

DOCUMENTACIÓN, ESTUDIOS E INTERVENCIONES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO DE CONSERVACIÓN CRÍTICO EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO NACIONAL DE TIERRADENTRO.

INFORME FINAL

PROYECTO FIAN 2025-2026

Julio, 2026.

Directora ICANH

Alhena Caicedo

Subdirección de Gestión de Patrimonio:

Fernando Montejo

Director Grupo de Patrimonio:

Carlos Reina

Supervisor del Proyecto FIAN:

Alejandro Amaya

Apoyo Técnico:

Angela Cely, Sofía Sabogal

Lina Rincón, Mariana Pedraza

Apoyo Administrativo:

Laura Valentina Velasquez, Isabel

Escorcia, Ana Marcela Gutiérrez

Parque Arqueológico de Tierradentro:

Administradora Rosalin Cuartas, Angelmiro Pito, Juan Jairo Muelas, Luis Flórez, Javier Gutiérrez, Jesús Velasco y demás trabajadores y contratistas del Parque

Equipo Proyecto FIAN 2025- 2026

Coordinación de la investigación:

María Paula Álvarez

Equipo Científico:

Jorge Barón, Luis Antonio Guarnizo

Documentación 3D:

Pedro Cadena

Equipo Estructural:

Germán Hermida, Lina Méndez,

Camilo Betancur, Ana María Jaimes,

Zaira Zuluaga, Juan Alejandro Dávila

Equipo disgregación:

Fernando Gómez, Dafne Martínez, Luis

Enrique Vergara

Equipo Estabilización:

Laura del Pino, Yolanda Pachón,

Juanita Enciso, Pablo Vargas, Camila

Mayorga, Carla Rodríguez, Sara

Merchán, María Camila Ramírez

Asesoría en Pintura mural:

Clemencia Vernaza

Asistente de campo:

Giancarlo Narváez

CONTENIDO

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	ANTECEDENTES DE ESTUDIO	10
3.	METODOLOGÍA:	12
3.1	DOCUMENTACIÓN DE HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO TIERRADENTRO	12
3.2	INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA LA INTERVENCIÓN	16
3.3	INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTABILIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO.	17
3.4	MONITOREO BIOLÓGICO Y DE LAS INTERVENCIONES	18
3.5	EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBA VOLCÁNICA FRENTE A LA HUMEDAD EN LOS HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN	19
3.6	MONITOREO AMBIENTAL	19
3.7	SOCIALIZACIÓN Y DIVULGACIÓN DE RESULTADOS DEL PROYECTO	20
3.8	AJUSTES METODOLÓGICOS DURANTE LA EJECUCIÓN	20
4.	DOCUMENTACIÓN DE LOS HIPOGEOS	22
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS HIPOGEOS Y SUS SISTEMAS DE PROTECCIÓN	22
4.2	SOBRE LA TÉCNICA DE ELABORACIÓN DE LOS HIPOGEOS EN ESTUDIO	27
4.3	SOBRE LAS INTERVENCIONES ANTERIORES	28
4.4	SOBRE LOS ESTADOS DE CONSERVACIÓN Y EL DIAGNÓSTICO DE LOS HIPOGEOS EN ESTUDIO	31
5.	ESTUDIO GEOLÓGICO	38
5.1	INTRODUCCIÓN	38
5.2	METODOLOGÍA	40
5.3	RESULTADOS	42
5.4	CONCLUSIONES	52
6.	ANÁLISIS DE SALES	55
6.1	INTRODUCCIÓN	55
6.2	METODOLOGÍA	55
6.3	RESULTADOS	56
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
7.	ESTUDIO ESTRUCTURAL	62
7.3	EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA.	64
7.4	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO	66
7.5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS HIPOGEOS Y DIAGNÓSTICO	67
7.6	CONCLUSIONES	71
8.	IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE AGENTES BIOLÓGICOS	73

8.1 INTRODUCCIÓN.....	73
8.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
8.4 CONCLUSIONES.....	106
8.5 RECOMENDACIONES.....	107
8.6 PERSPECTIVAS FUTURAS	108
9. INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA LA INTERVENCIÓN DE LOS HIPOGEOS	109
9.1 MORTEROS DE INYECCIÓN	109
9.2 MORTEROS DE RESANES	117
9.3 MORTERO ESTRUCTURAL.....	128
9.4 ADHESIVOS.....	132
9.5 CONSOLIDANTES.....	133
10. PRINCIPIOS Y CRITERIOS PARA LA DOCUMENTACIÓN, CONSERVACIÓN E INTERVENCIÓN DE LOS HIPOGEOS	139
11. INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTABILIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO.	149
12. MONITOREO BIOLÓGICO Y DE LAS INTERVENCIONES.....	159
12.1 ANTECEDENTES.....	159
12.2 CAUSAS ATRIBUIBLES AL CRECIMIENTO FÚNGICO EN MARZO DE 2026	161
12.3 IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN ZONAS DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO DESMEDIDO	163
12.4 APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE PRUEBAS DE BIOCIDAS	165
12.5 EVALUACIÓN Y MONITOREO REALIZADO EN JUNIO DE 2026	167
12.6 PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES	173
13. EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBA VOLCÁNICA FRENTE A LA HUMEDAD EN LOS HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN.....	177
13.1 INTRODUCCIÓN.....	177
13.2 METODOLOGÍA	177
13.3 RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN DE LA ROCA, CONTENIDO DE HUMEDAD, CONDICIONES AMBIENTALES, DISGREGACIÓN Y DESCAMACIÓN	179
13.4 RESULTADOS GENERALES Y CONCLUSIONES.....	183
13.5 REALIZACIÓN DE PILOTOS PARA ELIMINACIÓN DE GEOTEXTIL EN HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN	186
14. MONITOREO AMBIENTAL	188
14.1 INTRODUCCIÓN.....	188
14.2 METODOLOGÍA	188
14.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	193
14.4 CONCLUSIONES	208
14.5 RECOMENDACIONES	209

15. SOCIALIZACIÓN DEL PROYECTO	211
15.1 INTRODUCCIÓN.....	211
15.2 ESPACIOS DE SOCIALIZACIÓN	211
15.3 ESPACIOS DE DIVULGACIÓN.....	213
16. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	225
BIBLIOGRAFÍA	230
ANEXOS.....	241
1. PROTOCOLO DE NOMENCLATURA DE FOTOS Y GRÁFICOS.	241
2. PROTOCOLO PARA EL LEVANTAMIENTO GRÁFICO Y CUANTIFICABLE DE ESTADOS DE CONSERVACIÓN MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA METIGOMAP.....	241
3. ANALISIS GEOLÓGICOS (PETROGRAFIA Y ESPECTROSCOPÍA RAMAN)	241
4. FICHAS TÉCNICAS DE PRODUCTOS USADOS EN PRUEBAS E INTERVENCIÓN	241
5. PROTOCOLO DE SEGUIMIENTO AL CONTROL BIOLÓGICO	241
6. CARACTERIZACIÓN DE HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN	241
7. ANALISIS MEDIOAMBIENTAL (DIC 2024 – MAR 2026) DEL HIPOGEO S12	241
8. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S5.....	241
9. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S9.....	241
10. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S10	241
11. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S11	241
12. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S12	241
13. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S21	241
14. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO D4.....	241
15. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A13	241
16. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A14.....	241
17. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A36	241
18. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A41	241
19. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO SA1	241
20. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO SA8	241

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye el Informe Técnico final del proyecto titulado "*Documentación, estudios e intervenciones de los hipogeos en estado de conservación crítico en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro*", ejecutado por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) con el apoyo financiero de la Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales (FIAN). Sintetiza las investigaciones desarrolladas por un equipo de trabajo conformado por conservadores restauradores, ingenieros, arquitecta, geólogo y biólogo coordinado por la restauradora María Paula Alvarez, investigadora principal y quien presentó con el apoyo del ICANH la propuesta que la FIAN aprobó en 2025 y que fue legalizada mediante un contrato de donación.

El Parque Arqueológico de Tierradentro (PAT) se encuentra ubicado al sur de los Andes Colombianos, en la vertiente oriental de la cordillera central, comprendido por las tierras altas que confluyen en el Nevado del Huila y el volcán Puracé, en una región enmarcada por un entorno montañoso cuyas altitudes oscilan entre 1.600 y 1.900 metros. El PAT se ubica en la zona rural alemana al municipio de Inzá, más exactamente en la parte nororiental, y al sur de la Inspección de San Andrés de Pisimbalá, en el departamento del Cauca.

