exhiben tonalidad oscura, el intermedio está dominado por arcilla de colores vivos, entremezclada con sectores oscuros. En la matriz se encuentran embebidos clastos volcánicos (disgregados o triturados de tobas) y fragmentos de yeso (cristales fibrosos y agregados microcristalinos). En el nivel intermedio, se reconocen además aglomerados oscuros, asociados a un amasado incompleto, que contienen cristales fibrosos de yeso. **Capa de pigmento de color gris oscuro a negro**: película formada por materia orgánica carbonizada.

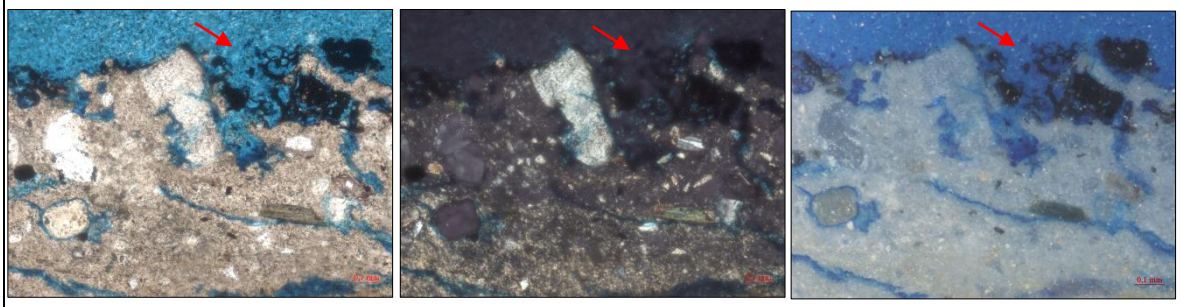


Figura 14. Detalle de película de pigmento, que de acuerdo con sus rasgos ópticos se infiere que corresponde a materia orgánica carbonizada. Note estructura orgánica (señalada por flecha roja) generada por exposición a alta temperatura. Izquierda nicoles paralelos. Centro nicoles cruzados. Derecha luz reflejada inclinada. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

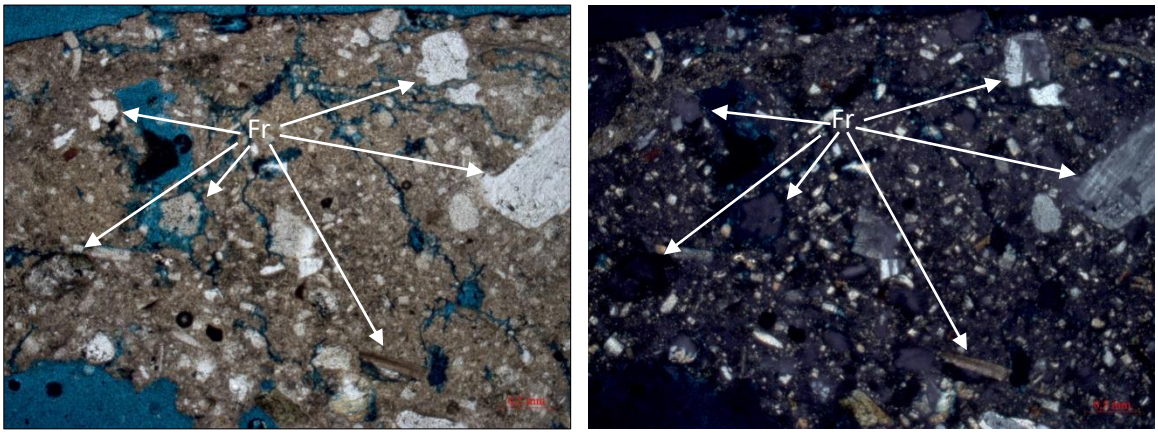


Figura 15. Apariencia general de la capa de mortero. Observe tonalidad oscura de la matriz y fragmentos de rocas volcánicas (Fr). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 5	M5-S12

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm, ocasionalmente 0.5 - 1.99 mm) / ****Selección:*** buena a moderada / ****Composición:*** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación primaria / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente / ***Mineral secundario?, Sal?:** la muestra exhibe coloración blanca superficial que parece corresponder a algún tipo de mineral secundario o sal. Este material aparece formando un recubrimiento o pátina delgada.

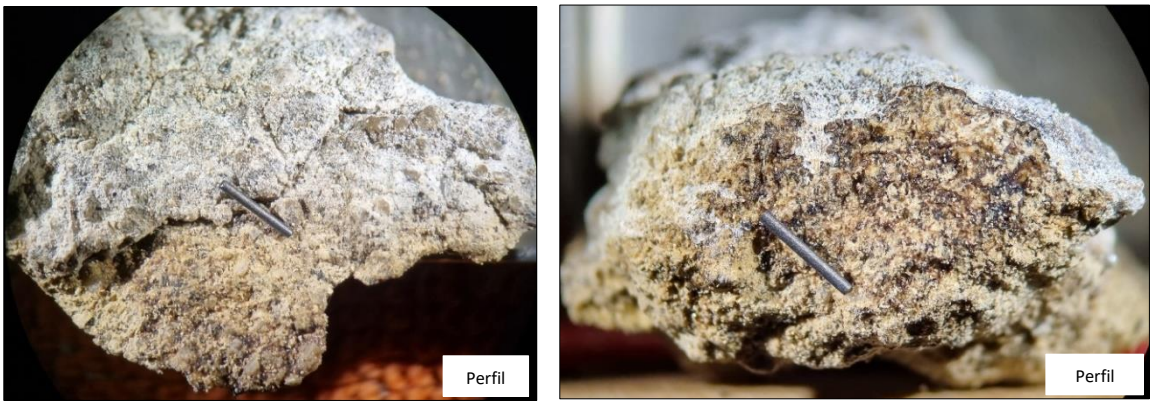


Figura 16. Características generales de la roca. Observe pátina superficial delgada y aspecto granular. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: ausencia de alineación preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: detritos sin deformación, los fragmentos de pumita están libres de deformación plástica.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.48 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.05 - 5.7 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular.
- Forma: predominantemente elongada, localmente subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: moderada a pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (12.2%): fragmentos de pumita (frescos a levemente alterados).
- Cristales y fragmentos de cristales (21%): cristales incompletos frescos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y partículas opacas (tipo ilmenita y magnetita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (7.6%): líticos volcánicos representados por andesita (con textura microporfirítica y traquítica) y clastos de rocas lávicas con textura microporfirítica.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El material intersticial (58%) se distribuye de manera relativamente uniforme y corresponde en su mayor parte a minerales de arcilla de carácter secundario, dispuestos como recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), generados por procesos de iluviación o infiltración de fluidos desde el horizonte de suelo que suprayace al hipogeo. En menor proporción, se distinguen zonas en las que la matriz está constituida por una mezcla de arcilla y vidrio volcánico relicto, los cuales se interpretan como remanentes del material aglutinante original.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (1.2%): aparece concentrada de manera irregular y aislada en el espacio intergranular, asociada a la arcilla secundaria. Ocasionalmente se concentra en microfisuras.
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (9.2%): (1) cavidades irregulares atribuidas al desprendimiento de material (fragmentos y/o matriz) o a la pérdida de granos; (2) poros intragranulares primarios en clastos de pumita; y (3) grietas y microfracturas irregulares, desarrolladas tanto en la matriz como en la fábrica, interpretadas como resultado de la contracción del material intersticial, probablemente asociadas a ciclos de humectación–secado. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración dominante es el resultado de incorporación progresiva de arcilla secundaria en la matriz de la roca, cuya presencia se manifiesta en forma de recubrimientos concéntricos (*clay cutans*) y otros rasgos de redistribución interna. Estas características son consistentes con procesos de iluviación vinculados a la infiltración de fluidos cargados de finos desde los horizontes superiores del suelo. En este contexto, la matriz original, probablemente constituida por partículas de vidrio volcánico, habría experimentado una transformación previa a minerales de arcilla, siendo posteriormente reemplazada de manera progresiva por la fracción arcillosa secundaria.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está constituida esencialmente por detritos de origen volcánico, en su mayor parte aglutinados por una matriz arcillosa. De acuerdo con las características ópticas, la matriz se interpreta como el proucto de procesos de iluviación asociados a la infiltración de fluidos desde el horizonte de suelo que suprayace al hipogeo. La matriz primaria, probablemente constituida por partículas de vidrio volcánico, habría experimentado una transformación inicial a minerales de arcilla, seguida de un reemplazo progresivo por la fracción arcillosa secundaria. El conjunto de fragmentos está representado por clastos vítreos (principalmente detritos de pumita), cristales y fragmentos cristalinos (plagioclasa, hornblenda, biotita, epidota y minerales opacos) y líticos volcánicos (andesitas y rocas de carácter lávico). La porosidad se manifiesta como: (1) cavidades amorfas asociadas al desprendimiento de material o pérdida de granos; (2) espacios intragranulares primarios en clastos de pumita y (3) grietas y microfracturas irregulares desarrolladas tanto en la matriz como en la fábrica.

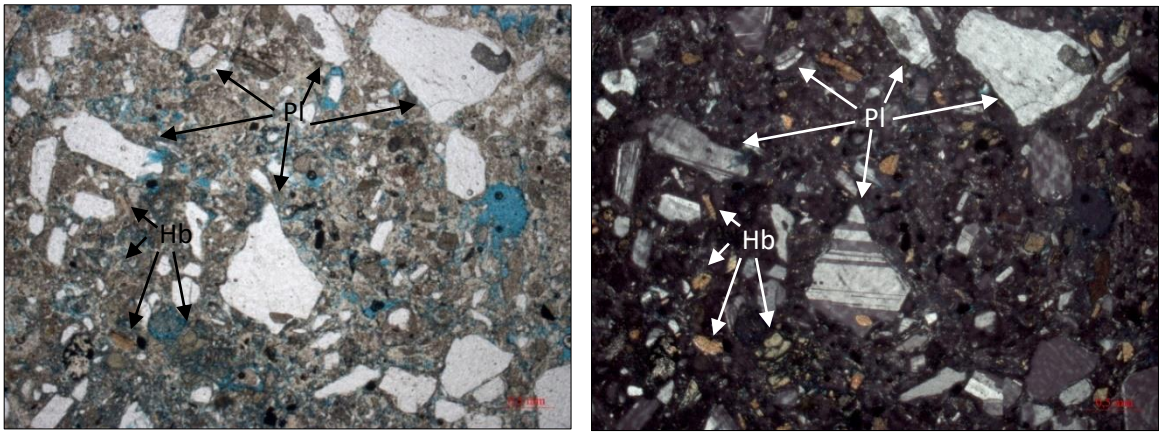


Figura 17. Características generales de la roca. Observe fragmentos cristales representados por plagioclasa (Pl) y hornblenda (Hb). Note granos diseminados en la arcilla intersticial estructurando una fábrica matriz-soportada. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

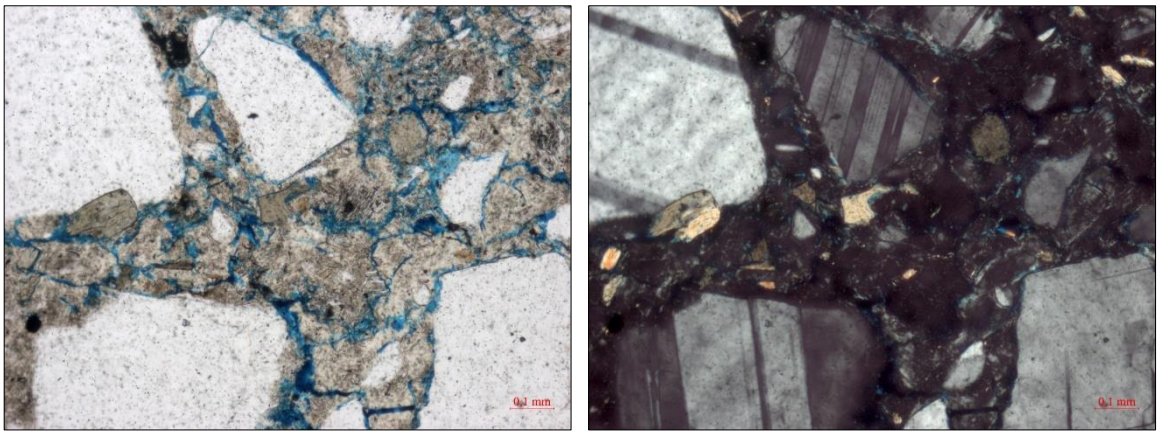


Figura 18. Detalle de grietas delgadas en la matriz, interpretadas como producto de contracción por deshidratación. En este sector, la arcilla intersticial es de carácter secundario y se asocia a iluviación. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 6	M6-S21

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm, ocasionalmente 0.5 - 1.99 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente / ****Recubrimiento:*** no se reconoce un horizonte que constituya un enlucido y una película de pigmento. Se presenta una capa blanda de color café rojizo a negro.



Figura 19. Aspecto general de la muestra. Observe recubrimiento de color café rojizo a negro. Note apariencia friable marcada de la roca. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: no se identifica ningún tipo de orientación o disposición preferencial de los fragmentos.
- Evidencias de compactación primaria: los clastos no exhiben deformación por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.53 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.07 - 19 mm (ceniza gruesa - lapilli).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular o redondeado.
- Forma: predominantemente elongada, en menor cantidad subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (2.4%): clastos de pumita notoriamente alterados a minerales de arcilla.
- Cristales y fragmentos de cristales (19.1%): cristales en general poco o nada alterados e incompletos de: cuarzo volcánico (cuarzo β), plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, circón, y partículas opacas (magnetita e ilmenita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (52%). Se observan parcialmente alterados a óxido de hierro y minerales de arcilla. Están representados por detritos de andesita (con textura porfirítica) y partículas de rocas de carácter lávico con textura microporfirítica.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
La matriz de la roca está constituida predominantemente por minerales de arcilla (26.5%), distribuidos de manera heterogénea. En algunos sectores, esta fracción es dominante y se presenta casi libre de granos, mientras que en otros actúa como fase intersticial que aglutina fragmentos diversos. Con base en sus características microscópicas (acumulación concéntrica), se interpreta que corresponde a arcilla de origen secundario, incorporada por procesos de iluviación desde el suelo suprayacente al hipogeo, lo que sugiere un reemplazo progresivo de la matriz volcánica original.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba lítico-cristalina.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (13.8%): (1) oquedades irregulares de las que se deduce que son el producto de caída o desprendimiento de fragmentos y de material intersticial, (2) espacios atribuidos a disolución en el interior de clastos y líticos volcánicos (pumita y de andesita), y (3) grietas y microfracturas irregulares y circumgranulares creadas por deshidratación de la matriz. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración que ha sufrido la roca se puede explicar mediante la superposición de procesos. Inicialmente, la matriz vítrea original fue devitrificada y transformada en minerales de arcilla. Posteriormente, la friabilidad del material, junto con ciclos de humectación–secado, favoreció su disgregación, asociada a la expansión y contracción del material intersticial. De manera simultánea, la iluviación de finos desde el suelo suprayacente incorporó arcilla secundaria, produciendo un reemplazo progresivo de la matriz original, con el consecuente aumento del contenido arcilloso y la pérdida de la fábrica primaria.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.
❖ Características: el soporte rocoso se encuentra desprovisto de enlucido y pigmento, y presenta una capa superficial de color negro, de consistencia blanda al tacto. A nivel microscópico, esta capa está compuesta por una mezcla de minerales de arcilla y materia orgánica. Observaciones y deducciones: De acuerdo con sus características microscópicas, se infiere que este recubrimiento es el resultado de la infiltración o percolación de fluidos desde los niveles superiores del hipogeo. Este material se reconoce tanto en el interior de la roca, en forma de recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), como sobre las superficies de las paredes del recinto.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba lítica-cristalina (Schmid,1981). La roca está constituida por fragmentos de origen volcánico, embebidos en minerales de arcilla de carácter secundario, atribuido a procesos de iluviación desde el suelo que recubre el hipogeo. El conjunto detrítico incluye: (1) clastos de pumita fuertemente alterados, con evidencias de desvitrificación y transformación a arcilla; (2) cristales y fragmentos cristalinos, entre los que se reconocen cuarzo volcánico (β), plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, circón y minerales opacos (magnetita e ilmenita); y (3) líticos volcánicos, representados por andesitas y rocas de carácter lávico, con textura vítrea y presencia de microfenocristales. El soporte rocoso se encuentra libre de enlucido y pigmento, y presenta una capa superficial de color café rojizo a negro, compuesta por una mezcla de minerales de arcilla y materia orgánica. La porosidad es de origen secundario y consiste en: (1) oquedades irregulares, producidas por desprendimiento de material, (2) espacios atribuidos a disolución en el interior de detritos volcánicos y (3) grietas y microfracturas.