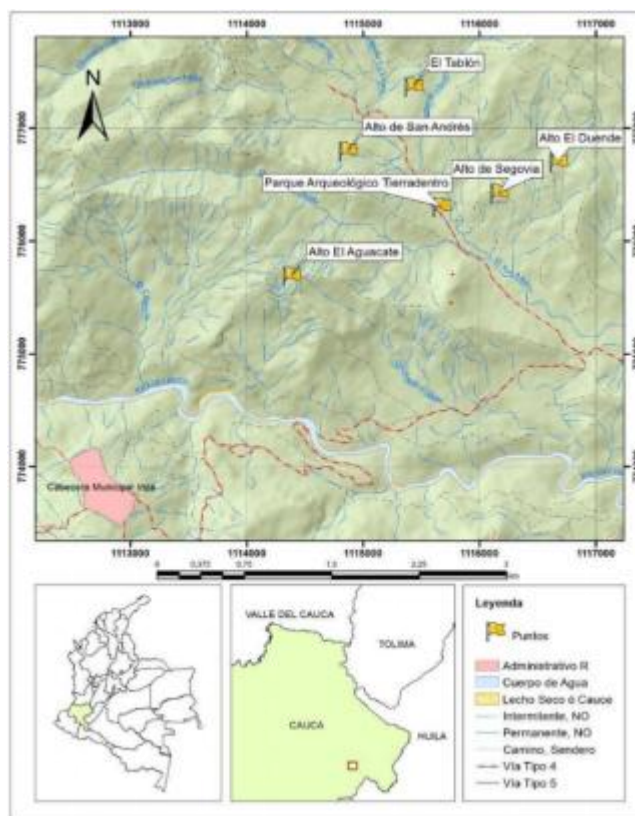


Ilustración 1. Localización del área de estudio. Tomada de Tenjo, Santos & Cramer, 2019

El PAT agrupa los vestigios de una civilización que elaboró en las montañas y altos una serie de estructuras funerarias, las cuales fueron declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en

1995 junto con los vestigios que albergaban y la estatuaria dispersa en la zona. Estas estructuras bajo el nivel del suelo denominadas hipogeos se concentran en diversos altos: Segovia, San Andrés, El Aguacate y El Duende (Figura 1 y 2).

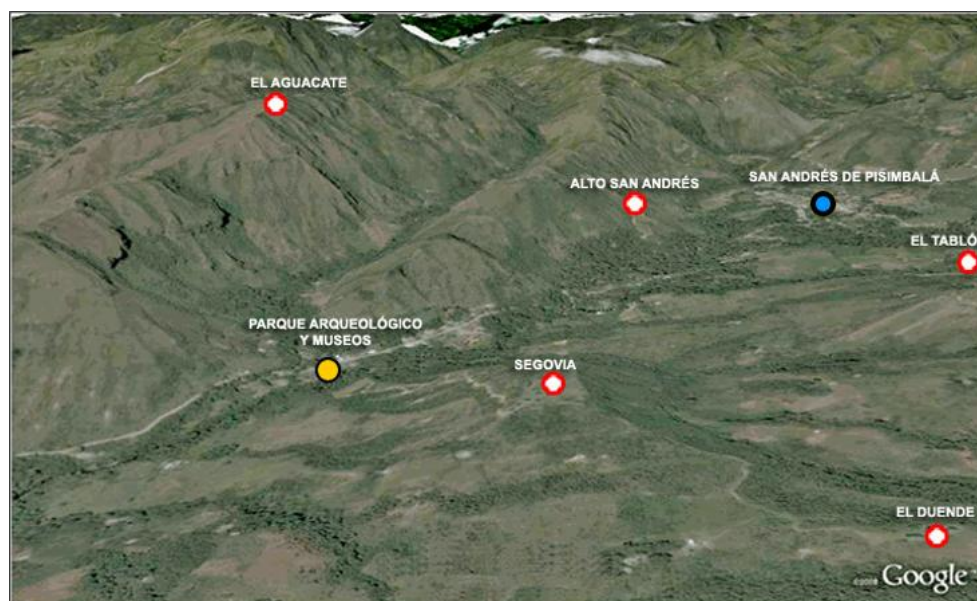


Ilustración 2. Vista panorámica de las zonas aledañas a la Inspección de San Andrés de Pisimbalá, en la que se pueden apreciar los altos del Aguacate, San Andrés, Segovia y El Duende. Fuente: Tierradentro 3D (2018).

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 (Ilustración 2), 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 casco urbano del municipio de Inzá 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.

El Alto San Andrés se localiza en las coordenadas (N2.577, W 76.044), de acuerdo con el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS 84 (World Geodetic System 1984), a una altura de 1750 m.s.n.m. Los hipogeos del Alto San Andrés se caracterizan por la pintura mural de motivos geométricos rojo y negro sobre blanco y columnas centrales. Se han reportado veintitrés (23) hipogeos, de los cuales seis (6) de ellos abiertos, dos (2) cerrados y uno (1) colapsado.

El Alto de Segovia se localiza en las coordenadas (N2.574, W 76.033), de acuerdo con el sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS 84 (World Geodetic System 1984), a una altura de 1650 m.s.n.m. Los hipogeos del Alto de Segovia se caracterizan por ser los más profundos y van desde pequeños hasta complejos, con variedad en diseño y color en la pintura mural. Actualmente, se cuenta con sesenta y cuatro (64) hipogeos localizados, de los cuales veinticinco (25) se encuentran abiertos.

El Alto del Aguacate se encuentra en el filo de la montaña a una altitud de 2100 m.s.n.m hacia la zona suroeste del parque arqueológico. Dentro de este alto se presentan alrededor de 62 hipogeos ubicados a lo largo de la cresta montañosa, cubriendo alrededor de 250m de longitud de los cuales

solo 29 hipogeos se encuentran abiertos o semiabiertos. Se trata de estructuras medianas o pequeñas de cámara oval con tallas sencillas o decoración mural de motivos variados, alusivos en muchos casos a figuras naturalistas de animales o cuerpos celestes.

El Alto del Duende se encuentra a 480 metros del Alto de Segovia. Allí se encuentran 4 hipogeos abiertos (D1 a D4), todos ellos con decoración, 1 tumba de pozo de la cual no quedan rastros y 8 posibles hipogeos que no han sido excavados. Los hipogeos del Alto del Duende se caracterizan por ser profundos, y tener variedad en formas y complejidad y algunos de ellos presentar pintura mural con motivos de líneas y rombos de colores negro y rojo sobre enlucido blanco.

Como fue antes referido, el Parque Arqueológico de Tierradentro, alberga una manifestación arquitectónica y artística única: los hipogeos. Estas estructuras funerarias subterráneas, ricas en relieves y pintura mural, enfrentan retos de conservación significativos debido a factores ambientales, biológicos y estructurales que comprometen su integridad material. Tras el diagnóstico interdisciplinario realizado en el Plan Estratégico de Conservación de 2024, se identificó la necesidad urgente de intervenir estructuras en estado crítico, priorizando aquellas con pérdida de volúmenes, daños estructurales y disgregación de roca, es decir deterioros activos relacionados con la pérdida de información.

Este informe detalla los resultados alcanzados durante los 12 meses de ejecución (septiembre 2025 – agosto 2026) del proyecto, frente a seis líneas de acción, que se describen brevemente a continuación, cuatro de ellas referidas en la propuesta inicialmente presentada a la FIAN y dos adicionales desarrolladas en respuesta a las necesidades evidenciadas durante la ejecución del proyecto:

- **DOCUMENTACIÓN DE 10 HIPOGEOS CON DESPRENDIMIENTOS Y RAÍCES EN DIACLASAS EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO TIERRADENTRO:** Documentación fotogramétrica, de técnica de elaboración y estado de conservación en los hipogeos que de manera más crítica presentan faltantes, desprendimientos, grietas y raíces.
- **INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA LA INTERVENCIÓN.** Ajuste y validación de morteros de inyección, estructural y de resane, garantizando su compatibilidad técnica y estética con la toba volcánica y la pintura mural. Selección de productos adhesivos y consolidantes y realización de pruebas con estos productos en los hipogeos.
- **INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTABILIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO.** Definición de criterios de intervención, formulación de propuestas de intervención orientadas a la estabilización de la roca y la pintura mural, la intervención estructural y el control biológico y finalmente implementación y documentación de dichas propuestas.
- **EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA ROCA TOBA VOLCÁNICA FRENTE A LA HUMEDAD EN LOS HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN.** Estudio en laboratorio de la disgregación, así como in situ que implica la toma de información sobre características físicas de la roca, entre las cuales la evaluación del comportamiento de la roca frente a la humedad y el seguimiento de las condiciones ambientales en los hipogeos con disgregación.

- **MONITOREO BIOLÓGICO Y DE LAS INTERVENCIONES.** Seguimiento al crecimiento fúngico observado en los hipogeos intervenidos y estudio de los métodos para su control y seguimiento a las intervenciones realizadas con el fin de asegurar su sostenibilidad.
- **MONITOREO AMBIENTAL.** Seguimiento a las condiciones de humedad relativa y temperatura encontradas al interior de algunos hipogeos del Alto de Segovia y relación entre estas condiciones y la conservación de los hipogeos.

2. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

El área arqueológica de Tierradentro corresponde al territorio comprendido entre dos municipios caucanos, Inzá y Páez. Fue nombrado así por españoles que tuvieron que transitar la ruta que va de Santafé a Popayán pasando por Neiva (Sevilla 2009:370). Desde el siglo XVIII se encuentran referencias a sitios arqueológicos en la región, pero es en el siglo XX cuando realmente empezó a ser estudiada desde un punto explícitamente arqueológico y, a partir de los años 80s que el proyecto de investigación sistemática de los hipogeos desarrollado por los arqueólogos Álvaro Chaves y Mauricio Puerta (Chaves & Puerta, 1980, 1985, 1986, 1990b, 1990a) despierta la atención sobre su conservación.

El proyecto denominado *Documentación, estudios e intervenciones de los hipogeos en estado de conservación crítico en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro* aprobado para su financiación por parte de la FIAN encuentra sus antecedentes en una serie de documentos, investigaciones y acciones que se han venido desarrollando especialmente en las últimas 3 décadas.

Es de mencionar que los primeros estudios que referencian el estado de los hipogeos fueron generados hacia la década de los ochenta por el Centro Nacional de Restauración cuando éste se encargaba de la preservación del patrimonio cultural nacional. Luego, en torno al año de 1995 y debido a las crecientes del río Páez se registran nuevos deterioros en los hipogeos lo que convoca a varios expertos quienes emiten sus conceptos y aportan recomendaciones para la conservación de los hipogeos (Álvarez et al. 2002, Preciado, 1996). Para 2002 se realiza un ejercicio de documentación bastante sistemático que recoge toda la información existente hasta la fecha de cada hipogeo (Álvarez et al, 2002) y en 2006 se hace por parte de varias conservadoras contratadas por el ICANH el levantamiento de información sobre su conservación (Álvarez et al, 2006).

En cuanto a las intervenciones realizadas y documentadas en los hipogeos y su infraestructura de protección a lo largo de las últimas cinco décadas han estado orientadas a la identificación y resolución de componentes puntuales tales como construcción y mantenimiento de cobertizos, impermeabilización y construcción de drenajes y filtros para el manejo de aguas en todos los Altos (Alvarez et al, 2002), cierre permanente de hipogeos en el Alto de Segovia y el Alto del Aguacate, solución de problemas estructurales en el hipogeo S8 (Hermida y Hermida, 2000 y 2001) y en el hipogeo SA1 mediante su apuntalamiento (Rivero, 2012), iluminación en los hipogeos del Alto de Segovia (Rivero, 2012), control de la biocolonización mediante el saneamiento ambiental (Guerreo, 1990, Álvarez, 2002, Villalba, 2012, 2015 y 2016) y la limpieza y estabilización puntual de las superficies de algunos hipogeos por parte de conservadoras que desarrollaron por varios años un acompañamiento más cercano a los temas de conservación directa y preventiva de las colecciones e hipogeos de Tierradentro. (Estela, 2012; Zuluaga, 2013-2016, López, 2018).

En los años 2018 y 2019, el ICANH junto con el Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (INAH), la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete" México (ENCRYM) y la Facultad de Estudios de Patrimonio Cultural de la Universidad Externado de Colombia, realizan avances en la formulación de una metodología de trabajo que

permitiría proponer una línea integral de conservación de los hipogeos de Tierradentro, iniciando por su documentación. En estos años se logra también una comprensión más clara de las características geotécnicas de los hipogeos y cómo éstas inciden en su valoración estructural (Tenjo et al, 2019) y se desarrolla y prueba in situ un mortero de inyección para la estabilización de las superficies decoradas (Vernaza, 2019). Estos tres estudios sumados a los insumos que aporta luego el Plan Estratégico de Conservación para Tierradentro (Álvarez et al, 2024) serán de gran importancia en el desarrollo del presente proyecto.

El Plan de conservación antes referido retomó toda la información de conservación existente hasta la fecha, evaluó las condiciones actuales del sitio y sus hipogeos con el apoyo de un equipo interdisciplinario de restauradores e ingenieros, y planteó varios proyectos orientados a atender las problemáticas identificadas especialmente con relación a la documentación y conservación integral de los hipogeos. Uno de los mayores aportes del Plan de Conservación fue el establecer que, de los deterioros encontrados en los hipogeos y que ponen más en riesgo la conservación de su materialidad son aquellos que involucran pérdida de volúmenes y daño estructural. Estos, de hecho, tienen el potencial de afectar el criterio de integridad consagrado dentro de la declaratoria del Parque como Patrimonio de la Humanidad por lo que requieren de su especial atención.

Dentro de los hipogeos que presentan pérdida de volúmenes y daño estructural, hay tres grandes grupos identificados: (1) hipogeos que presentan faltantes, desprendimientos, grietas y raíces; (2) hipogeos con problemas estructurales; y (3) hipogeos donde la roca presenta disgregación. Considerando estas tres categorías de hipogeos se estableció cuáles de ellos eran los que presentaban condiciones más críticas, resultando en un listado de estructuras priorizadas para su estudio e intervención. En virtud de la situación encontrada, el ICANH presentó a la FIAN la propuesta para documentar, estudiar y desarrollar procesos de conservación buscando atender las tres categorías de hipogeos antes referidas y priorizando los hipogeos más afectados.

3. METODOLOGÍA:

Una vez recibida la donación por parte de la FIAN y contratado el equipo de trabajo, se realizó una visita al Parque que permitió verificar la pertinencia de abordar en este estudio los hipogeos referidos en el proyecto inicialmente presentado. Lo anterior llevó a establecer que los hipogeos que presentaban más faltantes, desprendimientos, grietas y raíces eran los hipogeos SA1, S5, S21, S10, S11 y S12, y que aquellos que presentaban mayores problemas de disgregación eran el SA8, A36 y A41. Además, la inspección permitió establecer que los hipogeos S9, D4, A13 y A14 no presentaban tantos problemas de conservación como se había considerado al presentar el proyecto a la FIAN, por lo cual en estos hipogeos solo se adelantaron labores de documentación con un menor nivel de profundidad que el aplicado a los demás hipogeos.

De la misma manera, se evidenció que los hipogeos S20, SA4 y SA5 se encuentran bastante estables, por lo cual no fueron considerados en este estudio. Finalmente, se evidenció que el hipogeo S18 presentaba una importante presencia de biocolonización, que incluía raíces, algas y hongos. Aunque no fue documentado mediante el protocolo aplicado al resto de los hipogeos, fue tratado para asegurar su control biológico.

La ejecución del proyecto se desarrolló mediante un enfoque metodológico que buscó articular la información previa disponible, con la recolección de información in situ y en laboratorio, su análisis e interpretación a partir de la aplicación de técnicas y tecnologías contemporáneas disponibles y la implementación de procesos de intervención orientados por los resultados de los ensayos realizados en laboratorio e in situ.

Como fue referido en la introducción, para asegurar la documentación, estudio e intervención de los hipogeos identificados como en estado crítico, el proyecto se desarrolló considerando 4 líneas de acción cuya metodología se detalla a continuación:

3.1 DOCUMENTACIÓN DE HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO TIERRADENTRO

Para realizar la documentación de los hipogeos en estudio, se desarrolló un sistema que permitió que para cada uno de los hipogeos en estudio se abordara su caracterización y el de su sistema de protección, la descripción de la técnica de elaboración y las intervenciones anteriores, la evaluación del estado de conservación, el planteamiento de la propuesta de conservación, el reporte de intervención y recomendaciones de conservación, mantenimiento y monitoreo. Dicha información fue consignada en documentos denominados Expedientes de documentación, que en este estudio se presentan como anexos. El estudio adelantado en el marco del convenio desarrollado entre la Universidad Externado de Colombia y el ICANH (Bateman, 2019) ya proponía que para documentar los hipogeos se realizara su levantamiento fotogramétrico, y que para describir la técnica de elaboración y el estado de conservación se utilizaran glosarios ilustrados. Además, que el levantamiento gráfico del estado de conservación se realizara sobre fotografías orto normadas de las

superficies murales. A continuación, se describe con mayor detalle algunos de los aspectos metodológicos del sistema de documentación.

Caracterización de los hipogeos y su infraestructura de protección

Con el fin de caracterizar los hipogeos en estudio y su infraestructura de protección se retomaron los datos básicos y descripciones propuestas por el anexo X del Plan de Conservación (Álvarez et al, 2024) revisando la información y actualizándose en los casos requeridos. La información se completó con los levantamientos arquitectónicos generados en el marco del Plan antes referido, además de vistas en corte generadas a partir de los levantamientos fotogramétricos de los hipogeos y fotografías generales y de detalle que permiten caracterizar al hipogeo y su infraestructura de protección. Dicha información reposa en los apartados 1 y 2 de los Expedientes de documentación de los hipogeos estudiados, anexos a este informe.