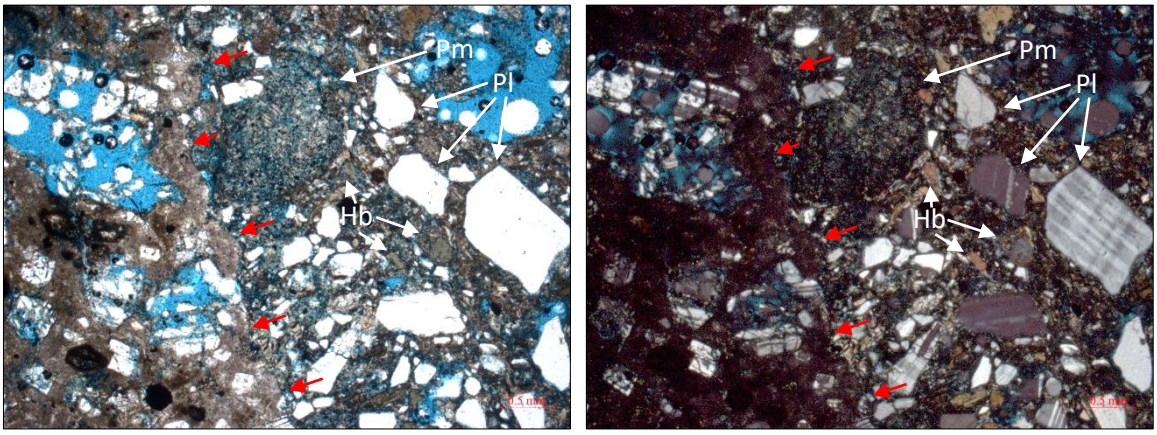


Figura 20. Características generales de la roca. Ejemplos de algunos tipos de fragmentos: (1) lítico grueso de andesita (señalado por flechas rojas), (2) plagioclasa (Pl), (3) hornblenda (Hb) y (4) pumita (Pm). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

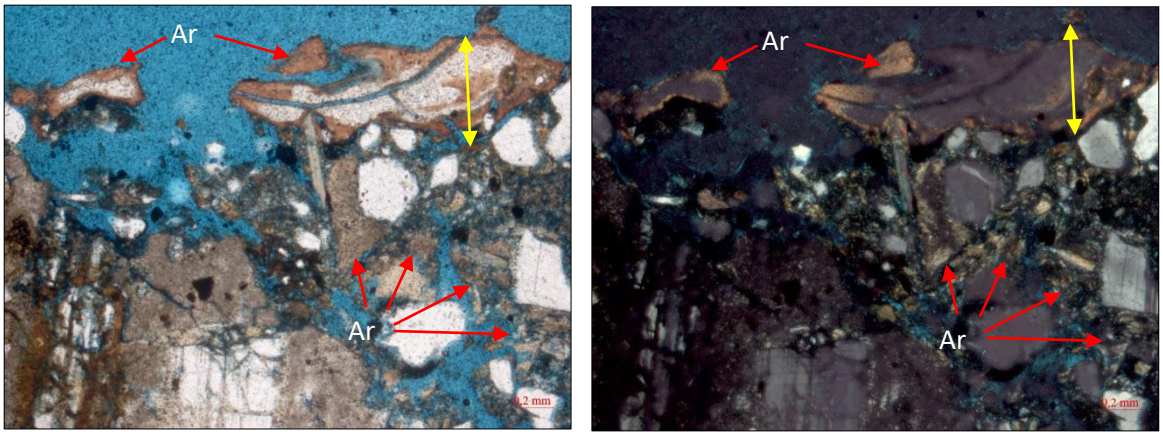


Figura 21. Detalle de recubrimiento superficial de arcilla producido por iluviación (enmarcado por flecha amarilla). Observe el mismo tipo de arcilla congregada en el espacio intersticial (Ar). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 7	M7-S21

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.06 - 0.24 mm) / ***Selección:** buena / ***Composición:** cuarzo hialino, feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Enlucido:** ausente / ***Pigmento:** ausente / ***Recubrimiento:** sobre el soporte se identifica un recubrimiento de color café rojizo que parece corresponder a una capa orgánica.

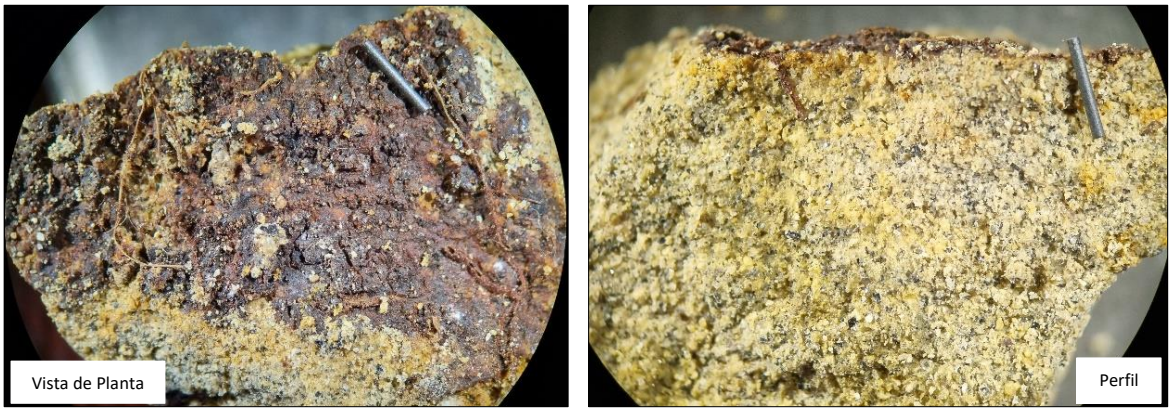


Figura 22. Características macroscópicas de la muestra. Note recubrimiento de color café rojizo a negro. Observe coloración amarilla y aspecto granular marcado de la roca. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: los diversos fragmentos se encuentran diseminados sin ningún tipo de orientación en medio de la matriz aglutinante.
- Evidencias de compactación primaria: los fragmentos están libres de deformación frágil o dúctil por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.30 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.1 - 0.75 mm (ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. Esporádicamente subangular o subredondeado.
- Forma: predominantemente elongada, en ocasiones subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (7.4%): fragmentos de pumita en extremo alterados (devitrificados y transformados a minerales de arcilla).
- Cristales y fragmentos de cristales (27%): cristales en su mayoría incompletos y frescos a incipientemente alterados de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y clastos opacos (magnetita e ilmenita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (4.2%). Se distinguen por encontrarse levemente alterados (oxidados y transformados a minerales de arcilla). Se identificaron:

líticos de andesita, dacita y basalto y detritos de rocas volcánicas de carácter lávico (con textura microporfirítica).

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)

El material intersticial de la roca está compuesto por minerales de arcilla (61.4%), distribuidos en forma heterogénea. En ciertos lugares, la matriz es predominante y se presenta prácticamente libre de granos, mientras que en otros constituye la fase que cohesiona los fragmentos. Sus características microscópicas, particularmente la disposición en recubrimientos concéntricos (*clay cutans*), permiten interpretarla como arcilla de origen secundario, que fue incorporada a través del proceso de iluviación desde el suelo suprayacente al hipogeo. Esto apunta a un reemplazo progresivo y masivo de la matriz volcánica original.

2.3. Otros

- Materia orgánica (%):

3. Clasificación

3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)

Toba de ceniza, no soldada.

3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)

Toba cristalina-lítica.

4. Porosidad e interconexión de los poros

- Tipos de poros (28%): (1) huellas producidas por disolución de fragmentos inestables (posibles clastos de pumita), (2) espacios interlaminares finos ubicados en el enrejado arcilloso que constituye la matriz intersticial y (3) grietas y microfracturas irregulares, resultantes de la contracción por deshidratación de la matriz.
- Conectividad: de manera visual aparentemente tortuosa. Muy posiblemente exista buena conectividad.

5. Alteración e implicaciones para la conservación.

El estado actual de la roca se interpreta como el resultado de una secuencia de procesos superpuestos. En una etapa inicial, la matriz originalmente constituida por partículas de vidrio volcánico pudo haber experimentado procesos de desvitrificación y/o hidratación, dando lugar a la formación de minerales de arcilla con comportamiento higroscópico. Posteriormente, la naturaleza friable del material, en combinación con ciclos repetidos de humectación y secado, promovió su desagregación, asociada a procesos de expansión y contracción del material intersticial. De forma concomitante, se produjo la incorporación de finos por iluviación desde el suelo suprayacente, favoreciendo el desarrollo de arcilla secundaria y generando un reemplazo progresivo de la matriz original. Como resultado, la fábrica, probablemente en un inicio clasto-soportada, habría evolucionado hacia una fábrica matriz-soportada.

6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

- Características: el soporte rocoso carece de enlucido y pigmento, y exhibe una capa superficial de tonalidad café rojizo a negra, de consistencia blanda. Desde el punto de vista microscópico, esta capa está constituida por una mezcla de minerales de arcilla y materia orgánica.

Observaciones y deducciones: este recubrimiento se interpreta como producto de la infiltración de fluidos desde los niveles superiores, que condujeron al desarrollo de recubrimientos concéntricos tanto en el interior de la roca, como sobre la pared de los hipogeos.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está compuesta por fragmentos volcánicos englobados en una matriz arcillosa de carácter secundario, que se atribuye a infiltración producida desde el suelo suprayacente al hipogeo. La fracción detrítica está conformada por: (1) clastos de pumita intensamente alterados, con evidencias de desvitrificación y transformación a arcilla; (2) cristales y fragmentos de cristales, consistentes en: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y clastos opacos (magnetita e ilmenita); y (3) líticos volcánicos, que incluyen detritos de andesita, dacita y basalto y clastos de rocas volcánicas de carácter lávico (con textura microporfirítica). La muestra carece de enlucido y pigmento, y ostenta una capa superficial natural de color café rojizo a negro, compuesta por una mezcla de minerales de arcilla y materia orgánica. La porosidad es de origen secundario y se manifiesta como: (1) huellas producidas por disolución de fragmentos inestables, (2) espacios interlaminares localizados en la masa arcillosa intersticial y (3) grietas y microfracturas irregulares creadas por contracción.

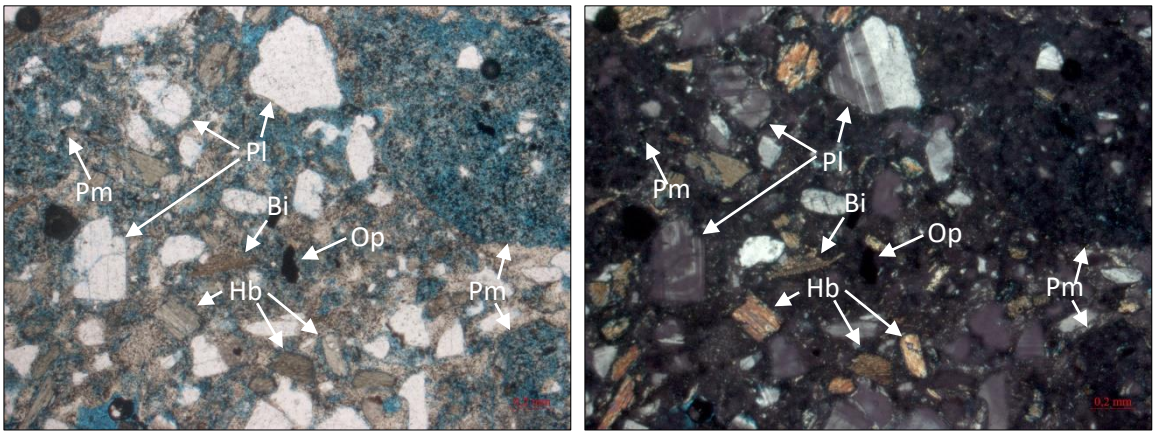


Figura 23. Ejemplos de algunos tipos de clastos: (1) plagioclasa (Pl), (3) hornblenda (Hb), (4) biotita (Bi), (5) opacos (Op) y (6) pumita (Pm). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

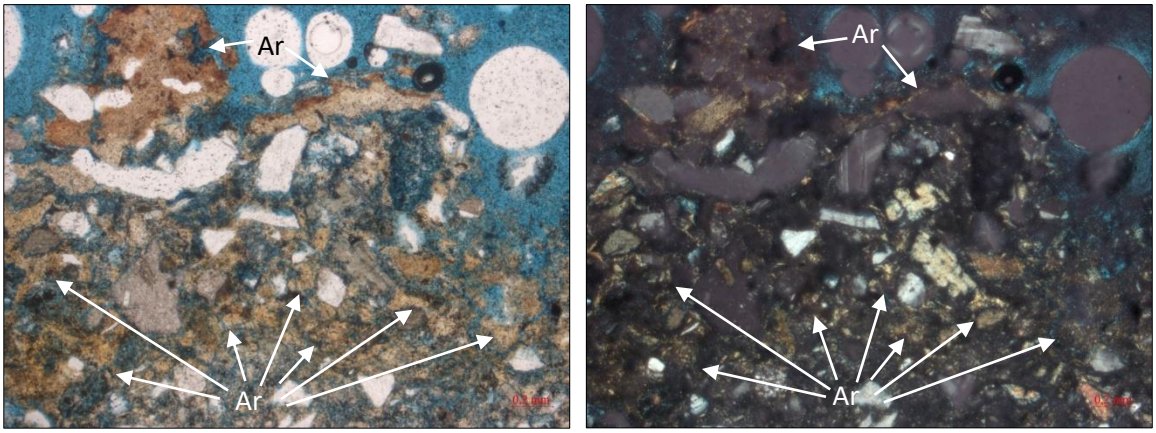


Figura 24. Detalle de arcilla (Ar) de origen secundario atribuida a iluviación, concentrada tanto en el interior de la muestra como en la superficie de la misma. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 8	M8-S11

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm, ocasionalmente 0.5 - 1.99 mm) / ***Selección:** buena a moderada / ***Composición:** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** moderada, se encuentra mejor consolidada que las otras muestras / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación primaria / ***Enlucido:** ausente / ***Pigmento:** ausente / **Banda de alteración?:** la muestra exhibe bandeamiento marcado por un cambio en la coloración. Dicho cambio le otorga apariencia estratificada a la roca. La banda superficial es más delgada y exhibe color blanco a crema, mientras que la banda inferior, es más gruesa y ostenta color entre amarillo y naranja.





Figura 25. Aspecto macroscópico de la roca, observe cambio de color marcado por la presencia de dos bandas, siendo la superior más delgada que la inferior. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: fábrica heterogénea, con dominios clasto-soportados y matriz-soportados.
- Orientación primaria: los granos no se observan orientado o alineados según una dirección preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: clastos sin deformación, los detritos de pumita están libres de deformación plástica por alta temperatura.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.53 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.04 - 15 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular a subredondeada.
- Forma: en su mayoría elongada, en menor cantidad subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: en general flotantes a puntuales. En algunas zonas son dominantemente flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (27.3%): clastos de pumita (frescos a levemente alterados) y detritos frescos, sellados (sin poros), de rocas volcánicas vítreas (con microcristales y microfenocristales de plagioclasa y hornblenda).
- Cristales y fragmentos de cristales (15.7%): principalmente cristales incompletos y frescos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y partículas opacas (tipo ilmenita y magnetita).

❖ Fragmentos de roca cognados y accidentales (31.6%): fragmentos alterados de rocas volcánicas (a óxido de hierro y/o minerales de arcilla) tales como: toba soldada, andesita (con textura porfirítica) y detritos de rocas lávicas con textura microporfirítica.
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El material intersticial de la roca (25.4%) se distribuye de manera homogénea en medio de los clastos. Este se encuentra embebiendo masivamente la población de fragmentos. Está constituido esencialmente por partículas de vidrio volcánico frescas a incipientemente devitrificadas, entremezcladas con minerales de arcilla. Las partículas vítreas muestran indicios de hidratación parcial y, en ciertos sectores, se presentan desvinculadas de la fracción arcillosa, dejando espacios intergranulares libres.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba lítico-cristalina.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (8.5%): (1) cavidades amorfas pequeñas creadas por desprendimiento de material (fragmentos y/o matriz); (2) espacios intragranulares primarios en detritos de pumita; y (3) grietas y microfracturas irregulares y circungranulares, desarrolladas tanto en la matriz como alrededor de algunos fragmentos, que se atribuyen a contracción por deshidratación. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración está asociada principalmente a la hidratación del vidrio volcánico y al desarrollo de minerales arcillosos. Estos procesos han incidido directamente en la creación de porosidad secundaria (microfracturas y grietas), el incremento de friabilidad y el carácter higroscópico de la roca, debido a contracción y expansión durante el ciclo natural de humectación y secado que ocurre en los hipogeos. A ello se suma la alteración de fases ferromagnesianas a óxidos de hierro, responsable del bandeamiento observado macroscópicamente.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba lítica-cristalina (Schmid,1981). La roca está fundamentalmente compuesta por fragmentos diversos de origen volcánico, inmersos en una matriz formada por partículas de vidrio volcánico (desde frescas hasta parcialmente alteradas), mezcladas con minerales de arcilla. En la población de fragmentos se distinguen: (1) clastos de pumita y detritos de rocas vítreas, (2) cristales y fragmentos cristalinos de plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y partículas opacas (tipo ilmenita y magnetita) y (3) líticos tales como: toba soldada, andesita y rocas lávicas con textura microporfirítica. La porosidad es de carácter secundario y consiste en una red mayormente tortuosa de grietas y microfracturas. Adicionalmente se observan espacios primarios en el interior de pumitas y oquedades pequeñas generadas por desprendimiento de material.

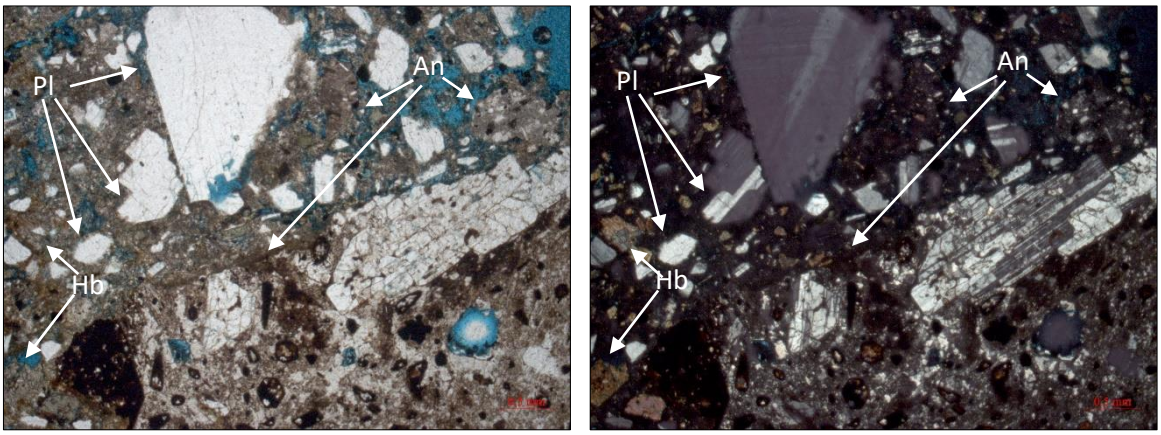


Figura 26. Ejemplos de algunos tipos de clastos: (1) plagioclasa (Pl), (2) hornblenda (Hb) y (3) fragmentos líticos de andesita (And). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

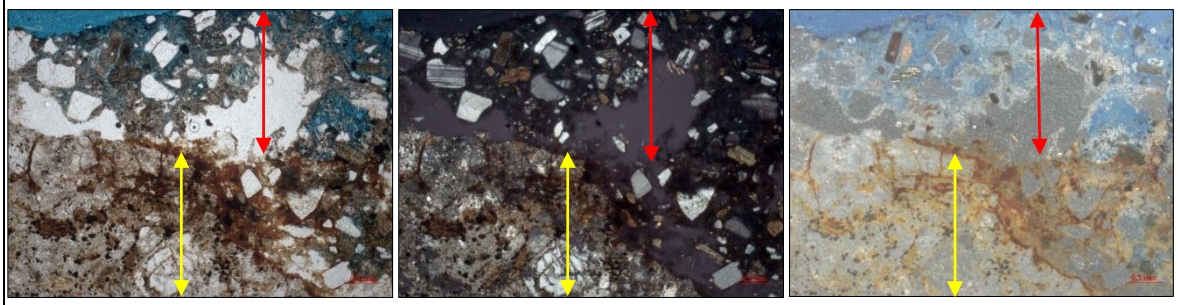


Figura 27. Detalle de zona alterada a óxido de hierro (parte inferior-flecha amarilla) vs zona libre de óxido de hierro (parte superior-flecha roja), que marca el bandeamiento que se identifica a nivel macroscópico. Izquierda nicoles paralelos. Centro nicoles cruzados. Derecha luz reflejada inclinada. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 9	M9-S11

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.25 - 0.99 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular / ****Friabilidad:*** moderada / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente / ***Sales:** la muestra fue extraída de una diaclasa en la que se reconoce coloración blanca superficial, que apunta a la presencia de una sal. Esta luce como un recubrimiento, que se dispone como una pátina.