Los hipogeos documentados fueron:

Alto del Aguacate: A36, A41, A13 y A14

Alto de San Andres: SA1, SA8

Alto de Segovia: S5, S9, S10, S11, S12, S21

Alto del Duende: D4

Levantamiento fotogramétrico de los hipogeos.

Se realizó la captura sistemática de información para la generación de modelos tridimensionales de 11 de los 13 hipogeos antes referidos (los hipogeos A36, A41, SA1, SA8, S5, S9, S10, S11, S12, S21 y D4) y a partir de estos modelos se generaron las ortoimágenes de alta resolución mediante técnicas de fotogrametría digital. Esta información al igual que la totalidad de este informe reposa en el siguiente drive <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1gY4ep7btIbWZ93dBowLFHAPhcsk6hF5x> organizada para cada hipogeo.

Para obtener el levantamiento fotogramétrico de los hipogeos se siguió la siguiente metodología:

- Levantamiento fotográfico en campo.
- Procesamiento digital para generación de modelos tridimensionales mediante los Software Agisoft Metashape 2.21, Blender 4.5 y Rhino 7.
- Aplicación de técnicas de retopología para optimizar la geometría de los modelos.
- Generación de ortoimágenes de alta resolución para el análisis técnico de superficies y deterioros.

Documentación de la técnica de elaboración y las intervenciones anteriores

Se realizó la descripción de la técnica de elaboración de los hipogeos y de las intervenciones que han tenido en el tiempo los hipogeos estudiados, mediante registro fotográfico, análisis morfológico y revisión de bibliografía especializada. Luego, dicha información fue consignada en los apartados 3 y 4 de los Expedientes de Documentación anexos, proporcionando información relevante para orientar las decisiones de conservación.

Este procedimiento permitió identificar tanto las características constructivas, las etapas de talla de la roca y los sistemas decorativos presentes en los hipogeos documentados, como consignar aquellas intervenciones identificadas en campo y que aparecían referenciadas en la bibliografía existente sobre temas de conservación o que fueron referidas por los trabajadores del Parque.

El registro fotográfico que ilustra en cada hipogeo los principales rasgos tecnológicos fue presentado a manera de glosario ilustrado, al igual que en el estudio desarrollado por la Universidad Externado de Colombia (Bateman et al, 2019) en los hipogeos de mayor complejidad (SA1, SA8, S12, S11, S10) y en los demás buscó apoyar la narrativa que describe la técnica constructiva. Las fotografías de la técnica de elaboración, así como aquellas relacionadas a intervenciones anteriores fueron nombradas utilizando el Protocolo de nomenclatura de imágenes presentado en el anexo 2 y organizadas en las carpetas virtuales de cada hipogeo.

Se realizaron análisis petrográficos y de espectroscopía Raman de muestras tomadas en los diversos hipogeos con el fin de nutrir con información científica, la narrativa sobre la materialidad de los hipogeos y su técnica de elaboración. Esta información además de nutrir la documentación particular de cada hipogeo, aparece consignada con mayor detalle en el capítulo 5 de este informe.

Documentación y registro del estado de conservación

Hacer el estudio y documentación del estado de conservación de los hipogeos en estado crítico implicó realizar su estudio geológico, estructural, la determinación de sales y la identificación y control biológico. También describir mediante glosario visual los deterioros y alteraciones, el estado de las superficies de los hipogeos, y realizar el levantamiento gráfico de estos deterioros. Finalmente, hacer el diagnóstico que consideró el análisis de la relación entre indicadores, factores y mecanismos de deterioro y alteración. La información fue recabada a los largo de 4 salidas de campo y consignada en el apartado 6 de los Expedientes de documentación de los hipogeos estudiados anexos y en sus carpetas virtuales las fotografías y gráficos correspondientes.

La metodología implementada comprendió:

- Identificación en campo de indicadores de deterioro y alteración que afectan las superficies pétreas y la pintura mural.
- Revisión del glosario desarrollado en el convenio ICANH–Universidad Externado (Bateman et al, 2019) y su posterior ajuste en concordancia con lo observado en campo y lo propuesto por el glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra (ICOMOS ISCS, 2011).
- Registro fotográfico de estos deterioros en cada hipogeo, nomenclatura de las imágenes considerando el Protocolo de nomenclatura de imágenes presentado en el anexo 1 y posterior construcción de glosarios visuales.
- Levantamiento gráfico de deterioros sobre ortoimágenes en campo.
- Digitalización del registro de deterioros mediante la herramienta especializada MetigoMAP, herramienta que facilita la digitalización precisa del levantamiento realizado en sitio en la medida en que permite cuantificar la cobertura de cada uno de los deterioros generados. El detalle de la metodología utilizada para el uso de este programa aparece consignado en el

Protocolo para el levantamiento gráfico y cuantificable de estados de conservación mediante el uso del programa MetigoMAP. (anexo 2)

- Estudio geológico realizado a partir de la información geológica existente de la zona y el análisis petrográfico de muestras tomadas en los diversos hipogeos para comprender el estado de la roca y sus procesos de deterioro, descrito en detalle en el capítulo 5 de este informe.
- Determinación de sales tomadas en hipogeos en estudio ubicado en el Alto de Segovia cuya metodología específica aparece descrita en el capítulo 6 de este informe.
- Evaluación estructural de los hipogeos en estudio sustentada en la inspección in situ de los hipogeos en estudio, la información geotécnica de la roca (Tenjo et al, 2019) y el diagnóstico estructural que consideró el análisis de discontinuidades y diaclasas realizado en el marco del Plan de Conservación (Álvarez et al, 2024) así como el análisis de las formas construidas. Esta evaluación se presenta en el capítulo 7 de este informe.
- Identificación de agentes biológicos, selección de biocidas y control biológico que implicó la Identificación en campo y en laboratorio de agentes biológicos, la selección de biocidas a partir de experiencias previas tenidas en los hipogeos y en estudios de caso similares, la evaluación en laboratorio del efecto biocida sobre cultivos de ejemplares fúngicos tomados en los hipogeos. Se describe en detalle en el capítulo 8 de este informe.
- Construcción de los diagnósticos de estado de conservación que buscan establecer la relación entre indicadores, factores, y mecanismos de deterioro mediante el análisis de la información aportada por las observaciones de campo, el levantamiento de los deterioros, los análisis de deterioro y diagnósticos realizados con anterioridad en los hipogeos y la información aportada por los estudios geológico, de sales, estructural y la identificación de agentes biológicos realizados en el marco de este proyecto.

Documentación de la propuesta de intervención, el reporte de intervención y las recomendaciones

La documentación de los hipogeos consideró también la propuesta y reporte de intervención y las recomendaciones. Para la formulación de la propuesta de intervención de cada hipogeo se sostuvieron varias reuniones con el equipo de conservadores e ingenieros que permitieron definir los principios y criterios que orientaron tanto la documentación como la intervención. Los principios y criterios se plantean para este proyecto, buscan dar un lineamiento teórico para las futuras intervenciones que se hagan en el Parque y aparecen desglosados de manera detallada en el capítulo 10 de este informe, su redacción estuvo a cargo de Carla Rodríguez y María Paula Alvarez.

Una vez estos criterios y principios fueron definidos, y teniendo claro cuáles eran los materiales que podían usarse para las intervenciones, se realizaron pruebas de tratamiento que direccionaron los procesos a seguir. La información relacionada con procedimientos y materiales a utilizar en la intervención, así como los aspectos antes referidos permitieron definir la propuesta de intervención de cada hipogeo lo que fue consignado en el apartado 7 de los Expedientes de documentación anexos a este informe.

El reporte de intervención, consignado en el apartado 8 de los Expedientes de conservación anexos, consideró el registro fotográfico, escrito y gráfico de las actividades de saneamiento, control biológico

y conservación realizadas en los hipogeos. Las intervenciones realizadas en los hipogeos intervenidos a lo largo del proyecto fueron también consignadas en el capítulo 11 de este informe.

Finalmente, se formularon recomendaciones para el mantenimiento, la conservación y el monitoreo de cada uno de los hipogeos estudiados que fueron consignadas en el apartado 9 de los Expedientes.

Las actividades de documentación antes descritas fueron desarrolladas por el equipo integrado por los conservadores Ana María Jaimes, Zaira Zuluaga, Laura del Pino, Juanita Enciso, Yolanda Pachón, Camila Mayorga, Carla Rodríguez, Luis Vergara, Dafne Martínez, Sara Merchán, María Camila Ramírez, Pablo Vargas, Sofía Sabogal, Lina Rincón y la arquitecta Angela Cely bajo la coordinación de María Paula Álvarez y la asesoría de Clemencia Vernaza. El diseñador especialista en documentación 3D Pedro Cadena fue el encargado de generar los modelos fotogramétricos de los hipogeos y las fotos orto normadas. El ingeniero estructural Juan Alejandro Dávila llevó a cabo la evaluación estructural de los hipogeos, el geólogo Jorge Barón realizó el estudio de los materiales constitutivos de los hipogeos y el deterioro de la roca, los análisis de sales fueron adelantados por Sara Merchán y la identificación de agentes biológicos y selección de biocidas estuvo a cargo del biólogo Antonio Guarnizo.