Figura 28. Apariencia general de la roca. Observe recubrimiento blanquecino el cual posiblemente corresponde a un depósito de sal. Note coloración café amarillenta relacionada con alteración y presencia de abundante arcillosidad. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: los clastos aparecen diseminados en medio de la matriz sin ningún tipo de ordenamiento.
- Evidencias de compactación primaria: no se reconocen evidencias de deformación en la población de fragmentos.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.34 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.06 - 1.7 mm (ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasional subangular a subredondeada. Eventual redondeada.
- Forma: predominantemente elongada, en menor proporción subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena a moderada.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (%):
- Cristales y fragmentos de cristales (14.3%): cristales incompletos y frescos a incipientemente alterados de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, y clastos opacos (magnetita e ilmenita).

❖ Fragmentos de roca cognados y accidentales (Trazas <0.5%): fragmentos de origen volcánico, con textura microporfirítica. Están representados por detritos de andesita y de clastos formados vidrio, microcristales y microfenocristales de plagioclasa.
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El componente dominante de la roca corresponde a la matriz intersticial (85.7%), constituida fundamentalmente por minerales de arcilla, de cuyas características ópticas se deduce que es de origen secundario. En consecuencia, la fábrica es matriz-soportada y, en numerosos sectores, la fracción clástica se encuentra notablemente reducida. Esta masa arcillosa, es el resultado de un proceso de reemplazamiento progresivo que ha afectado tanto la matriz original como los clastos, y se asocia a infiltración y acumulación de finos por iluviación, desde el horizonte de suelo suprayacente al hipogeo.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (4%): grietas, microfracturas irregulares y poros circungranulares, atribuidos a contracción por deshidratación de la arcilla intersticial. ❖ Conectividad: tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
Las características petrográficas de la roca indican que su estado actual, es el resultado de una serie de procesos superpuestos. En una etapa inicial, la matriz original probablemente compuesta por partículas de vidrio volcánico, fue alterada (desvitrificación y/o hidratación) dando lugar a la formación de minerales de arcilla de carácter expansivo. Posteriormente, debido a la naturaleza friable de la roca, en combinación con ciclos repetidos de humectación y secado, se produjo disgregación por el efecto de expansión-contracción del material intersticial. A medida que esto ocurrió, de manera concomitante, se produjo la incorporación progresiva de finos por iluviación desde el suelo suprayacente, favoreciendo el desarrollo de arcilla secundaria y generando un reemplazo progresivo y masivo de la fábrica original.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está en extremo alterada debido al reemplazamiento generalizado de su estructura original, por arcilla de origen secundario, resultante de la incorporación progresiva de finos, por iluviación desde el suelo suprayacente. Esto favoreció el desarrollo de una fábrica netamente matriz-soportada. La población granular está principalmente formada por cristales y fragmentos de cristales tales como: plagioclasa, hornblenda, biotita, y minerales opacos (magnetita e ilmenita). En menor cantidad se reconocen líticos de origen volcánico consistentes en detritos de andesita y clastos de rocas formadas por vidrio, microcristales y microfenocristales. La porosidad está representada por grietas y microfracturas irregulares, atribuidas a contracción por deshidratación de la matriz.

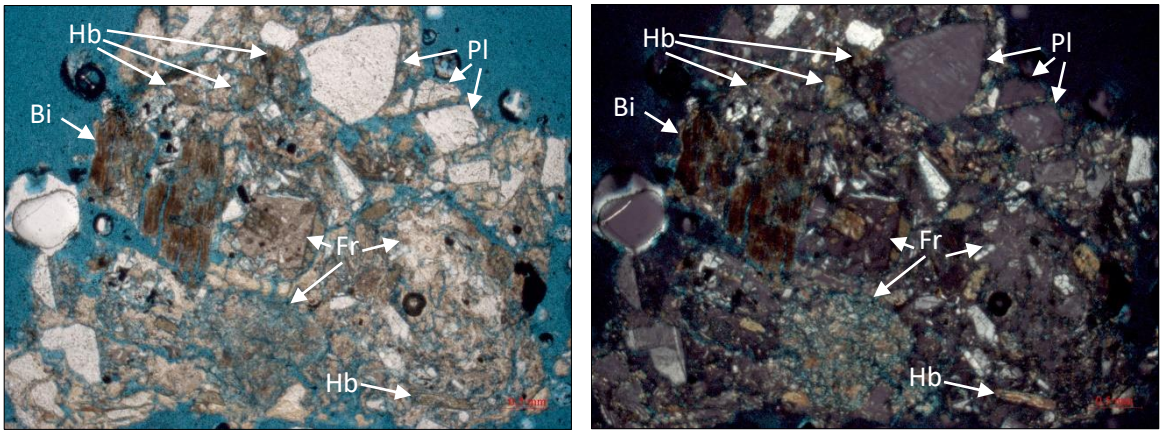


Figura 29. Aspecto general de la roca. Note apariencia expandida de la fábrica, debido a la presencia de poros circungranulares. Observe algunos tipos de clastos: (1) plagioclasa (Pl), (2) hornblenda (Hb), (3) biotita (Bi) y (4) fragmentos líticos de origen volcánico (Fr). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

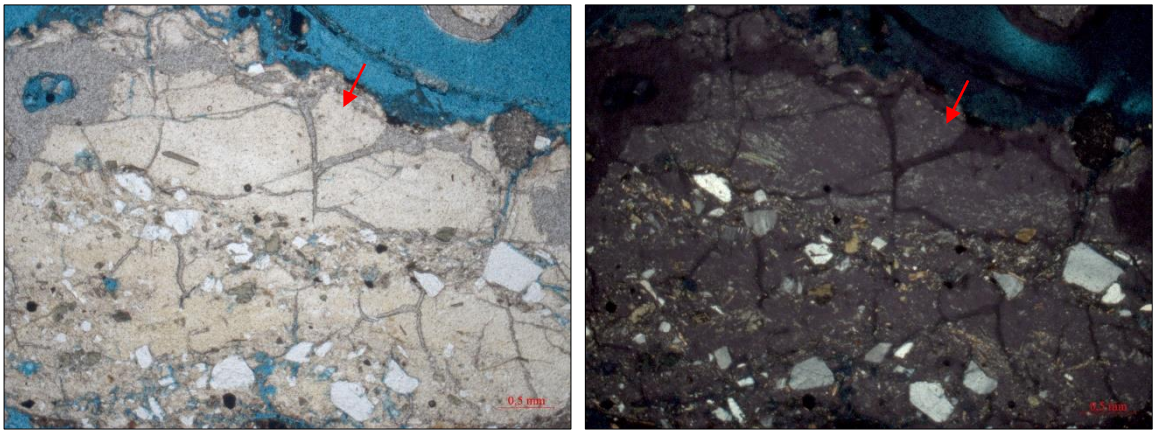


Figura 30. Detalle de zonas masivamente reemplazadas por arcilla secundaria atribuida a infiltración desde el horizonte de suelo suprayacente al hipogeo. Observe zonas prácticamente libres de fragmentos (señaladas por flechas rojas). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 10	M10-S5

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente / ****Recubrimiento:*** no se reconoce un horizonte que constituya un enlucido y una película de pigmento. Se observa una capa negra homogénea, que al tacto es blanda.



Figura 31. Observe en la foto izquierda recubrimiento grueso de color gris oscuro a negro. Note en la foto derecha aspecto granular y friable marcado de la muestra. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: matriz-soportado.
- Orientación primaria: ausente.
- Evidencias de compactación primaria: fragmentos sin deformación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.30 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.07 - 1 mm (ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. Esporádicamente subangular.
- Forma: principalmente elongada, en menor cantidad subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (%):
- Cristales y fragmentos de cristales (42.4%): clastos incompletos y en su mayoría frescos (o incipientemente alterados) de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita y minerales opacos (magnetita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (3.7%). Detritos de rocas volcánicas representados por: andesita (con textura microporfirítica y/o traquítica), dacita y rocas lávicas (con textura microporfirítica) formadas por vidrio y microcristales de plagioclasa y hornblenda.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El material intersticial está fundamentalmente representado por minerales de arcilla (57.6%), de cuyas características microscópicas se deduce que son de origen secundario. La masa arcillosa se encuentra homogéneamente distribuida en un arreglo esencialmente matriz-soportado. Se infiere que esta distribución ha sido el producto del cambio progresivo desde una fábrica inicialmente clasto-soportada, debido al reemplazamiento paulatino de la matriz volcánica original, por arcilla secundaria. Lo anterior es el producto de infiltración de finos por iluviación, desde el horizonte suprayacente del suelo.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (12.8%): (1) oquedades amorfas creadas por desprendimiento de material o caída de fragmentos y/o matriz y (2) grietas y microfracturas irregulares atribuidas a contracción por deshidratación. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración de la roca es el producto de una secuencia de procesos, que dieron inicio en la desvitrificación y transformación a minerales de arcilla de la matriz, originalmente constituida por partículas de vidrio volcánico. En etapas posteriores, debido a la friabilidad del material, en concomitancia con ciclos de humectación y secado, se favoreció la disgregación por expansión y contracción del aglomerante intergranular. En forma simultánea ocurrió infiltración de finos por iluviación, desde el suelo localizado en la parte superior del hipogeo, desencadenando la incorporación de arcilla secundaria y generando el reemplazamiento paulatino de la fábrica inicial. Este proceso se tradujo en un incremento de la arcillocidad y en la pérdida de los elementos granulares que sustentaban la estructura primaria de la roca.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.
❖ Características: el soporte de roca se encuentra desprovisto de enlucido y pigmento, presenta una delgada capa superficial de color negro y de consistencia blanda, la cual está compuesta por arcilla interdigitada con materia orgánica. Observaciones y deducciones: Este material se interpreta que es el resultado de la infiltración de fluidos desde el horizonte del suelo que suprayace al hipogeo. Dicha infiltración, causó el desarrollo de recubrimientos arcillosos (*clay cutans*) tanto en el espacio poral de la roca, como en la superficie de la misma.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está esencialmente compuesta por detritos volcánicos, aglutinados por minerales de arcilla de cuyas características se deduce que son de origen secundario. De ellos se infiere que fueron generados por infiltración de finos desde el horizonte del suelo que suprayace al hipogeo. La población granular está constituida por: (1) cristales y fragmentos de cristales (plagioclasa, hornblenda, biotita y minerales opacos (magnetita)) y (2) clastos de vulcanitas tales como: andesita, dacita y líticos lávicos formados por vidrio y microcristales de plagioclasa y hornblenda. El soporte de roca se encuentra desprovisto de enlucido y pigmento, y presenta una delgada capa superficial de color negro y de consistencia blanda, la cual está compuesta por arcilla interdigitada con materia orgánica. La porosidad es de carácter secundario y está representada por oquedades amorfas creadas por desprendimiento de material y grietas y microfracturas irregulares atribuidas a contracción por deshidratación.

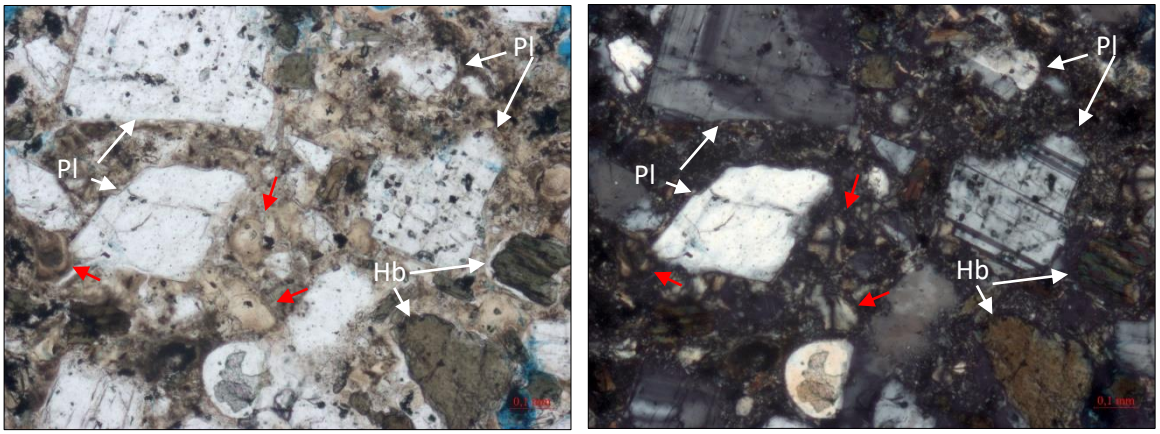


Figura 32. Detalle de la estructura de la roca. Note población granular aglutinada por minerales de arcilla con hábito radial y concéntrico (flechas rojas). Observe algunos fragmentos de plagioclasa (Pl) y hornblenda (Hb). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

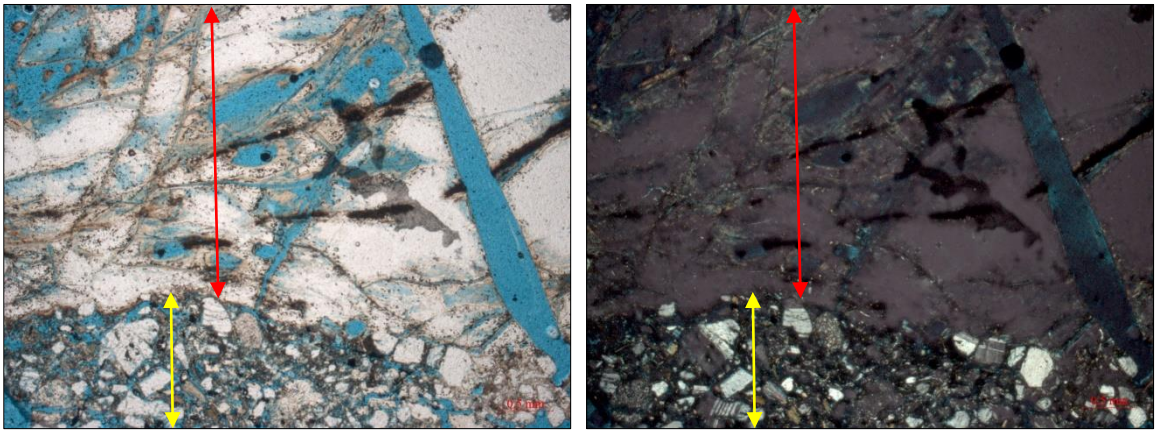


Figura 33. Vista panorámica en la que se aprecia el recubrimiento arcilloso (flecha roja) sobre el soporte de roca (flecha amarilla). Observe numerosas microfracturas y grietas atribuidas a contracción por deshidratación. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 11	M11-S5

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.25 - 0.99 mm) / ***Selección:** buena / ***Composición:** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente al tacto / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Enlucido:** ausente / ***Pigmento:** ausente / ***Sales:** la muestra exhibe un recubrimiento diseminado superficial de color blanco, que parece corresponder a una sal y que a ojo desnudo no se encuentra en el interior de la roca.



Figura 34. Características generales. Observe oquedades superficiales y apariencia granular marcada de la roca. Note pátina blancuzca, que posiblemente corresponde a una sal. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: fábrica heterogénea, con zonas dominantemente clasto-soportadas y zonas esencialmente matriz-soportadas.
- Orientación primaria: los detritos se encuentran dispersos en medio del material intersticial y no exhiben ningún tipo de orientación preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: los granos están libre de deformación por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.21 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.05 - 0.7 mm (ceniza fina - ceniza gruesa).
- Redondez: muy angular y angular. En ocasiones subangular.
- Forma: predominantemente elongada, en menor cantidad subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: flotantes.
- Selección: buena.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (%):
- Cristales y fragmentos de cristales (24.6%): detritos incompletos y en su mayoría frescos a levemente alterados de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita y minerales opacos (magnetita e ilmenita).