3.2 INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA LA INTERVENCIÓN.

El proyecto incluyó una línea metodológica orientada a la investigación de materiales para la intervención, particularmente la selección de materiales consolidantes, adhesivos y la formulación de morteros que pudieran ser compatibles con la roca de los hipogeos.

Para la selección de materiales consolidantes fue necesario hacer una indagación de estudios de caso que refieren problemas de disgregación de tobas volcánicas, lo que permitió la preselección de algunos productos y su aplicación en pruebas in situ. El análisis de los resultados con estas pruebas sirvió de base para la selección del producto consolidante a utilizar en las intervenciones que requirieron un consolidante. La conservadora Dafne Martínez estuvo a cargo de la selección del consolidante.

La selección de adhesivos para la pintura mural requirió igualmente de una indagación bibliográfica sobre los productos que presentan mejor performance para adherir capas de pintura mural y de pruebas in situ adelantadas por la restauradora Yolanda Pachón.

Con el fin de asegurar la estabilización de la roca y decoración mural de los hipogeos fue necesario hacer el ajuste y validación de morteros de inyección, estructural y de resane, garantizando su compatibilidad técnica y estética con la toba volcánica y la pintura mural.

El mortero estructural requirió primero ser reformulado y por lo tanto fue necesario desarrollar ensayos de laboratorio con morteros compuestos por toba local, cal, cemento blanco y aditivos específicos hasta obtener la fórmula que se acercó más a reproducir las condiciones naturales de la roca y cumplir con los requerimientos de un mortero estructural. Lo anterior implicó lo siguiente:

- Verificación de componentes del mortero y realización de pruebas en laboratorio para asegurar su compatibilidad física y mecánica con la toba original.

- Formulación del mortero en diferentes consistencias para aplicaciones de inyección o aplicación manual.

Luego la fórmula resultante fue probada y ajustada en campo, para ser posteriormente utilizada para reforzar columnas y adherir fragmentos de gran tamaño.

El mortero estructural fue desarrollado por los ingenieros especialistas en concreto Lina María Méndez y German Hermida y su equipo de trabajo en laboratorio y fue evaluado en campo por los conservadores María Paula Álvarez y Camilo Betancur

Para el mortero de inyección se partió de la investigación desarrollada en 2019 (Vernaza, 2019) observando que las pruebas debían repetirse en la medida en que no se tenía certeza que las tierras utilizadas en 2019 en la formulación del mortero de inyección tuvieran la misma composición de las recolectadas en 2025. Esta investigación implicó los siguientes pasos:

- Realización de taller sobre morteros de inyección con la conservadora Clemencia Vernaza
- Colecta de tierras de la zona
- Maceración y tamizado de las tierras
- Realización de pruebas físicas y reológicas de acuerdo con la metodología propuesta por Vernaza (2019)
- Evaluación de pruebas
- Posteriormente se desarrollaron pruebas piloto in situ, que permitieron evaluar el comportamiento de los morteros en condiciones reales de aplicación y seleccionar las más recomendables para la estabilización de las superficies de los hipogeos.

Las tierras usadas para las mezclas a evaluar fueron colectadas por los trabajadores del parque y cernidas por el equipo de conservadores del proyecto. La roca que se usó como maqueta y sobre la que se hicieron las pruebas fueron extraída con apoyo de Camilo Betancur y, tanto las pruebas como su documentación estuvo a cargo de las restauradoras Carla Vanesa Rodríguez y Camila Fernanda Mayorga.

La formulación del mortero de resane estuvo a cargo Laura del Pino y Camilo Betancur, inspirado en las pruebas realizadas para evaluar el mortero de acabado de la Iglesia de Kuñotambo (Vernaza 2021), implicó el desarrollo de los siguientes pasos metodológicos

- Colecta de tierras de la zona
- Realización de pruebas físicas
- Evaluación de pruebas
- Desarrollo de pruebas piloto in situ, que permitieron evaluar el comportamiento de los morteros en condiciones reales de aplicación y seleccionar las más recomendables para la estabilización de las superficies de los hipogeos.

La metodología específica seguida en cada caso antes expuesto como los resultados obtenidos aparecen consignados en el capítulo 4 de este informe.

3.3 INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTABILIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO.

Le metodología que guio la intervención de los hipogeos consideró los siguientes pasos:

- Discusión con el equipo de conservadoras hasta lograr la definición de criterios y principios de intervención, luego Carla Rodríguez y María Paula Álvarez se encargan de hacer la redacción de dichos principios y criterios que se presentan en el capítulo 10 de este informe
- Discusión, formulación y documentación de propuestas de intervención que permite establecer que los hipogeos que se van a intervenir de manera prioritaria son el SA1, S18, S21, S10, S11, S12.
- Control biológico de los hipogeos donde se llevan a cabo las intervenciones de estabilización y estructural a lo largo de 2 salidas de campo.
- Desarrollo de la intervención estructural y de estabilización de superficies en los hipogeos SA1, S5, S10, S11, S12 y S21 siguiendo lo planteado en las propuestas de intervención. Las acciones de conservación se realizan a lo largo de 2 salidas de campo, aplicando procedimientos y materiales compatibles con los originales.
- Documentación de las acciones adelantadas en informes de comisión, en el capítulo 11 de este informe y el apartado 7 de los Expedientes de documentación de hipogeos en estudio, anexos a este informe.
- Seguimiento de las intervenciones realizadas en posteriores visitas y mediante registro escrito y fotográfico.

Estas actividades fueron desarrolladas a por el equipo conformado por los conservadores Ana María Jaimes, Zaira Zuluaga, Laura del Pino, Yolanda Pachón, Camila Mayorga, Carla Rodríguez, Dafne Martínez, Sara Merchán, Pablo Vargas, Sofía Sabogal, el artista plástico Camilo Betancur, el biólogo Antonio Guarnizo, con el apoyo técnico de Giancarlo Narváez y los trabajadores del Parque de Tierradentro bajo la coordinación de María Paula Álvarez. Los ingenieros Fernando Gómez, Juan Alejandro Dávila y Germán Hermida brindaron la asesoría para las intervenciones estructurales.

3.4 MONITOREO BIOLÓGICO Y DE LAS INTERVENCIONES

Al finalizar las intervenciones de estabilización y refuerzo estructural de los hipogeos SA1, S12, S11 y S10 se observó el crecimiento fúngico desmedido en las superficies pétreas. Lo anterior requirió de generar una metodología que consideró los siguientes aspectos:

- Colecta e identificación de especímenes fúngicos.
- Selección y realización de pruebas in situ con biocidas.
- Monitoreo de crecimiento fúngico que implicó la capacitación a trabajadores para asegurar el
- Seguimiento in situ y la inspección visual por parte de las conservadoras. El seguimiento a las pruebas y al crecimiento fúngico se hizo durante 4 meses con el apoyo de la administradora y trabajadores del Parque de Tierradentro.
- Planteamiento de recomendaciones para el manejo de la biocolonización.
- Seguimiento a intervenciones realizadas.
- Planteamiento de propuestas para completar las intervenciones de los hipogeos.

La información generada fue consignada en el capítulo 12 de este informe. La identificación de especímenes fúngicos fue hecha por Antonio Guarnizo y con María Paula Alvarez lideraron el monitoreo del crecimiento fúngico, la selección de biocidas para pruebas y la formulación de propuestas para su manejo. La capacitación a trabajadores para el seguimiento al crecimiento microbiano y los pruebas in situ con biocidas fueron llevadas a cabo por los conservadores Luis Vergara, Sofía Sabogal y María Paula Alvarez y el ingeniero Fernando Gómez.

3.5 EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBA VOLCÁNICA FRENTE A LA HUMEDAD EN LOS HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN.

Dado que en muchos hipogeos del Parque se evidencia el deterioro de la disgregación, se buscó hacer la evaluación del comportamiento de la toba volcánica frente a la humedad en los hipogeos que más evidencian este deterioro, adelantar el monitoreo ambiental, incorporar los aportes realizados por el informe geológico e implementar algunas acciones que buscan minimizar el impacto de este deterioro, con la siguiente metodología:

- Verificación en campo de los hipogeos que más presentaban disgregación, la información recabada aparece documentada en el anexo 4.
- Seguimiento in situ y documentación durante 4 salidas de campo realizadas a lo largo de 7 meses de las propiedades físicas de la roca relacionadas con la disgregación y el comportamiento de la toba frente a la humedad en los hipogeos A36, A41, SA8, SA1, S12 y S21.
- Seguimiento y documentación de condiciones ambientales al interior y sobre las superficies de estos hipogeos a lo largo de 4 salidas de campo.
- Estudio en laboratorio de la disgregación mediante el análisis de secciones delgadas tomadas de muestras de roca extraídas de los hipogeos.
- Realización de pruebas piloto de intervenciones orientadas al tratamiento de la disgregación.

La información sobre propiedades físicas y condiciones ambientales y en la superficie de los hipogeos se encuentra relacionada en informes de comisión, en el capítulo 13 de este informe y el anexo 2 de los Expedientes de documentación de los hipogeos A36, A41, SA8, SA1 y S12, anexos a este informe. Estas actividades fueron desarrolladas por los conservadores Luis Vergara, Dafne Martínez y Sofía Sabogal, el ingeniero Fernando Gómez y el geólogo Jorge Barón bajo la coordinación de María Paula Álvarez.

3.6 MONITOREO AMBIENTAL

Buscando comprender cuáles eran las condiciones ambientales al interior de los hipogeos y si éstas variaban en los momentos en que el equipo de trabajo se encontraba en su interior, se realizó el monitoreo ambiental de los hipogeos en estudio. Los datos de HR y temperatura se registraron de manera sistemática durante 7 meses en el S21, S30, S10, S11, S12 y SA1 y puntualmente en los

momentos en que se estuvo en campo a lo largo de 4 comisiones en los hipogeos A13, A14, A36, A41, SA8.

El análisis de la información medioambiental fue realizado por Sofía Sabogal, aparece consignada en el capítulo 14 de este informe y complementada por el biólogo Antonio Guarnizo para el hipogeo S12 (anexo 7). La información puntual de condiciones ambientales tomadas en los hipogeos aparece consignada en el apartado 5 de los Expedientes de documentación de los hipogeos anexos.

3.7 SOCIALIZACIÓN Y DIVULGACIÓN DE RESULTADOS DEL PROYECTO

Con el propósito de dar a conocer el proyecto y sus resultados fueron realizadas varias sesiones presenciales y virtuales con poblaciones diversas. Trabajadores del Parque, comunidades vecinas y público en general se beneficiaron de charlas (4 realizadas en Tierradentro, 4 en Bogotá) y talleres (1 en Inzá) que buscaron explicar el proyecto y sus resultados. La información relativa a estas actividades se presenta en el capítulo 15 de este informe.

Las conservadoras María Paula Alvarez, Sofía Sabogal, Carla Rodríguez, Camila Mayorga, Dafne Martínez, Sara Merchán, Luis Vergara, Ana María Jaimes, Yolanda Pachón, el artista plástico Camilo Betancur y el ingeniero German Hermida participaron de dichas actividades.

3.8 AJUSTES METODOLÓGICOS DURANTE LA EJECUCIÓN

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron varios ajustes frente a lo planteado en la propuesta inicial, acá se describen aquellos que modifican los entregables.

Ampliación del levantamiento fotogramétrico

El proyecto inicial contemplaba inicialmente la documentación de cinco hipogeos, sin embargo, en el estudio se adelantaron 11 modelos tridimensionales disponibles para los trabajos de conservación.

Alcance de la propuesta y la intervención estructural

Dentro de la metodología inicial se contemplaba que en los hipogeos D4, S5, S9, S10, S11, S12, S21, SA1, SA4 se realizara la intervención estructural que incluía el relleno de diaclasas con mortero de inyección estructural en todos estos hipogeos y la reconstrucción de las columnas de los hipogeos S12, SA1 y SA4 y pero, como fue referido con anterioridad, en la inspección inicial se evidenció que los hipogeos D4, S9, y SA4 no requerían de intervención estructural por lo cual las acciones estuvieron centradas en los hipogeos SA1, S10, S11, S12 y S21. Además, el diagnóstico estructural permitió aclarar que no era necesario reconstruir las columnas del S12 y SA1, por lo cual esta acción no fue realizada.

Monitoreo biológico

Dado que en los hipogeos SA1, S10, S11 y S12 después de las intervenciones se evidenció la presencia microbiana desmedida, fue necesario desarrollar una metodología para el monitoreo de este parámetro y plantear un tratamiento adecuado para su control. Este monitoreo complementa las acciones adelantadas con el control biológico antes de la intervención y profundiza en el estudio de comunidades fúngicas creciendo sobre las superficies de los hipogeos. Es un aspecto que no había sido considerado en la propuesta inicial.

Evaluación y seguimiento del contenido de humedad in situ y en laboratorio en los hipogeos SA8, A13 y A14

Como fue referido con anterioridad, el proyecto presentado inicialmente a la FIAN consideraba hacer la evaluación del contenido de humedad en los hipogeos SA8, A13 y A14 por estos tener disgregación, sin embargo, se evidenció que el A13 y A14 no estaban afectados con este deterioro y por ello se descartaron del estudio, en lugar fueron abordados el A36, A41. El estudio consideró además una mirada más amplia a la disgregación incluyendo observaciones sobre otros hipogeos en el Alto de Segovia, Alto de San Andrés y el Alto del Aguacate.

Modificación de los pilotos para el tratamiento de la disgregación

Con el fin de acercarse al tratamiento de la disgregación la propuesta inicial contemplaba la realización de pilotos para la eliminación del geotextil en los hipogeos A13 y A14, así como la realización de piloto sobre eliminación de franja de concreto en el piso del cobertizo del SA8, y aplicación puntual de humedad. Como fue antes referido, dado que los hipogeos A13 y A14 no presentaban disgregación, fueron el A36 y A41, SA8 y S12 aquellos donde se evaluaron las variables relacionadas con la disgregación. Durante la ejecución de este estudio se decidió que no se eliminaría el geotextil en hipogeos del Aguacate ni la franja de concreto del hipogeo SA8, con el fin de preservar la integridad de los datos climáticos de referencia y evitar alteraciones en las condiciones ambientales que se estaban registrando en los hipogeos en estudio, optando por realizar, en cambio intervenciones menores consistentes en generar unas pocas perforaciones en el geotextil del hipogeo S12 para evaluar si el ingreso de humedad contribuía a mejorar el problema de disgregación de la roca y pequeñas perforaciones en el cobertizo del hipogeo A41 para humedecer de manera controlada la superficie pétreo.

Ampliación del monitoreo ambiental

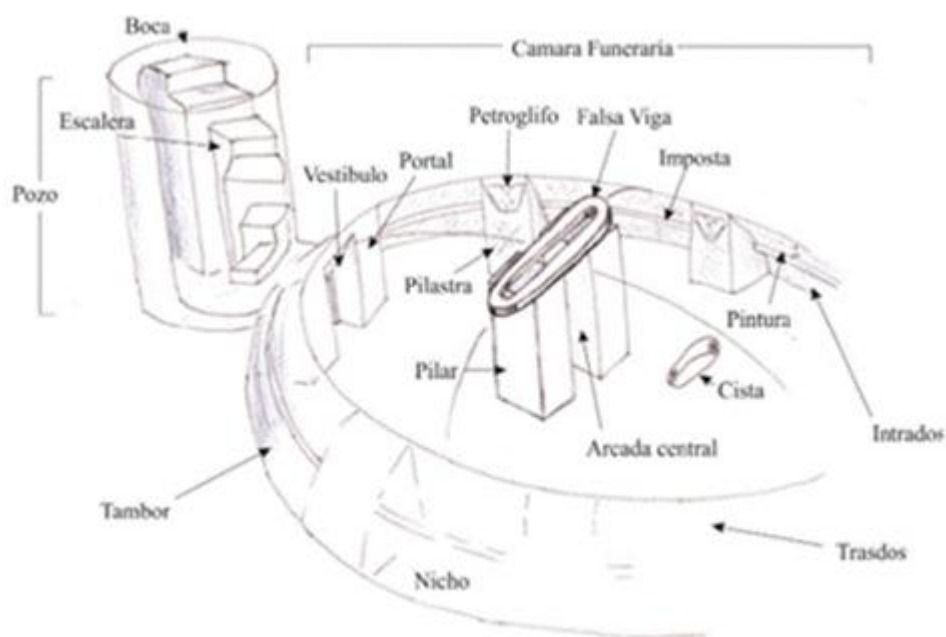
El monitoreo ambiental inicialmente planteado para los hipogeos SA8, A13 y A14 fue ampliado para incluir otros hipogeos y poder, por un lado, evaluar el impacto que puede tener el desarrollo de este tipo de proyectos sobre estas estructuras, y por el otro contar con datos para aproximarse a la relación entre humedad y deterioro de la roca. Este fue realizado en los hipogeos del Alto de Segovia: S5, S10, S11, S12 y S21, Alto de San Andrés: SA1 y SA8 y Alto del Aguacate: A36 y A41.