❖ Fragmentos de roca cognados y accidentales (7.4%): granos de carácter volcánico que se distinguen por ostentar textura microporfirítica y en algunos casos evidencias de desvitrificación. Se identificaron: andesita y clastos compuestos por vidrio, microcristales y microfenocristales de plagioclasa y cuarzo beta (β).
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
La matriz aglutinante está constituida principalmente por minerales de arcilla de naturaleza secundaria (68%), aspecto que se infiere a partir de sus características microscópicas. Ella se distribuye de manera heterogénea, configurando una fábrica predominantemente matriz - soportada. En algunos sectores aislados se reconocen masas amorfas grandes libres de granos y en otros, fragmentos embebidos en el material intersticial. Lo anterior se interpreta que es el resultado de la evolución progresiva desde una fábrica originalmente clasto-soportada, como consecuencia del reemplazamiento gradual de la matriz volcánica original, por arcilla de fuera del sistema. Este proceso se asocia a la infiltración de finos por iluviación desde el horizonte de suelo suprayacente. No se descarta que la arcilla se encuentre entremezclada con materia orgánica.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (21%): (1) oquedades irregulares atribuidas a caída de material (desprendimiento de fragmentos y/o matriz) y (2) grietas y microfracturas irregulares creadas por deshidratación debido a contracción-expansión, durante ciclos de humectación y secado. ❖ Conectividad: tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
Las características microscópicas identificadas, apuntan a que el estado actual de la roca es el producto de la superposición de diversos procesos. En un estado inicial, la matriz original probablemente constituida por partículas de vidrio volcánico, experimentó procesos de desvitrificación y/o hidratación, que dieron lugar a la formación de minerales de arcilla de carácter expansivo. Posteriormente, la friabilidad litológica, en conjunto con ciclos reiterados de humectación y secado, favorecieron la disgregación debido a expansión y contracción del material intersticial. De manera concomitante, se produjo la incorporación progresiva de finos por iluviación desde el suelo suprayacente, lo que promovió el desarrollo de arcillas secundarias y condujo a un reemplazamiento gradual y generalizado de la fábrica original.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está intensamente alterada debido al reemplazo generalizado de su fábrica original por arcillas secundarias, derivadas de iluviación de finos desde el suelo suprayacente. Esto ha generado una estructura matriz-soportada. En algunos sectores aislados se encuentran masas amorfas grandes libres de granos, y en otros, fragmentos embebidos en el material intersticial. La fracción granular está esencialmente formada por cristales de plagioclasa, hornblenda, biotita y minerales opacos (magnetita e ilmenita). En menor proporción, se reconocieron líticos volcánicos tales como: andesita y fragmentos vítreos interdigitados con microcristales de plagioclasa y cuarzo beta. La porosidad corresponde principalmente a grietas y microfracturas, creadas por deshidratación debido a contracción-expansión, durante ciclos de humectación y secado. Algunas de ellas representan canales de permeabilidad. Ocasionalmente se observan oquedades amorfas generadas por desprendimiento de material.

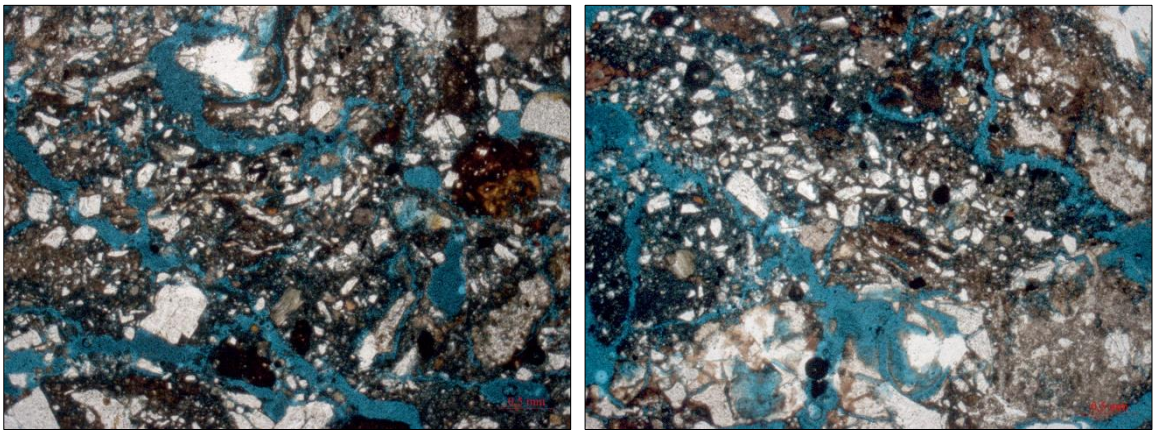


Figura 35. Apariencia microscópica de la roca. Observe granos embebidos en la masa arcillosa intersticial. Note abundantes grietas y microfracturas abiertas, algunas de las cuales representan canales de permeabilidad. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

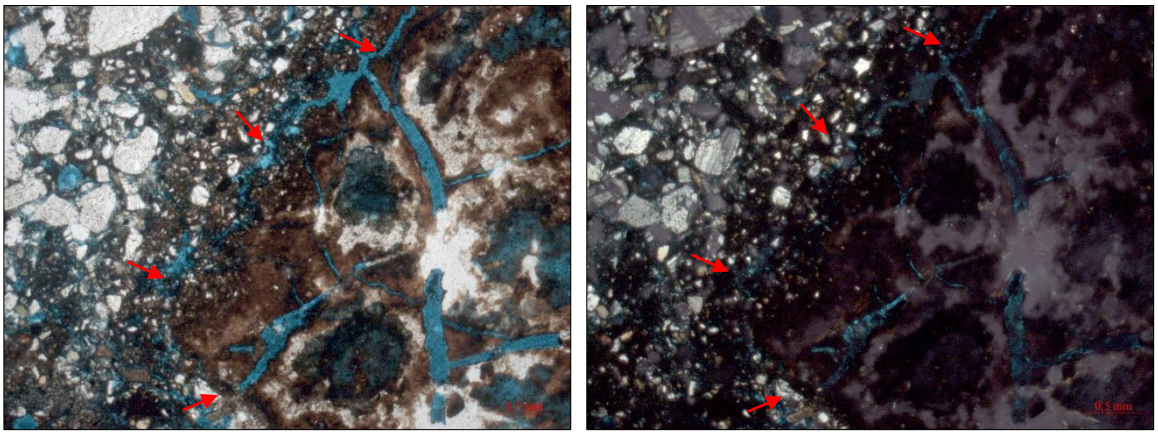


Figura 36. Sector en el que se aprecia una masa amorfa grande libres de granos (señaladapor flechas rojas), de la que se infiere que es el producto de infiltración por eluviación. Note numerosas fracturas irregulares. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 12	M12-SA1

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** : feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente al tacto / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido?:*** de color crema, compuesto por detritos (tamaño arena muy fina a fina) englobados por una matriz con aspecto uniforme / ****Pigmento:*** ausente.



Figura 37. Características generales de la roca. Note apariencia granular friable de la muestra y posible recubrimiento de carácter antrópico, de color crema. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: esencialmente clasto-soportado, en algunos sectores aislados es matriz-soportado.
- Orientación primaria: no se reconoce ningún tipo de alineación preferencial en los fragmentos.
- Evidencias de compactación primaria: la población clástica está libre de deformación por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.56 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.05 - 10 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: para cristales y fragmentos de cristales, en su mayor parte muy angular a angular y ocasionalmente subangular. Para el material pumítico, subredondeada a redondeada.
- Forma: en general elongada, esporádicamente subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: predominantemente puntuales a flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (26.8%): fragmentos frescos de pumitas y detritos también frescos, sin porosidad, de vidrio volcánico en el que aparecen diseminados microcristales de plagioclasa y hornblenda.
- Cristales y fragmentos de cristales (30.7%): cristales incompletos libres de alteración de: cuarzo beta (β), plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita y granos opacos (tipo ilmenita y magnetita).

❖ Fragmentos de roca cognados y accidentales (10.7%). Están representados por líticos de origen volcánico tales como andesita (o basalto con textura microporfirítica), dacita, rocas volcanoclásticas alteradas tipo toba soldada y vulcanitas de carácter lávico con textura microcristalina y de flujo.
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El material intersticial (31.8%) se encuentra homogéneamente distribuido, aparece aglutinando la población de fragmentos y está compuesto por minerales de arcilla entremezclados con partículas de vidrio volcánico. Dichas partículas se observan desde frescas hasta incipientemente devitrificadas o hidratadas.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (13.3%): (1) intergranulares de origen secundario, generados por hidratación y posterior disolución del vidrio volcánico que forma la matriz, (2) intragranulares primarios, en fragmentos de pumita, (3) huellas de disolución completa de fragmentos pumíticos y (4) circumgranulares, atribuidos al contraste mecánico existente entre clastos y matriz, lo que favorecen apertura por reacomodo, con subsecuente alteración del material intersticial. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración principal se deduce que es el resultado de la transformación de la matriz vítrea original de la roca, en minerales de arcilla. Este proceso ha incidido directamente en el desarrollo de porosidad secundaria, friabilidad y carácter higroscópico del material. En conjunto, estos aspectos favorecen la retención de humedad y la movilidad de soluciones.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.
❖ Características: el soporte de roca se encuentra recubierto por una delgada capa de mortero, cuyas características microscópicas indican la presencia de: (1) fragmentos de yeso, en la forma de cristales fibrosos aislados, (2) fragmentos de toba (clastos de plagioclasa y hornblenda) y una (3) una matriz probablemente formada por arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado. Observaciones y deducciones: la presencia de cristales yeso en la capa blanca, apunta a su uso como componente aglutinante, lo que también sugiere que este material pudo haber sido sometido a calentamiento controlado a baja temperatura, para activar sus propiedades de fraguado.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981), con evidencias de retrabajamiento sedimentario. La roca está compuesta por fragmentos volcánicos diversos, inmersos en una matriz intersticial integrada por partículas de vidrio volcánico (desde frescas hasta parcialmente alteradas) entremezcladas con minerales de arcilla. La población de fragmentos está representada por: (1) clastos de pumita y detritos vítreos (rocas con textura microcristalina), (2) cristales y fragmentos cristalinos de plagioclasa, hornblenda, biotita y granos opacos (tipo ilmenita y magnetita) y (3) líticos volcánicos de naturaleza variada, tanto cognados como accidentales. La porosidad es en su mayoría de origen secundario y su interconexión se considera nula a tortuosa. Sobre el soporte rocoso se observa un recubrimiento antrópico, cuyas características microscópicas indican la presencia de yeso (cristales fibrosos), fragmentos de toba y una matriz probablemente formada por arcilla, yeso y material volcanoclástico finamente particulado.

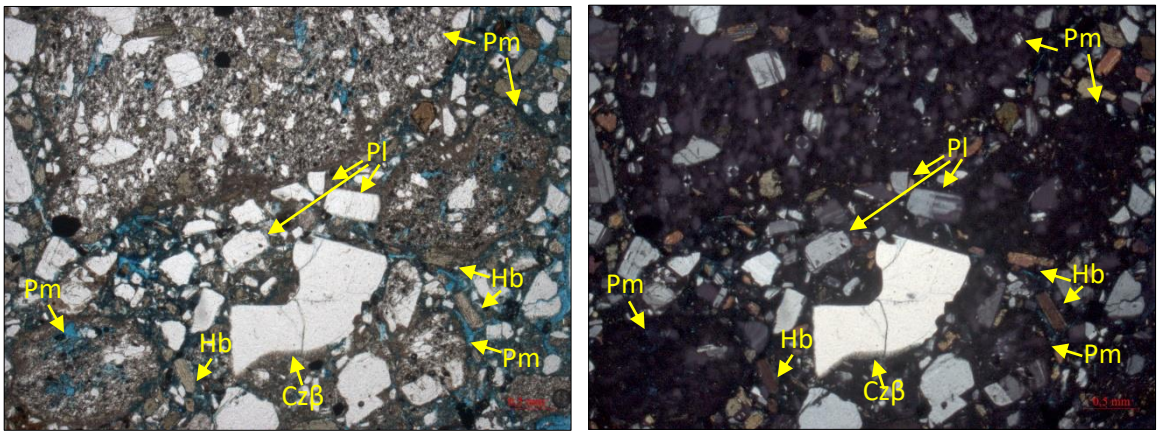


Figura 38. Características generales de la roca. Observe ejemplos de algunos tipos de fragmentos: (1) pumita (Pm), (2) plagioclasa (Pl), (3) cuarzo beta (Czβ) y (4) hornblenda (Hb). (Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

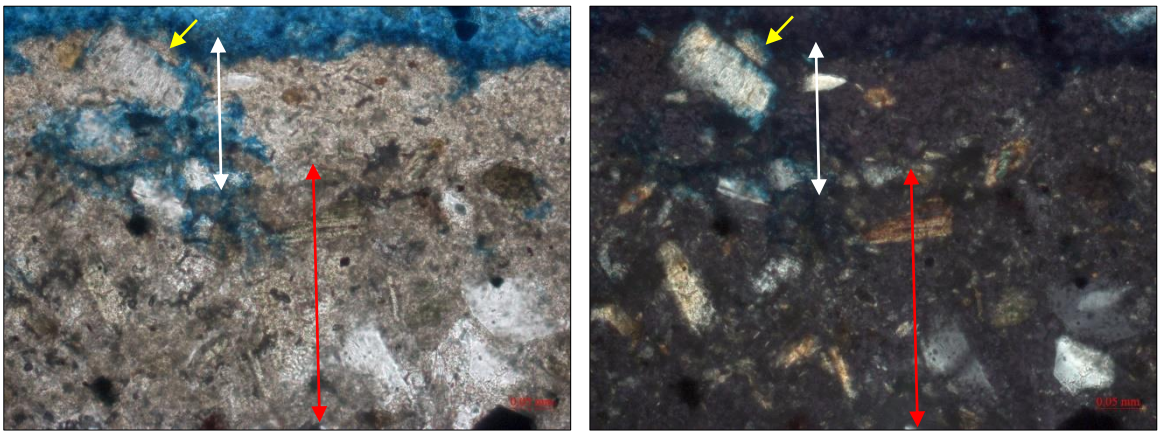


Figura 39. Detalle de recubrimiento antrópico delgado (enmarcado por flecha blanca), sobre el soporte de roca (enmarcado por flecha roja). Vea posible cristal de yeso fibroso (señalado por flecha amarilla). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 0.62 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 13	M13-SA1

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.125 - 0.49 mm) / ****Selección:*** buena / ****Composición:*** : feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente al tacto / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** de color crema, compuesto por detritos (tamaño arena muy fina a fina) embebidos en una matriz homogénea. En un sector de la superficie se reconoce una costra delgada de color negro rojizo / ****Pigmento:*** ausente.

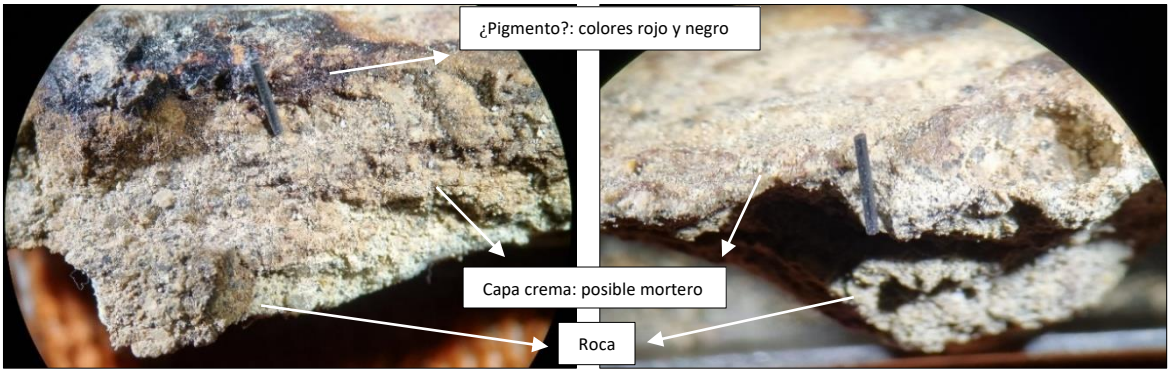


Figura 40. Aspecto general de la roca. Note recubrimientos representados por un posible mortero de color crema y una delgada capa oscura de colores negro y rojo. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: clasto-soportado.
- Orientación primaria: ausencia de alineación de fragmentos.
- Evidencias de compactación primaria: los clastos no se observan deformados por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.55 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.05 - 14 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: para cristales y fragmentos de cristales, en general muy angular a angular y ocasionalmente subangular. Para los clastos de pumita, subredondeada a redondeada.
- Forma: en su mayor parte elongada, en oportunidades subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: principalmente puntuales a flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (35.5%): fragmentos frescos de pumita y clastos no porosos, formados por vidrio, que normalmente contienen microcristales de plagioclasa y hornblenda.
- Cristales y fragmentos de cristales (23.3%): detritos incompletos y en general frescos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita y minerales opacos (tipo ilmenita y magnetita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (8.8%). Corresponden a líticos volcánicos representados por andesita o basalto (con textura microporfirítica y traquítica), dacita, rocas

volcanoclásticas alteradas tipo toba soldada y vulcanitas lávicas con textura microcristalina y de flujo.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)

El material intersticial (32.4%) se distribuye de manera relativamente homogénea, actuando como fase que envuelve y cohesiona la población de fragmentos. Está constituido por una mezcla de minerales de arcilla y partículas de vidrio volcánico, las cuales se presentan desde frescas hasta incipientemente devitrificadas o hidratadas.

2.3. Otros

- Materia orgánica (%):

3. Clasificación

3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)

Toba de ceniza, no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.

3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)

Toba cristalina-lítica, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.

4. Porosidad e interconexión de los poros

- Tipos de poros (11.8%): (1) espacios intergranulares (secundarios), generados por hidratación y subsecuente disolución de las partículas de vítreas que forman la matriz, (2) oquedades intragranulares primarias, en clastos de pumita, (3) huellas por disolución casi total a total de fragmentos pumíticos, (4) grietas y microfracturas, producidas por contracción debida a deshidratación y (5) poros circumgranulares, alrededor de algunos tipos de grano.
- Conectividad: nula a tortuosa.

5. Alteración e implicaciones para la conservación.

La alteración se deduce que es el producto de la transformación de la matriz vítrea primaria en minerales de arcilla. Este proceso ha influido de manera directa en la generación de porosidad secundaria, el incremento de la friabilidad y el aumento del carácter higroscópico.

6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

- Características: el mortero que suprayace el soporte de roca y que macroscópicamente exhibe color crema, desde el punto de vista microscópico corresponde a dos recubrimientos (en algunas zonas parecen ser tres). Dichos recubrimientos se encuentran suprayacidos por una capa de oxidación, discontinua, de origen natural. Los niveles antrópicos de base a tope están representados por: (1) capa inferior, de espesor variable (0.3 mm-0.9 mm), formada por fragmentos de toba embebidos en una masa arcillosa de colores vivos, la cual en ciertos sectores, exhibe tonalidad oscura y (2) capa superior (0.08 mm-1.3 mm), por sectores naturalmente teñida con óxido de hierro, compuesta por cristales de yeso fibroso y ocasionales fragmentos de yeso microcristalino, embebidos en una matriz fina, oscura, compuesta por diminutas partículas con rasgos similares (posiblemente se trata del mismo mineral triturado). La capa de oxidación superficial, está constituida por óxido de hierro (con apariencia microscópica de hematita) mezclado con eventuales micas finas o minerales de arcilla. Es importante resaltar que este último material, también se observa en el interior de la roca rellenado parcialmente microfracturas.

Observaciones y deducciones: del nivel antrópico inferior, se infiere que tuvo como propósito el relleno de irregularidades y la homogenización de la superficie. Del nivel superior, se propone que corresponde a un enlucido para proporcionar acabado superficial, pudiendo además servir como soporte para decoración o pigmentación. Debido a que este último contiene yeso, no se descarta que previo a su postura, el material haya sido sometido a tratamiento térmico (exposición a baja temperatura), para producir fraguado.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario. **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981), con evidencias de retrabajamiento sedimentario. La roca está constituida por fragmentos volcánicos variados, incluidos en una matriz compuesta por minerales de arcilla interdigitados con partículas de vidrio volcánico. La fracción detrítica está conformada por: (1) clastos de pumita y partículas vítreas, (2) cristales y fragmentos de cristales (plagioclasa, hornblenda, biotita y minerales opacos (ilmenita y magnetita) y (3) líticos volcánicos cognados y accidentales (andesita, basalto, dacita, rocas volcanoclásticas tipo toba soldada y vulcanitas lávicas). La porosidad es en su mayoría secundaria, con conexión nula a tortuos. El soporte de roca está recubierto por un mortero de color crema, compuesto por dos capas que se superponen. La capa inferior, está en general formada por fragmentos de toba embebidos en una masa arcillosa de colores vivos y la superior, está constituida por cristales de yeso fibroso y ocasionales fragmentos de yeso microcristalino, embebidos en una matriz fina, oscura, compuesta por diminutas partículas con rasgos similares (posiblemente se trata del mismo mineral triturado).

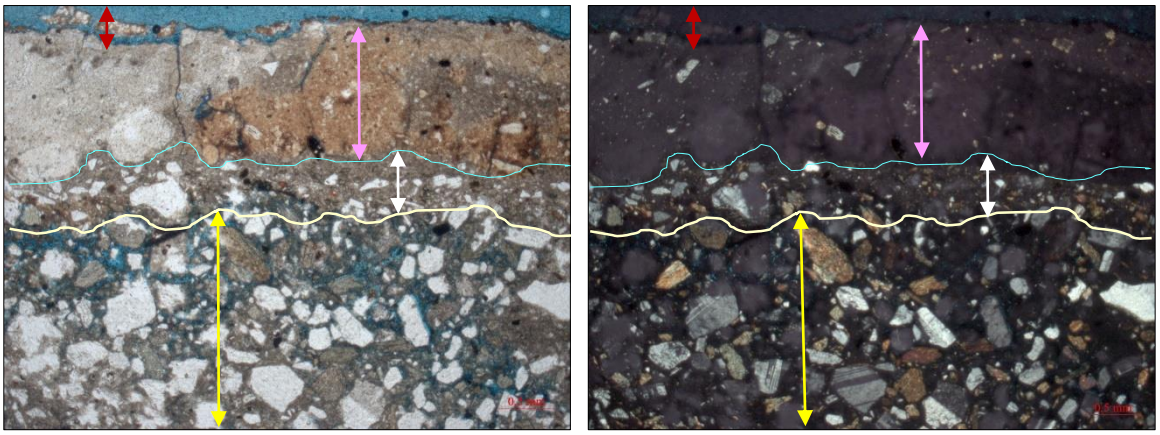


Figura 41. Vista panorámica de la muestra. La roca (flecha amarilla) exhibe fábrica clasto-soportada. Observe como el mortero está subdividido en dos capas (enmarcadas por flechas blanca y rosada). Note película superficial de oxidación (enmarcada por flecha roja). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

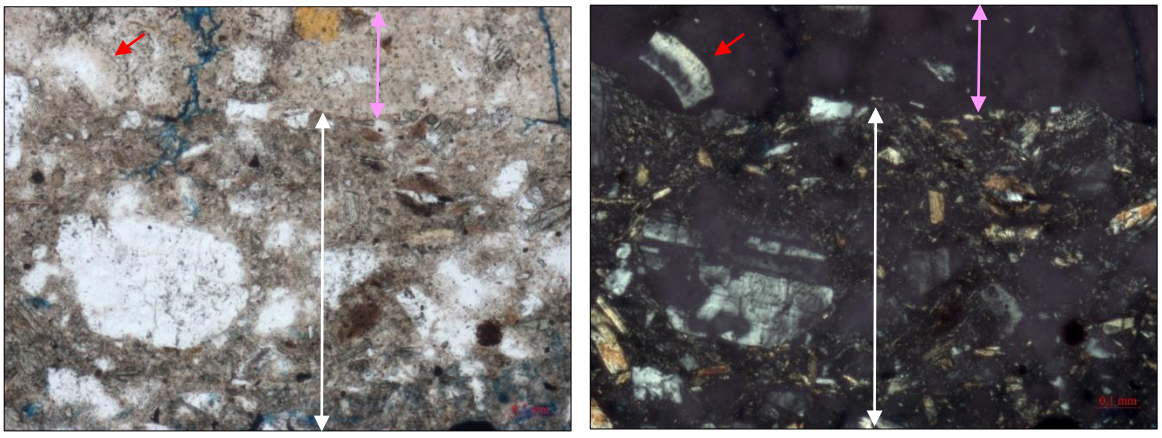


Figura 42. Detalle del recubrimiento antrópico. Note en la capa inferior (flecha blanca) matriz de colores vivos debido a la presencia de arcilla. Vea como en la capa superior (flecha rosada), la matriz es oscura. Observe cristal de yeso (flecha roja) embebido en la matriz de la capa superior. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 14	M14-SA8

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.06 - 0.24 mm) / ***Selección:** buena / ***Composición:** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Enlucido:** posible capa de mortero recubriendo el soporte de roca / ***Pigmento:** por encima del posible mortero, se presenta una capa delgada uniforme, de color negro, que al tacto es blanda.

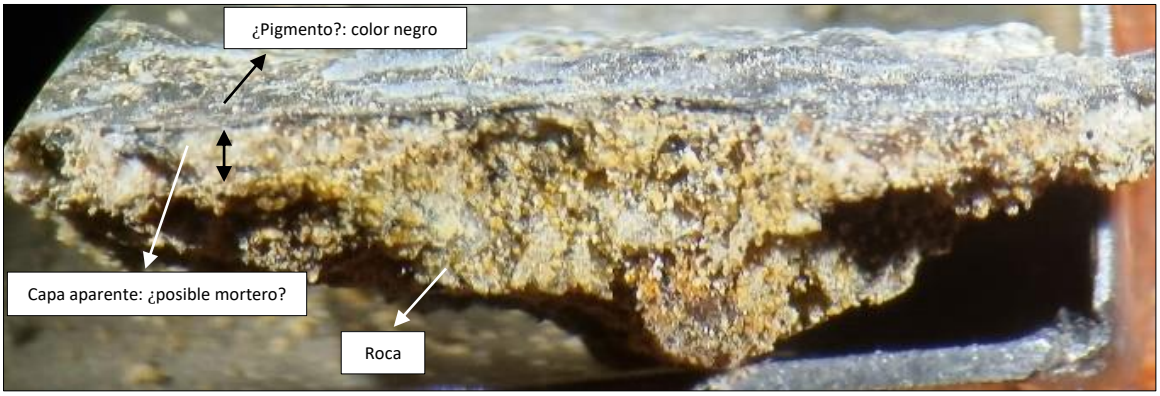


Figura 43. Apariencia general de la roca. Observe aparente capa de mortero de espesor variable, suprayacido por un nivel delgado de color negro.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: clasto-soportado.
- Orientación primaria: los clastos no se observan orientados.
- Evidencias de compactación primaria: los fragmentos no exhiben deformación por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.53 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.1 - 4.9 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: para los fragmentos líticos de mayor tamaño, tiende a ser subangular a subredondeada. La fracción de menor tamaño, se caracteriza por mostrar bordes muy angulares, angulares y subangulares.
- Forma: principalmente elongada, en ocasiones subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: principalmente puntuales a flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (4.1%): fragmentos de pumita (frescos a incipientemente alterados).
- Cristales y fragmentos de cristales (26.3%): clastos frescos e incompletos de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y minerales opacos (tipo ilmenita y magnetita).
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (45.3%). Se identificaron: (1) líticos volcánicos con textura microporfirítica tales como andesita y dacita, (2) detritos sin porosidad, constituidos por vidrio devitrificado, en los que frecuentemente se identifican microcristales

(de plagioclasa y hornblenda) y (3) rocas metamórficas regionales diversas, con textura foliada, algunas parecen corresponder a meta-areniscas y otras a meta-basitas compuestas por feldespato, hornblenda, epidota, micas (moscovita y biotita) y plagioclasa.

2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)

La matriz (24.3%) se encuentra homogéneamente distribuida embebiendo la población de fragmentos. Está principalmente compuesta por minerales de arcilla en muchas zonas teñidos por óxido de hierro. En áreas puntuales se reconocen partículas de vidrio volcánico parcialmente hidratadas, lo que sugiere que estas constituían la composición original de la matriz

2.3. Otros

- Materia orgánica (%):

3. Clasificación

3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)

Toba de ceniza, no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.

3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)

Toba lítica-cristalina, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.

4. Porosidad e interconexión de los poros

- Tipos de poros (23%). Se reconocieron diversas formas de porosidad: (1) espacios intergranulares de origen secundario, creados por hidratación y posterior disolución de las partículas vítreas que conformaban la matriz, (2) cavidades intragranulares primarias en fragmentos de pumita, (3) oquedades amorfas producidas por disolución casi total o completa de clastos pumíticos y (4) grietas y microfracturas generadas por contracción debida a deshidratación.
- Conectividad: nula a tortuosa.

5. Alteración e implicaciones para la conservación.

La alteración está principalmente representada por la transformación del vidrio volcánico particulado primario en minerales de arcilla. Este proceso contribuyó en generar estabilización de clastos debido al carácter aglutinante del material, sin embargo, dicha transformación implicó la disminución de la competencia mecánica. Debido a la friabilidad de la muestra y a numerosos faltantes producidos por desprendimiento de material, no se descarta que haya existido incorporación de arcilla secundaria por iluviación, lo que habría incrementado el ablandamiento de la roca.

6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

- Características: la muestra presenta dos recubrimientos antrópicos, que de base a techo se describen así: (1) una capa inferior, con espesor entre 0.25 mm y 0.95 mm, compuesta por cristales de yeso fibroso de tamaño variable (fino a muy grueso), inmersos en una matriz oscura constituida por minerales de arcilla y partículas microcristalinas de características similares, posiblemente derivadas del mismo material triturado; y (2) una capa superior de carácter pictórico, con espesor entre 0.1 mm y 0.66 mm, formada predominantemente por fragmentos de rocas metamórficas tipo pizarra filítica (ricas en grafito y micas finas), acompañadas de manera subordinada por cristales finos de yeso fibroso, aglutinados por minerales de arcilla.

Observaciones y deducciones: se infiere que la capa inferior cumplió una función de acabado superficial y posiblemente actuó como soporte para la aplicación de pigmentos. La capa superior habría sido destinada a conferir coloración negra a la superficie. La presencia de yeso en ambos niveles sugiere el uso de material finamente triturado, y no se descarta que, previo a su aplicación, haya sido sometido a un tratamiento térmico a baja temperatura para inducir su capacidad de fraguado.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario. **Clasificación composicional**: toba lítica-cristalina (Schmid,1981), con evidencias de retrabajamiento sedimentario. Esta esencialmente compuesta por clastos de origen volcánico, embebidos en una matriz formada por minerales de arcilla y partículas de vidrio volcánico. La población de fragmentos está constituida por: (1) detritos de pumita, (2) clastos incompletos de cristales (plagioclasa, hornblenda, biotita, epidota y minerales opacos) y (3) líticos diversos tales como: andesita, dacita, granos vítreos con microcristales diseminados y rocas metamórficas regionales, con textura foliada (meta-areniscas y meta-basitas)). La porosidad es de origen secundario y su interconexión varía entre nula y tortuosa. La muestra presenta dos recubrimientos antrópicos que se superponen. El nivel inferior está compuesto por cristales de yeso fibroso, inmersos en una matriz constituida por minerales de arcilla y partículas microcristalinas de características similares, posiblemente derivadas del mismo material triturado. El nivel superior, de carácter pictórico, está formado por granos de rocas metamórficas ricas en grafito y cristales finos de yeso, aglutinados por minerales de arcilla.

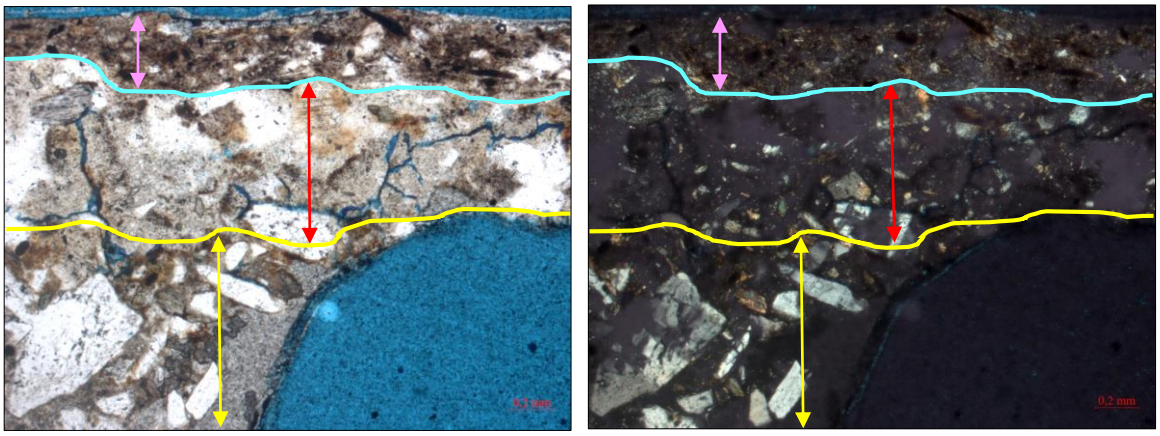


Figura 44. Vista general de la muestra. Observe soporte de roca (enmarcado por flecha amarilla). Note recubrimientos antrópicos, el inferior (enmarcado por flecha roja) es de tono claro (foto izquierda), en comparación con el superior (enmarcado por flecha rosada), de tono oscuro, debido a que está formado por fragmentos metamórficos ricos en grafito. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

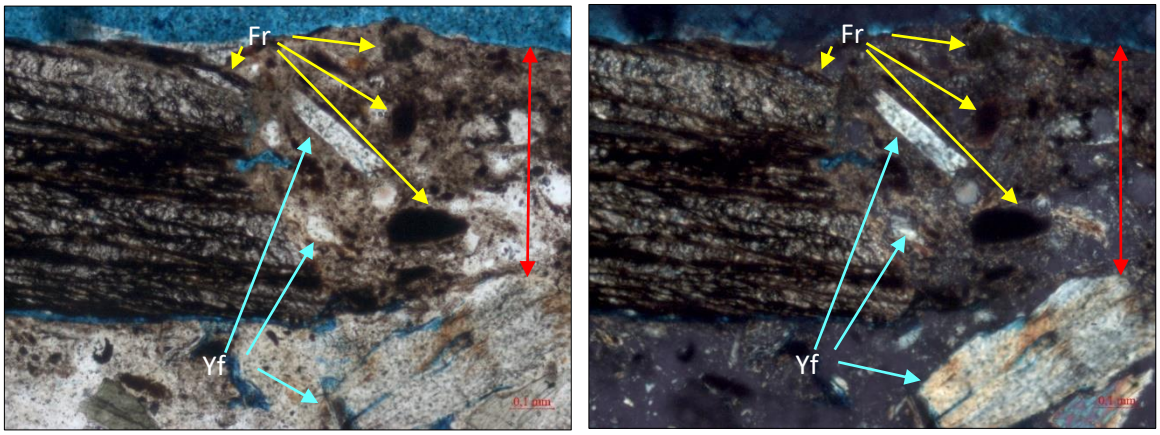


Figura 45. Detalle del recubrimiento antrópico. Note granos de rocas metamórficas ricas en grafito (Fr) en la capa superior (enmarcada por flecha roja) y fragmentos de yeso fibroso (Yf). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 15	M15-SA8

Descripción macroscópica

***Clasificación:** toba cristalina-lítica / ***Tamaño:** ceniza gruesa (en general 0.06 - 0.24 mm) / ***Selección:** buena / ***Composición:** feldespato (dominante), hornblenda, biotita y fragmentos líticos (subordinados) / ***Aspecto:** granular marcado / ***Friabilidad:** alta, se disgrega fácilmente al tacto / ***Materiales ligantes:** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ***Enlucido:** ausente / ***Pigmento:** ausente.