4. DOCUMENTACIÓN DE LOS HIPOGEOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS HIPOGEOS Y SUS SISTEMAS DE PROTECCIÓN

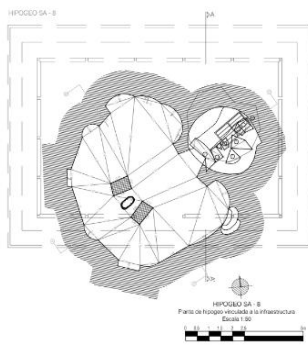
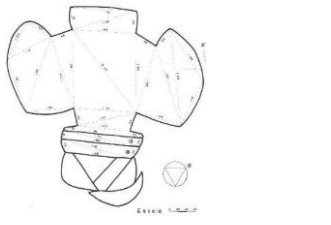
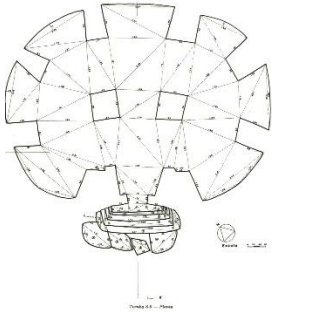
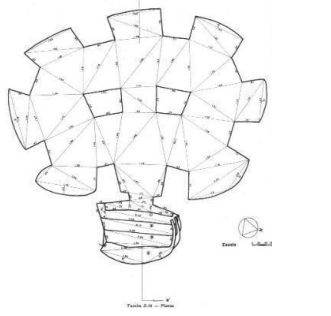
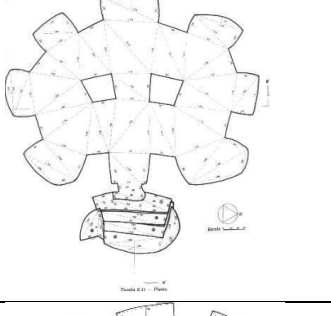
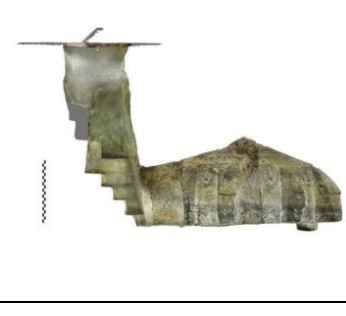
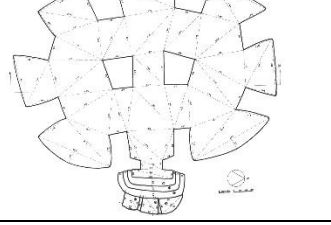
Dentro de los trece hipogeos estudiados en el marco de este proyecto, ocho de ellos corresponden a hipogeos complejos que se caracterizan por su dimensión, siete de ellos cuentan con techos abovedados, columnas centrales (pilares), pilastras y nichos y en uno de ellos, el D4, el techo de la cámara es a dos aguas sin pilares. Los otros cinco hipogeos estudiados corresponden a hipogeos sencillos, pequeños de cámara circular.

La siguiente ilustración muestra las partes constitutivas de los hipogeos complejos, el protocolo de nomenclatura de imágenes que corresponde con el anexo 1 de este informe, precisa la ubicación de dichas partes sobre el levantamiento en planta de un hipogeo. Luego la tabla presenta las dimensiones de once de los hipogeos, su planta y la ortofotografía de su corte lateral, permite ilustrar la diversidad formal de las estructuras estudiadas.



Elementos Arquitectónicos de un Hipogeo.
(ilustración C. Montenegro, Fundación Alma)

Alto	Hipogeo	Área [m ²]	Volumen [m ³]	Levantamiento en planta	Vista en corte
San Andrés	SA1	156.78	70.72		

	SA8	142.3 5	60.98		
Segovia	S5	54.71	15.57		
	S9	188.8 5	70.77		
	S10	148.7 3	54,95		
	S11	148.7 3	59.45		
	S12	177.6 5	70.66		

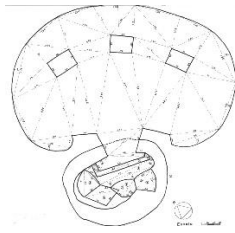
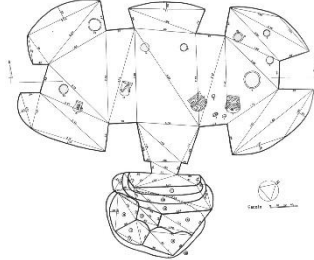
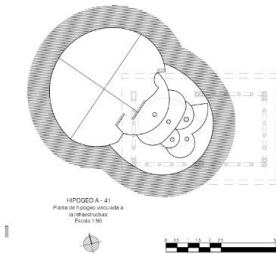
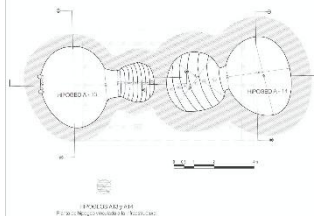
	S21	141.9 9	57.69		
Duende	D4	131.8 8	52.83		
Aguacate	A36*	49.14	13,75		
	A41	46.81	11,80		
	A13 y A14				

Ilustración 3. Areas, volúmenes, levantamientos de planta de los hipogeos SA1, SA8, S5, S9, S10, S11, S12, S21y D4 (Chaves y Puerta, 1984) y A41, A13 y A14 (Alvarez et al, 2023) y A36 (Vergara, 2026), ortofotos de los cortes laterales de los hipogeos en estudio generadas por Pedro Cadena. Los hipogeos A13 y A14 por no contar con levantamiento fotogramétrico no presentan el cálculo de áreas y volúmenes.

Areas y Volúmenes se calculan sobre el material que corresponde a la toba, como si de un recipiente se tratara. En algunos hipogeos el cálculo se hizo desde 10 cms por debajo del nivel del piso del cobertizo, pero en otros se hizo por debajo del primer escalón. Hay que tener eso en cuenta por que los volúmenes tienen un margen de error que puede ser de 1 metro cubico o más por las zonas que se eliminan en la parte de las escaleras.

Todos estos hipogeos presentan cobertizos, puerta de acceso para los pozos y señalética, a excepción de los hipogeos del Aguacate donde el acceso a los hipogeos se hace de manera directa y no hay señalética ni nomenclatura que permita ubicar o comprender mejor otros aspectos de los hipogeos. El primer y segundo apartado de los Expedientes de documentación anexos presentan la información contextual de los hipogeos y el levantamiento fotográfico y gráfico detallado de dichas estructuras de protección.

Levantamiento fotogramétrico de hipogeos

En relación con el componente de levantamiento fotogramétrico, una vez iniciado el proyecto junto con las actividades de trabajo de campo, se revisaron y ajustaron los alcances técnicos definidos para esta actividad. Se contemplaba inicialmente el desarrollo de cinco (5) levantamientos, lo cual fue ampliado, logrando consolidar un flujo de trabajo fotogramétrico integral aplicado a un total de once (11) hipogeos localizados en los sectores del Alto de Segovia, Alto de San Andrés y Alto del Aguacate. Específicamente, los hipogeos donde se realizaron los levantamientos fotogramétricos son los siguientes:

Alto de Segovia	S-5, S-10, S-11, S12, S21.
Alto de San Andres	SA1, SA8.
Alto del Aguacate	A-36, A-41.

Como fue referido, el proceso de levantamiento fotogramétrico comprendió la captura sistemática de fotografías en campo en cada hipogeo, seguida de su procesamiento digital mediante los Software Agisoft Metashape 2.21, Blender 4.5 y Rhino 7 que permitió generar modelos tridimensionales y fotos ortonormadas de alta fidelidad. Las técnicas avanzadas de retopología implementadas a la hora de generar los modelos fotogramétricos permitieron optimizar la geometría compleja, manteniendo la precisión morfológica de las superficies.

Las ortoimágenes de alta resolución obtenidas a partir de los modelos fotogramétricos garantizan una documentación rigurosa y técnicamente consistente de cada uno de los hipogeos y aportan el insumo para sobre ellas hacer el análisis técnico de superficies, la evaluación de su estado de conservación y la toma de decisiones en el proceso de formulación de la propuesta de tratamiento.

Dependiendo de la complejidad de los hipogeos fue necesario generar un número mayor o menor de ortoimágenes, por ejemplo, para los hipogeos más complejos se generaron entre 45 y 60 orto imágenes mientras que para los más sencillos entre 15 y 20 imágenes permitieron ilustrar la totalidad de las superficies. Las ortoimagenes generadas para todos los hipogeos corresponden a capturas tomadas de los modelos fotogramétricos que conservan el paralelaje y muestran superficies de 2 metros de ancho.