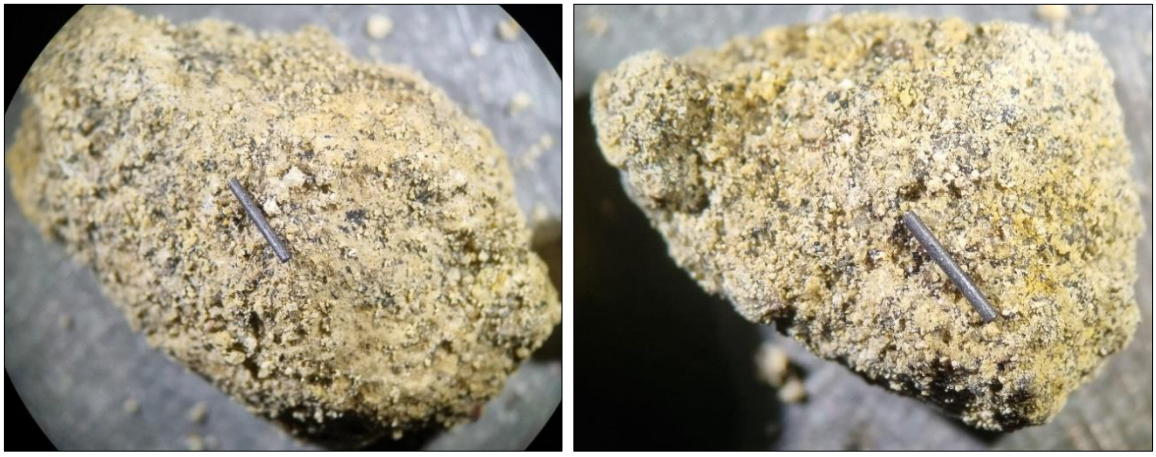


Figura 46. Características macroscópicas de la roca. Note apariencia granular marcada, lo que apunta a un material altamente friable. Longitud de la escala 5 mm.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: fábrica heterogénea, con dominios principalmente clasto-soportados y en menor proporción matriz-soportados.
- Orientación primaria: ausencia de orientación primaria.
- Evidencias de compactación primaria: los fragmentos están libres de deformación por compactación.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.62 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.08 - 11 mm (ceniza gruesa - lapilli).
- Redondez: los detritos de mayor tamaño tienden a exhibir contornos subangulares a subredondeados. Los clastos de menor tamaño, se distinguen por mostrar bordes muy angulares, angulares y subangulares.
- Forma: en su mayoría elongada, de manera subordinada son subequidimensional.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: en su mayoría puntuales a flotantes.
- Selección: pobre.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (14.7%): clastos frescos a levemente alterados de pumita.
- Cristales y fragmentos de cristales (23.1%): se caracterizan también por estar frescos a incipientemente alterados. Normalmente se encuentran incompletos y están representados por: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, epidota y minerales opacos (magnetita).

❖ Fragmentos de roca cognados y accidentales (27.6%): detritos de rocas volcánicas tales como: toba soldada, andesita (con textura porfirítica), basalto, dacita y granos de rocas metamórficas regionales de bajo grado tales como: cuarcita foliada, esquistos y metabasitas.
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
La matriz (34.6%) se observa uniformemente distribuida entre los clastos. Está principalmente compuesta por partículas frescas a incipientemente hidratadas (o devitrificadas) de vidrio volcánico, interdigitadas con minerales de arcilla. En algunos sectores del material intersticial, se identifican espacios intergranulares libres, de los que se interpreta que son el producto de disolución de dichas partículas.
2.3. Otros
❖ Materia orgánica (%):
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza, no soldada, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba lítico-cristalina, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (10.3%): (1) oquedades irregulares producidas por desprendimiento de material (fragmentos y/o matriz), (2) espacios primarios intrapartícula en clastos de pumita; (3) poros intergranulares, generados por hidratación y posterior disolución del vidrio volcánico que forma la matriz y eventuales (3) grietas y microfracturas irregulares y circungranulares, producidas por contracción por deshidratación. ❖ Conectividad: nula a tortuosa.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración se atribuye principalmente a hidratación del vidrio volcánico particulado, concentrado en el material intersticial, con la subsecuente formación de minerales de arcilla. Estos procesos han favorecido el desarrollo de caminos de permeabilidad, que se manifiestan como porosidad de matriz, microfracturas y grietas. La misma línea de evidencia indica, que ha ocurrido aumento de friabilidad y del comportamiento higroscópico del material. Lo anterior ha sido desencadenado por ciclos naturales de humectación y secado.
6. Recubrimientos naturales y/o de origen antrópico.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza (Fisher, 1961; Schmid, 1981), no soldada. **Clasificación composicional**: toba lítica-cristalina (Schmid,1981). La roca está esencialmente constituida por fragmentos diversos, en su mayor parte de origen volcánico, embebidos en una matriz formada por minerales de arcilla entremezclados con partículas también de vidrio volcánico. El conjunto granular está formado por: (1) clastos de pumita, (2) cristales y fragmentos de cristales, normalmente frescos e incompletos (plagioclasa, hornblenda, biotita, epidota y minerales opacos (magnetita) y detritos de rocas volcánicas (toba soldada, andesita, basalto y dacita) y metamórficas regionales de bajo grado (cuarcita foliada, esquistos y metabasitas). La porosidad es de carácter secundario, con conectividad predominantemente tortuosa y localmente limitada.

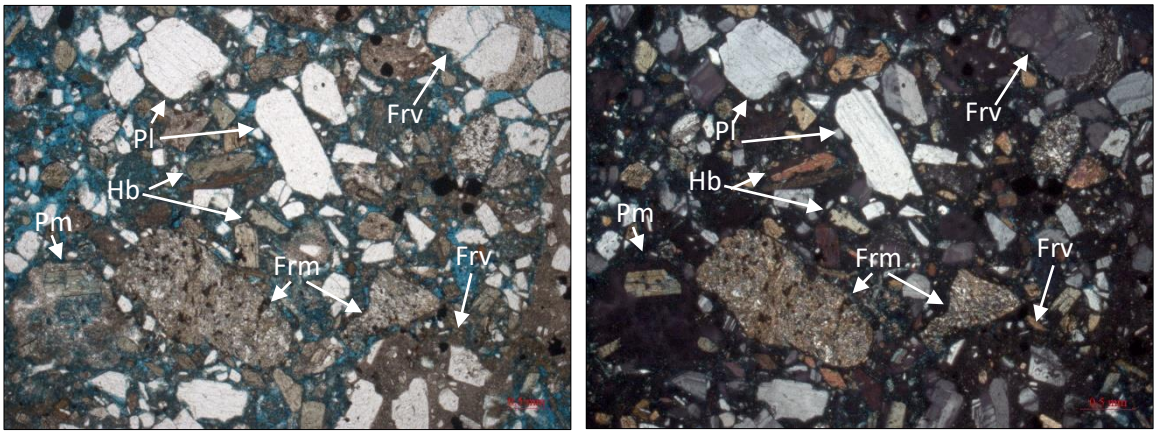


Figura 47. Ejemplos de algunos tipos de clastos: (1) plagioclasa (Pl), (2) hornblenda (Hb), (3) fragmentos de rocas volcánicas (Frv), (4) fragmentos de rocas metamórficas (Frm) y (5) fragmento de pumita (Pm). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

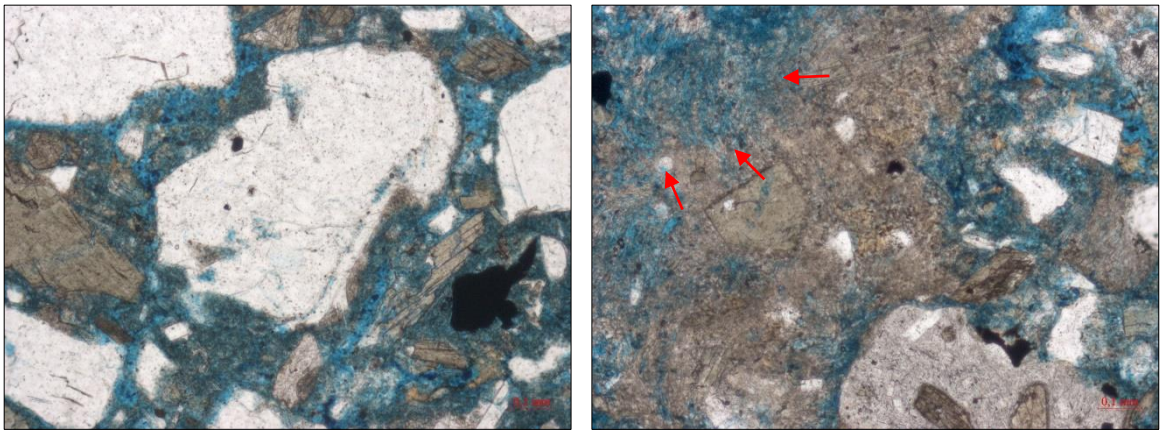


Figura 48. Detalle de la porosidad. Observe en la foto izquierda matriz con tonalidad azul, debido a que es microporosa. Note en la foto derecha fragmento de pumita con porosidad intragranular natural (señalada por flechas rojas). Nicoles paralelos. Longitud de las fotografías 1.3 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA	
Muestra 16	M16-SA1

Descripción macroscópica

****Clasificación:*** toba cristalina-lítica / ****Tamaño:*** ceniza gruesa (en general 0.06 - 0.54 mm) / ****Selección:*** buena a moderada / ****Composición:*** cuarzo, feldespato, líticos, micas (biotita y moscovita) y hornblenda / ****Aspecto:*** granular marcado / ****Friabilidad:*** alta, se disgrega fácilmente al tacto / ****Materiales ligantes:*** ausencia de fases vítreas intersticiales, no hay evidencia de cementación / ****Enlucido:*** ausente / ****Pigmento:*** ausente.

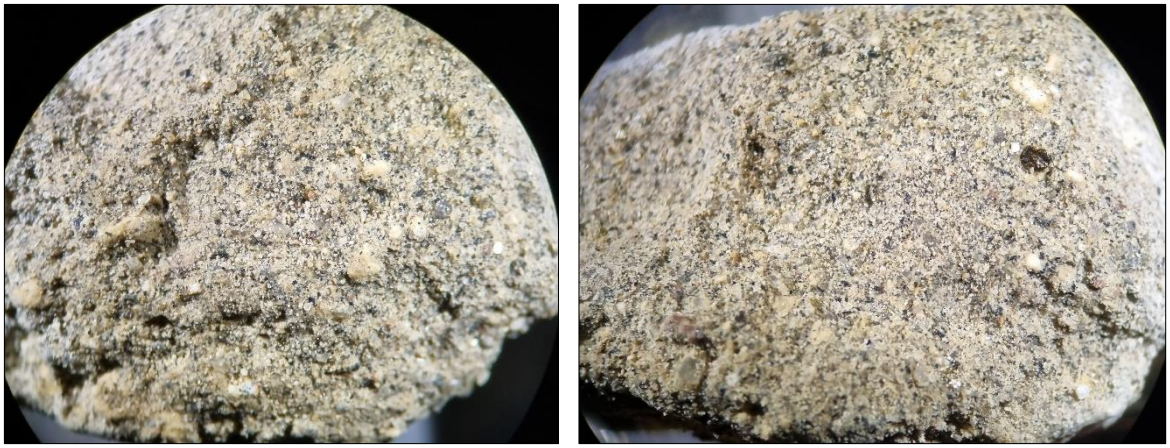


Figura 49. Note superficie rugosa de la roca, asociada al carácter friable de la muestra. Se distinguen mayoritariamente partículas de tonalidades claras y oscuras empaquetadas.

Descripción microscópica

1. Textura

1.1. Fábrica

- Tipo de soporte: fábrica heterogénea, con dominios clasto-soportados y matriz-soportados.
- Orientación primaria: ausencia de alineación preferencial.
- Evidencias de compactación primaria: clastos no deformados; ausencia de deformación plástica en fragmentos de pumita.

1.2. Características de los piroclastos (origen volcánico primario)

- Tamaño promedio: 0.56 mm (ceniza gruesa).
- Rango de tamaño: 0.06 - 9.9 mm (ceniza fina - lapilli).
- Redondez: muy angular y angular. Ocasionalmente subangular a subredondeada.
- Forma: predominantemente elongada, localmente subequidimensional.
- Forma de cristales libres sin evidencia de fragmentación: subhedral a anhedral.

1.3. Contactos entre fragmentos y selección

- Contactos: predominantemente puntuales; por sectores clastos flotantes en matriz.
- Selección: moderada.

2. Composición

2.1. Piroclastos (fragmentos de origen volcánico primario)

- Vidrio volcánico / material pumítico (17.1%): fragmentos frescos de pumitas y detritos frescos, no porosos, de vidrio volcánico (con microcristales frescos de plagioclasa y hornblenda).
- Cristales y fragmentos de cristales (32.3%): cristales completos e incompletos frescos, de: plagioclasa (zonada y maclada), hornblenda, biotita, partículas opacas (tipo ilmenita y magnetita) y una variedad de clinopiroxeno.
- Fragmentos de roca cognados y accidentales (13.1%). Corresponden a líticos de origen volcánico tales como: diorita o microdiorita (con alteración hidrotermal), dacita, andesita (o basalto con textura traquítica y/o microporfirítica), rocas volcánicas lávicas de afinidad

andesítica (con textura traquítica y microporfirítica) y rocas volcanoclásticas alteradas tipo toba soldada.
2.2. Material intersticial (vidrio fresco a parcialmente alterado; matriz arcillosa)
El material intersticial de la roca (37.5%) se distribuye de manera irregular: aun cuando en general ocupa la mayor parte del espacio intergranular, en algunos sectores es escaso o está prácticamente ausente, lo que condiciona una porosidad variable, con lugares más abiertos y otros parcialmente obturados. Está constituido esencialmente por partículas de vidrio volcánico frescas a incipientemente devitrificadas, entremezcladas con minerales de arcilla. Las partículas de vidrio parecen encontrarse parcialmente hidratadas.
3. Clasificación
3.1. Textural (proporción de piroclastos) (Fisher, 1961; Schmid, 1981)
Toba de ceniza y lapilli, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
3.2. Composicional (tipo de fragmentos piroclásticos) (Schmid,1981)
Toba cristalina-lítica, con evidencias de retrabajamiento sedimentario.
4. Porosidad e interconexión de los poros
❖ Tipos de poros (15.7%): (1) intergranular secundario por hidratación y posterior disolución de vidrio primario, (2) intragranular primario en fragmentos de pumita, (3) intercristalino por fragmentación de cristales, (4) circumgranular por contraste mecánico entre clastos y matriz (apertura por reacomodo) con posterior alteración del material intersticial y (5) amorfos por caída o desprendimiento de fragmentos, influenciados por friabilidad. ❖ Conectividad: mayormente tortuosa, por sectores buena.
5. Alteración e implicaciones para la conservación.
La alteración se relaciona fundamentalmente con la hidratación del vidrio volcánico y la formación de minerales de arcilla, lo que tiene impacto directo en la porosidad secundaria, friabilidad y comportamiento higroscópico de la roca. Estas características favorecen la retención de humedad, la circulación de soluciones y la disgregación superficial.

Resumen

Clasificación textural: toba de ceniza y lapilli (Fisher, 1961; Schmid, 1981). **Clasificación composicional**: toba cristalina-lítica (Schmid,1981). La roca está constituida esencialmente por fragmentos volcánicos diversos, dispuestos en un material intersticial formado por partículas frescas a parcialmente alteradas de vidrio volcánico, entremezcladas con minerales de arcilla. Dentro de la población fragmentaria se reconocen: (1) clastos de pumita y fragmentos de vidrio volcánico; (2) cristales completos e incompletos de plagioclasa, hornblenda, biotita, minerales opacos (ilmenita–magnetita) y una variedad de clinopiroxeno; y (3) fragmentos líticos volcánicos variados, tanto cognados como accidentales. La porosidad presenta una conectividad mayormente tortuosa y es predominantemente de carácter secundario, asociada a procesos de alteración (hidratación, disolución y transformación a minerales de arcilla).

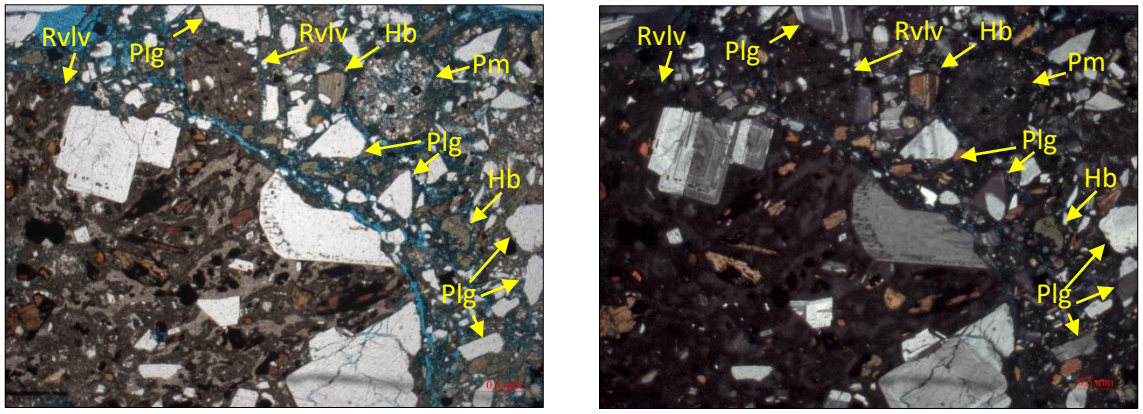


Figura 50. Ejemplos de fragmentos de origen volcánico: (1) plagioclasa (Plg), (2) hornblenda (Hb), (3) pumita (Pm) y (4) roca volcánica lávica (Rvlv). Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 5.2 mm.

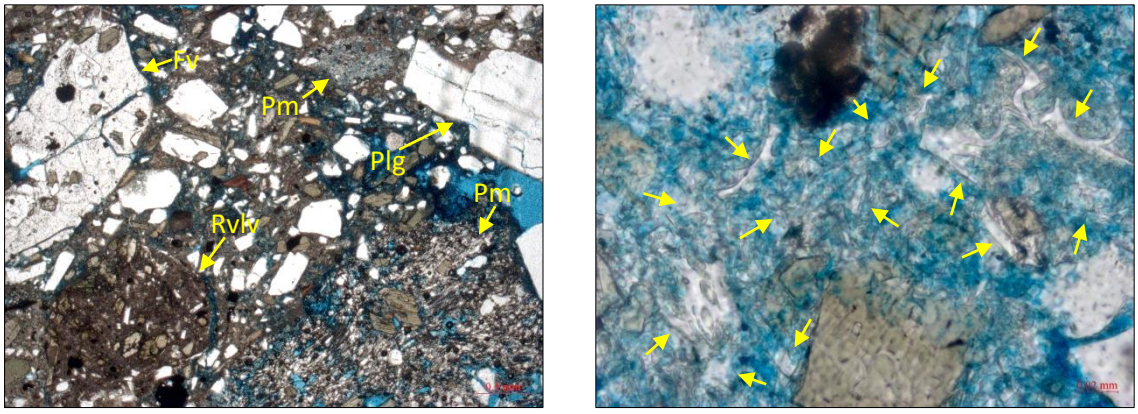


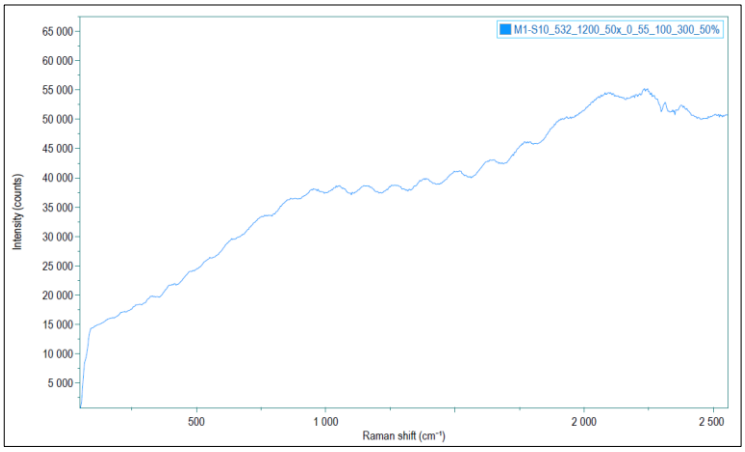
Figura 51. Foto izquierda. Ejemplos de fragmentos: (1) plagioclasa (Plg), (2) vidrio volcánico (Fv), (3) pumita (Pm) y (4) roca volcánica lávica (Rvlv). Foto derecha: detalle de matriz. Note partículas de vidrio volcánico (señaladas por flechas amarillas) y porosidad interpartícula. Nicoles paralelos. Longitud de la fotografía izquierda: 5.2 mm. Longitud de la fotografía derecha: 0.32 mm.

Anexo 2. Espectroscopía Raman

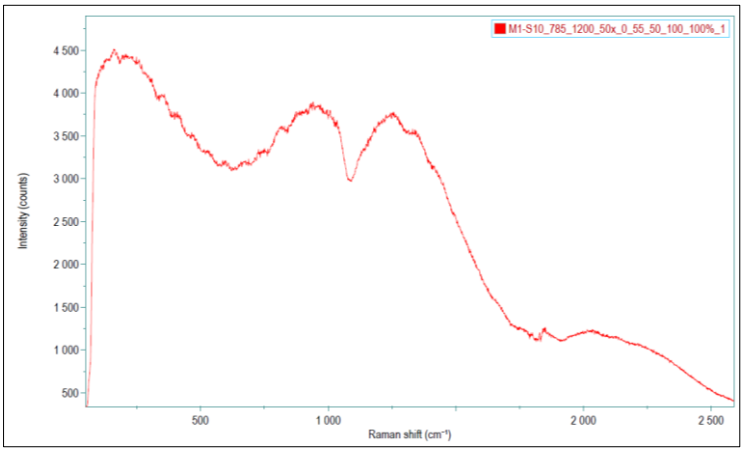
Muestra 1	M1-S10

Capa blanca de enlucido







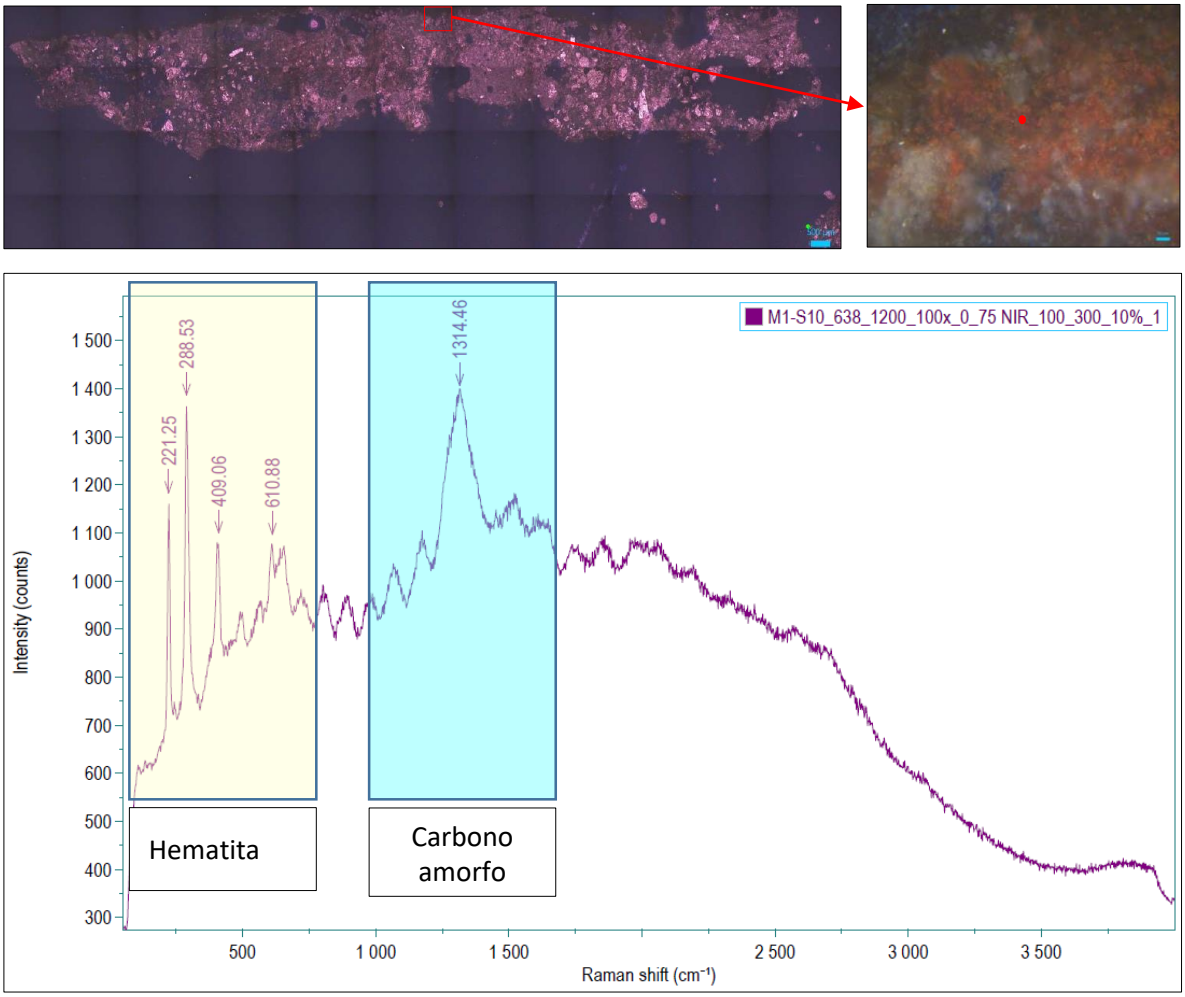


Respuesta:

Alta fluorescencia indica material finamente particulado, con alta exposición superficial, mal cristalizado, con muchos defectos o rico en impurezas / Posibilidades: Arcillas, presencia de agua, matrices complejas formadas por mezcla de fases finas.

Muestra 1	M1-S10

Capa de pigmento: color rojo - material negro

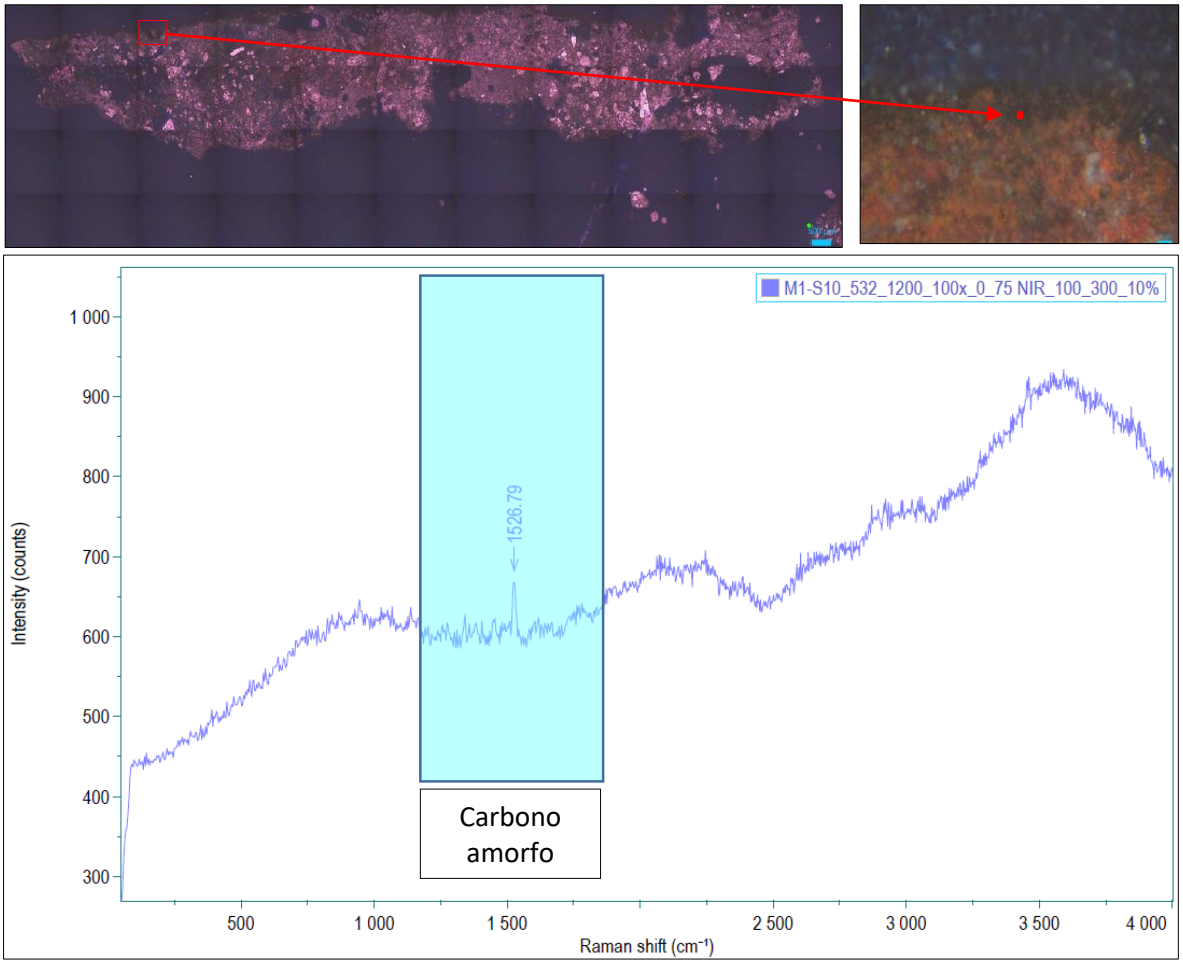


Respuesta:

- Hay fluorescencia fuerte, pero con picos definidos.
- En la zona comprendida entre 200 y 700 cm^{-1}, los picos ubicados alrededor de 221, 288, 409 y 610, son característicos del mineral hematita.
- La zona comprendida entre 1300 y 1350 corresponde típicamente a la banda del carbono desordenado. El pico de 1314.46 cm^{-1}, sugiere la presencia de: carbono amorfo o material carbonoso degradado.
- La alta fluorescencia se atribuye a la presencia de materia orgánica / No se descarta arcillosidad.

Muestra 1	M1-S10

Capa de pigmento: material negro

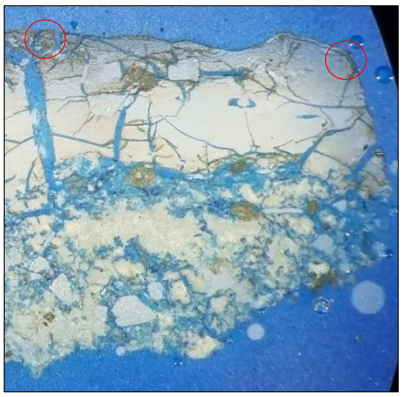


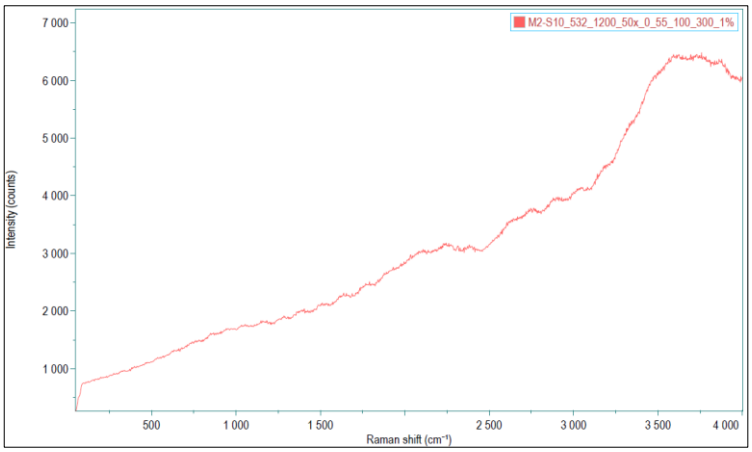
Respuesta:

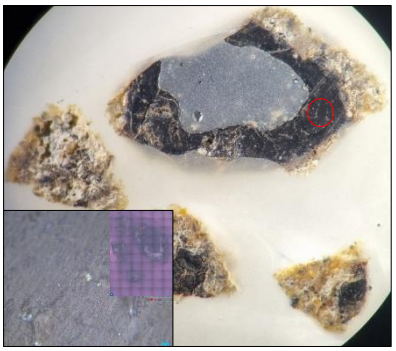
- Hay fluorescencia muy fuerte, con un pico definido en 1526.79 cm^{-1} .
- Por encontrarse en la zona comprendida en la banda D3 entre 1450-1550 cm^{-1}, así como la ausencia de una banda G cerca de 1580-1600 cm^{-1} apunta a la presencia de: materia orgánica natural poco ordenada tipo: sustancias húmicas o ácidos húmicos o fúlvicos o carbón parcialmente amorfo o muy poco ordenado.
- La alta fluorescencia se atribuye a la presencia de materia orgánica. No se descarta arcillosidad.

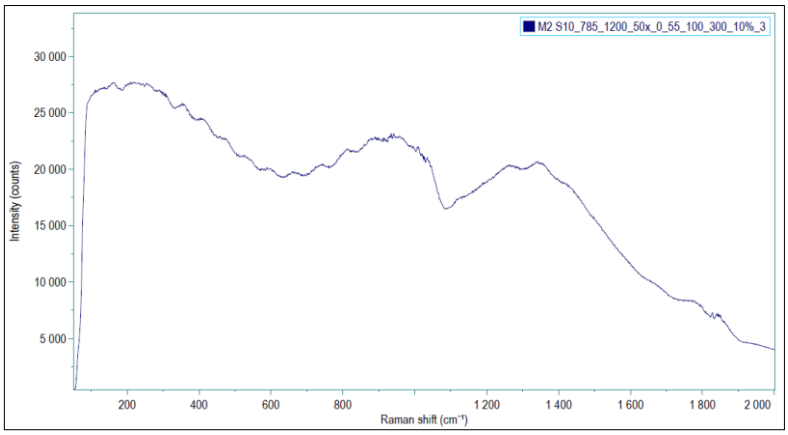
Muestra 2	M2-S10

Capa negra homogénea, al tacto es blanda







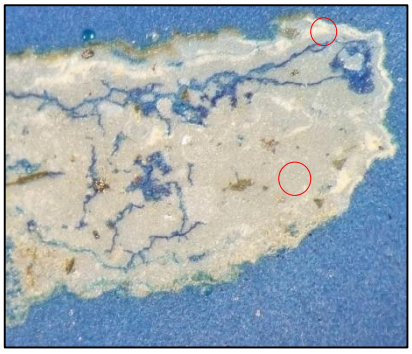


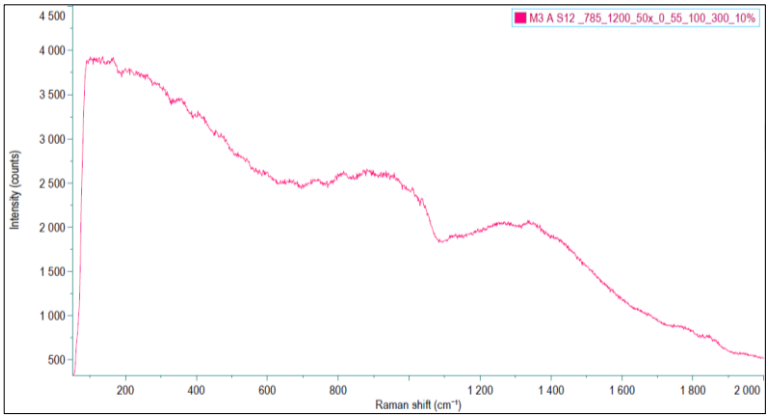
Respuesta:

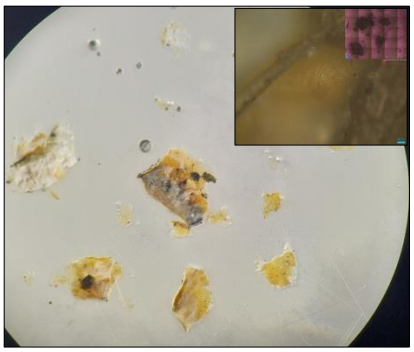
Alta fluorescencia indica material finamente particulado, con alta exposición superficial, mal cristalizado, con muchos defectos o rico en impurezas / Posibilidades: Arcillas, materia orgánica, presencia de agua, matrices complejas formadas por mezcla de fases finas, materiales alterados.

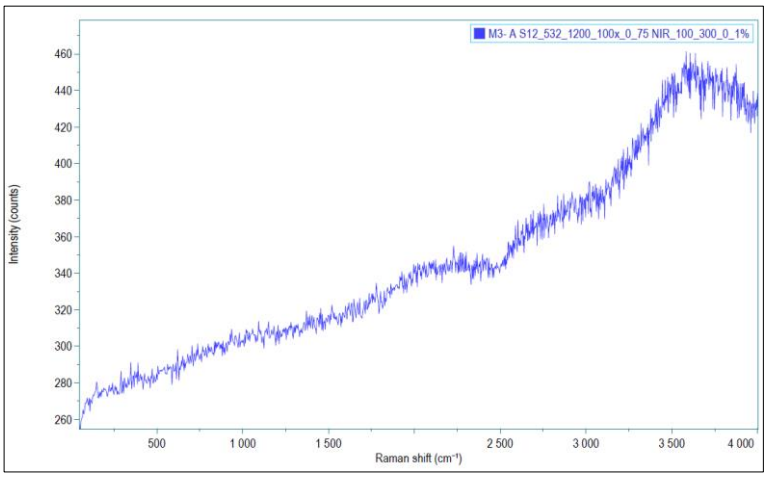
Muestra 3	M3A-S12

Capa blanca: posible mortero







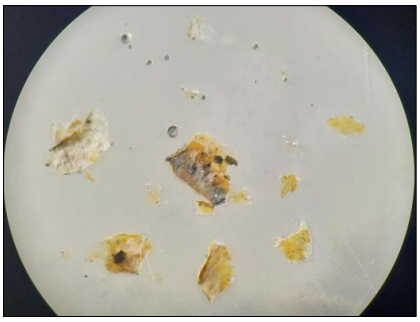


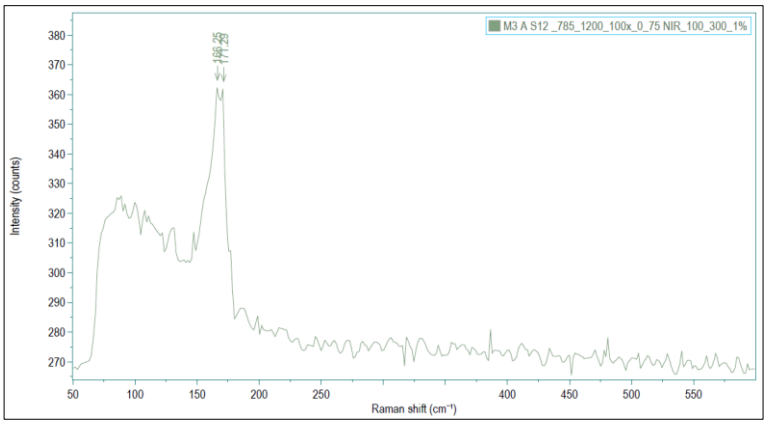
Respuesta:

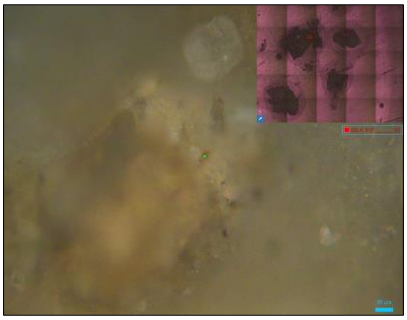
Alta fluorescencia indica material finamente particulado, con alta exposición superficial, mal cristalizado, con muchos defectos o rico en impurezas / Posibilidades: Arcillas, presencia de agua, matrices complejas formadas por mezcla de fases finas, materiales alterados.

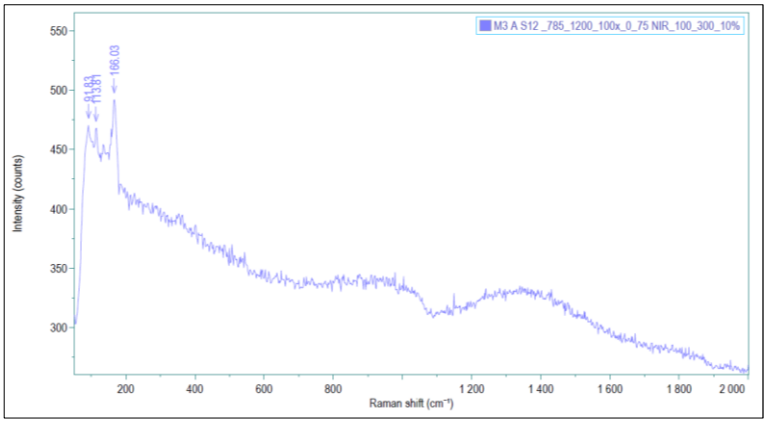
Muestra 3	M3A-S12

Capa café rojizo-amarillento: posible pigmento







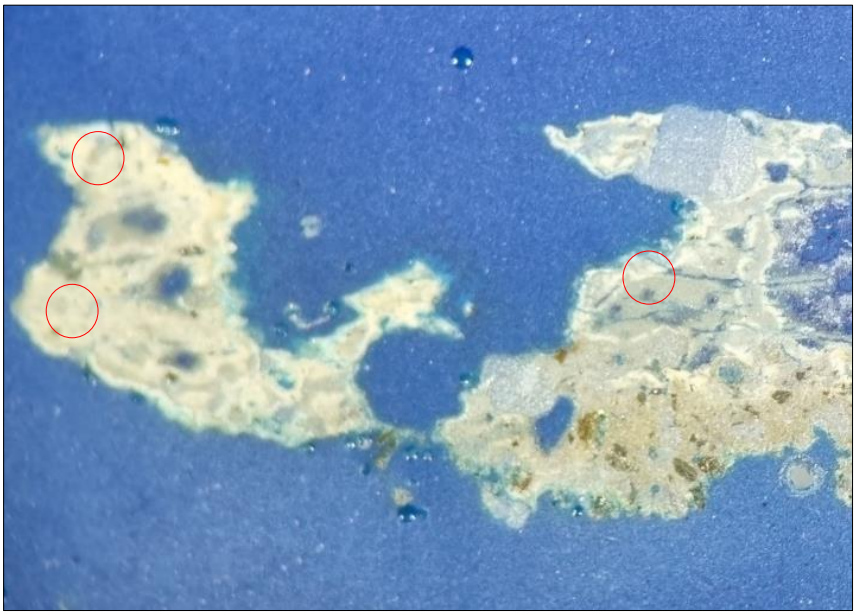


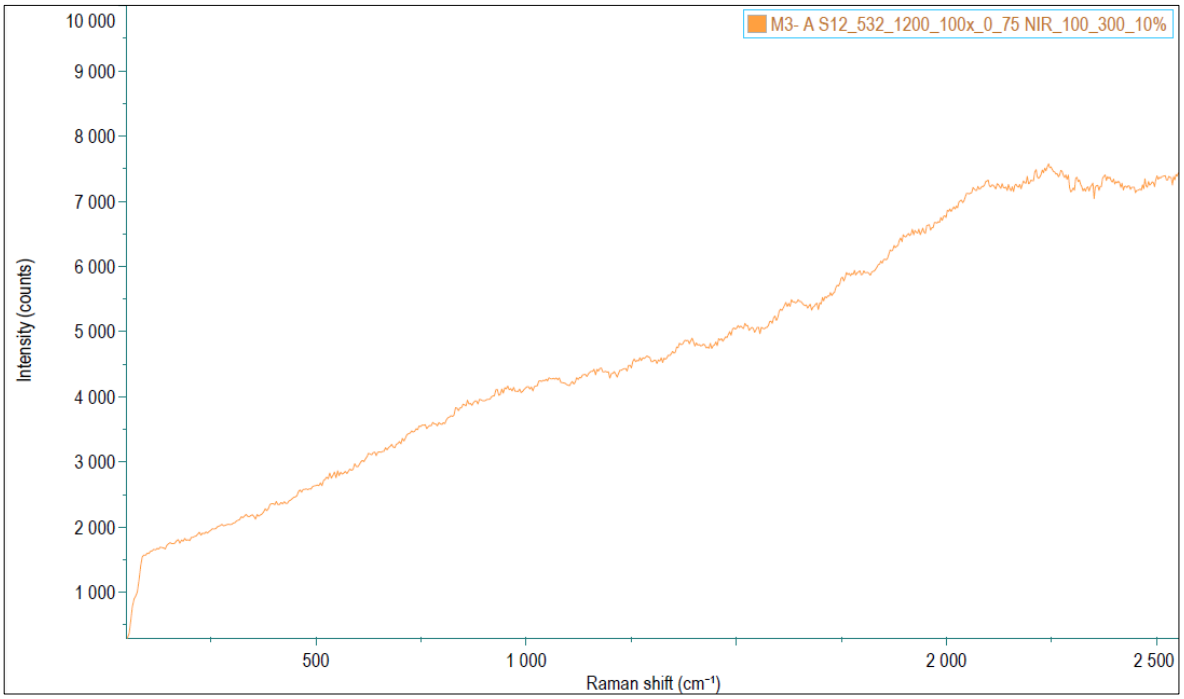
Respuesta:

- Pico fuerte y agudo en 166–171.29 cm^{-1}.
- Pico fuerte y agudo en 166–167 cm^{-1} / picos menores en 91.83 y 113.81 cm^{-1}.
- Las bandas menores a 200 cm^{-1}, corresponden a modos vibracionales que pueden presentarse en una amplia variedad de minerales, tanto cristalinos como pobremente ordenados. Para este caso particular no se considera diagnósticos.
- El punto analizado corresponde a una zona de coloración naranja difusa sin morfología cristalina bien definida.

Muestra 3	M3B-S12

Capa blanca: posible mortero



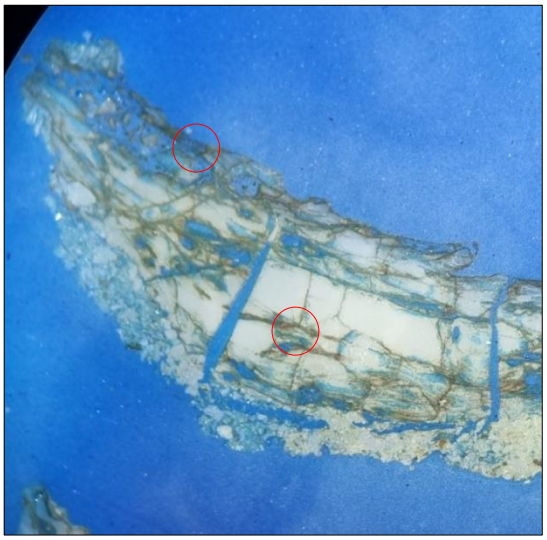


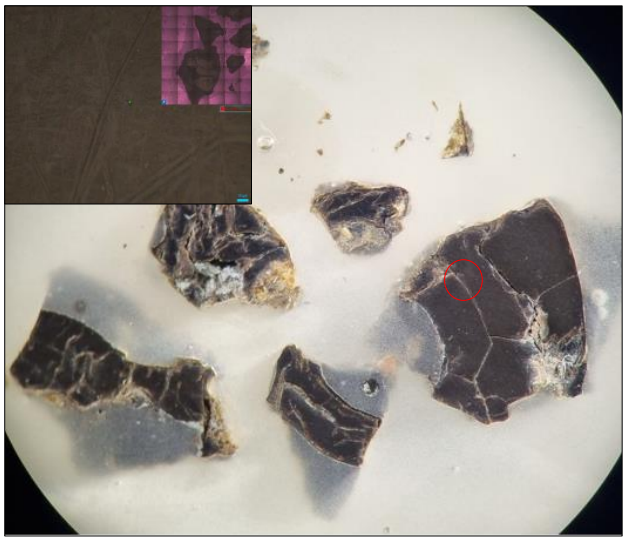
Respuesta:

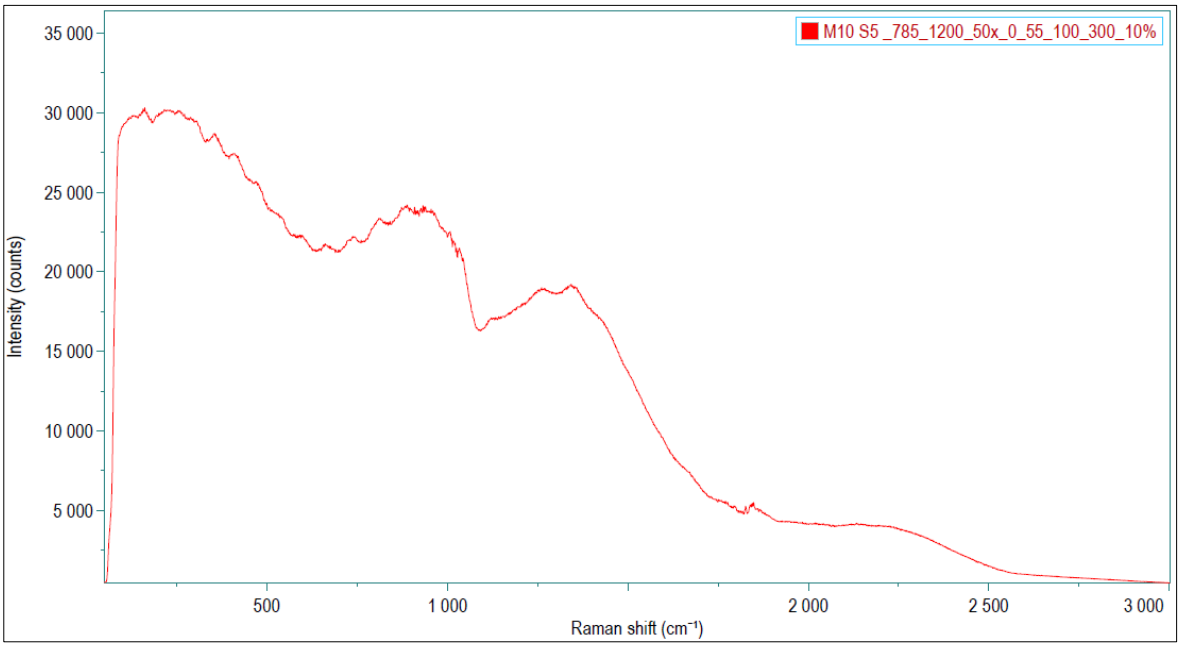
Alta fluorescencia indica material finamente particulado, con alta exposición superficial, mal cristalizado, con muchos defectos o rico en impurezas / Posibilidades: Arcillas, presencia de agua, matrices complejas formadas por mezcla de fases finas.

Muestra 10	M10-S5

Capa blanca: posible mortero



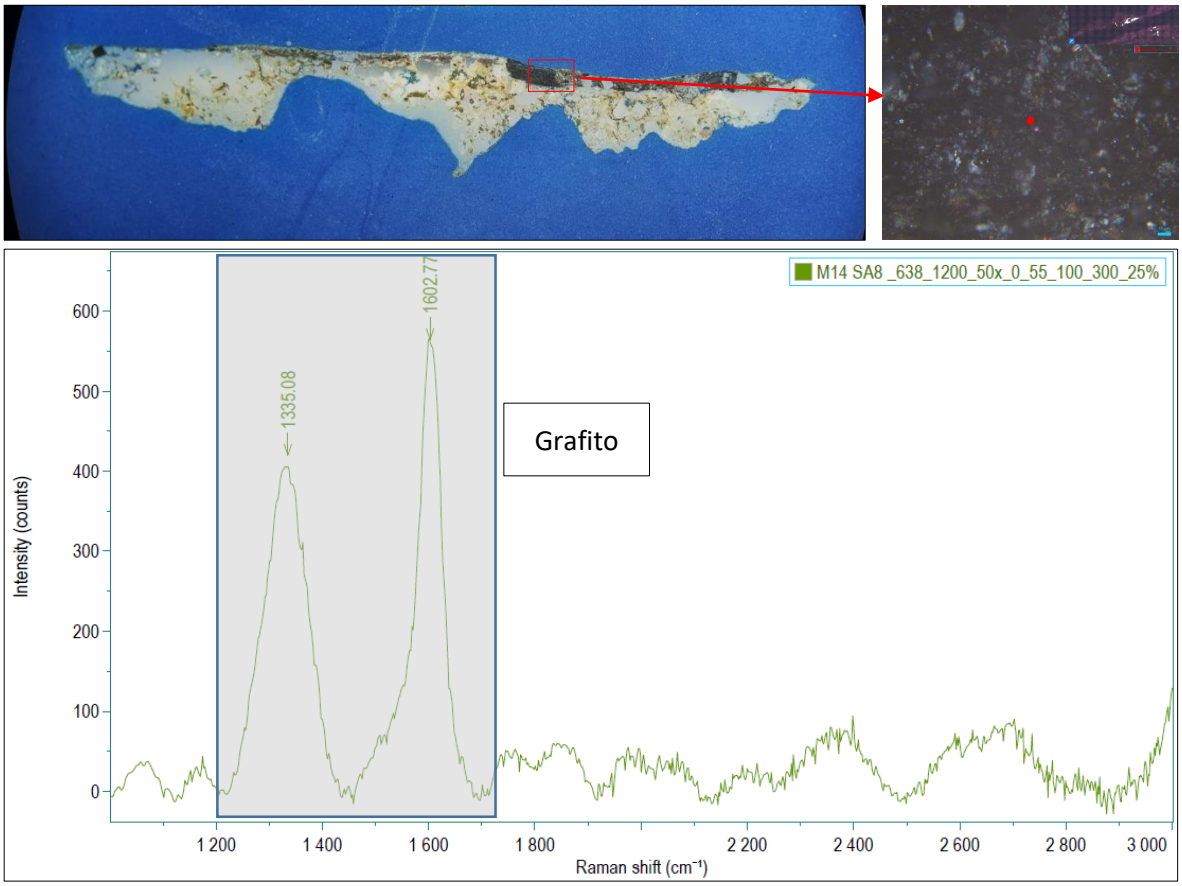




Respuesta:

Alta fluorescencia indica material finamente particulado, con alta exposición superficial, mal cristalizado, con muchos defectos o rico en impurezas / Posibilidades: Arcillas, materia orgánica, presencia de agua, matrices complejas formadas por mezcla de fases finas, materiales alterados.

Muestra 14	M14-SA8
Capa 2: mortero con pigmento	



Respuesta:

- La presencia simultánea de: banda D ≈ 1335–1338 cm^{-1} y banda G ≈ 1600–1605 cm^{-1}, apunta a la presencia de grafito alterado, desordenado, pobremente cristalino o carbono pobremente grafitizado
- En rocas metamórficas tipo pizarra filítica, el carbono suele estar presente como películas o láminas de grafito muy mal cristalizado alineadas con la foliación. Raman de grafito en rocas del estilo suele caer exactamente en ese rango: D ~1348–1358 y G ~1580–1585 cuando está mejor cristalizado; pero cuando está más desordenado o muy fino la G se ensancha y llega hasta aproximadamente 1600–1605.