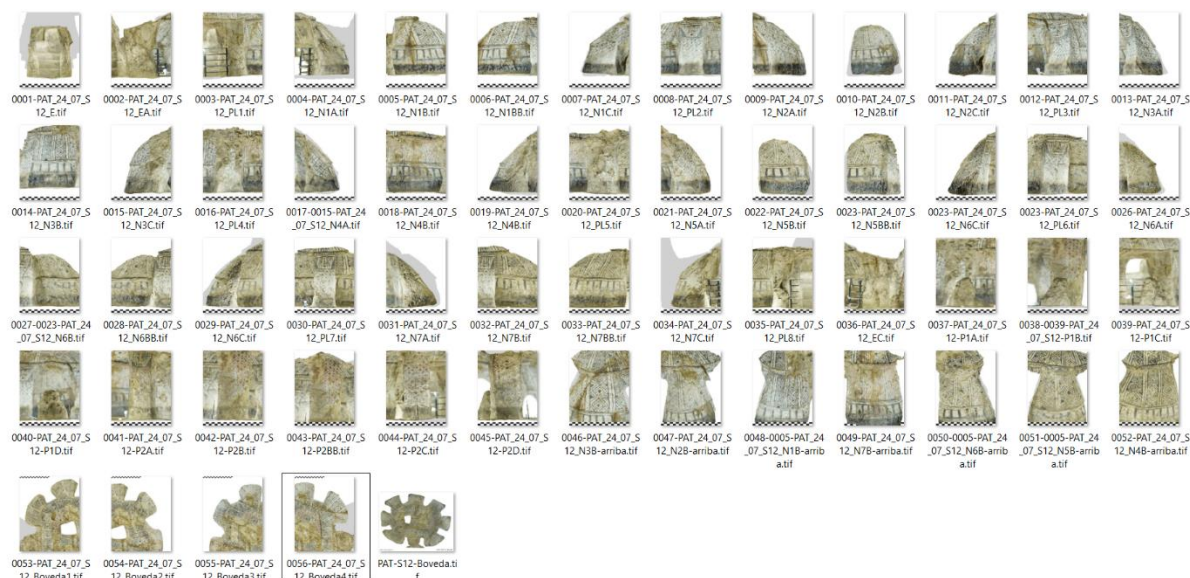


Ilustración 4. Fotos ortonormadas Hipogeo Segovia (S-12). Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

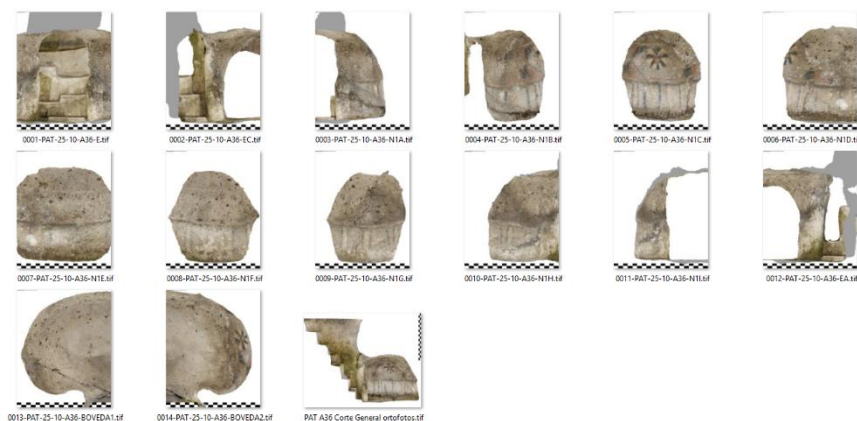


Ilustración 5. Fotos ortonormadas Hipogeo Segovia (S-36). Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

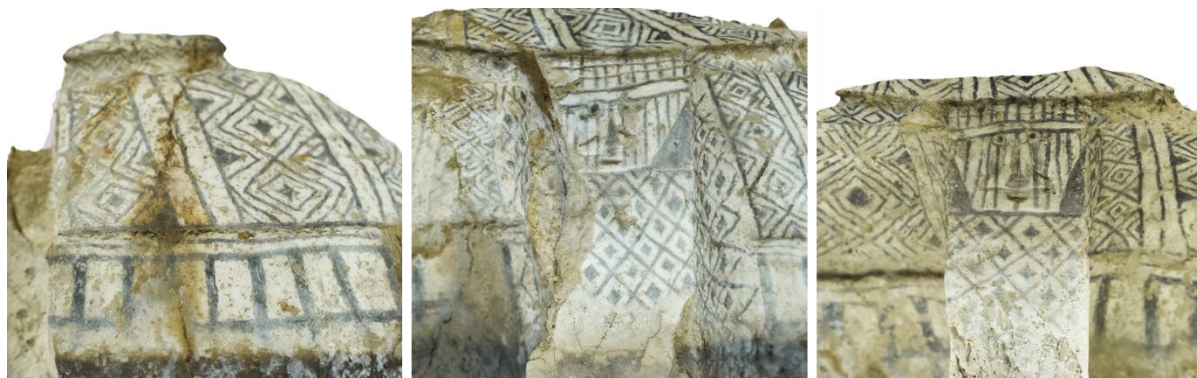


Ilustración 6. Fotos ortonormadas Hipogeo Segovia (S-12). Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

Adicionalmente, los modelos fotogramétricos generados fueron un recurso de documentación importante para poder revisar a lo largo del proyecto asuntos puntuales en los hipogeos, desde

detalles formales, relacionados con el estado de conservación o verificar áreas y condiciones para planificar la intervención.

Los modelos fotogramétricos también resultan un insumo de divulgación fundamental para dar a conocer los hipogeos y sus valores por lo que además de haber sido presentados en las diferentes actividades de divulgación del proyecto fueron, para el caso de los hipogeos S10, S11, S12, S21 y SA1, integrados y dispuestos en una plataforma web de acceso público, disponible para consulta en el siguiente enlace: <https://tierradentro3d.com/hipogeos/>. Esta acción contribuye a la divulgación del conocimiento técnico generado en el marco del presente proyecto.

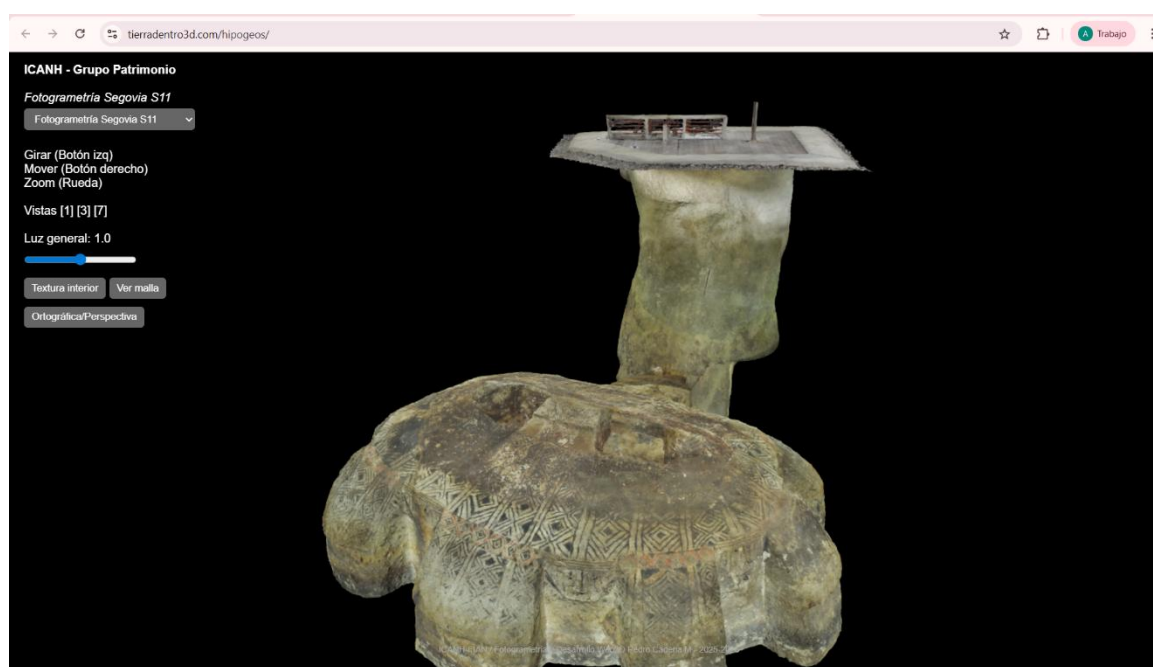


Ilustración 7. Visualización de modelo fotogramétrico del hipogeo S11 en la plataforma web de acceso público. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

4.2 SOBRE LA TÉCNICA DE ELABORACIÓN DE LOS HIPOGEOS EN ESTUDIO

La documentación de la técnica de ejecución de los hipogeos abarca integralmente las diferentes etapas del proceso constructivo, desde la fase inicial de talla y conformación de la estructura hasta la definición formal de los hipogeos. Se prestó especial atención a la morfología de las cámaras y a los sistemas de soporte tallados directamente en la roca encontrando que la diversidad formal muestra la manera en como los constructores se adaptaron al terreno aprovechando al máximo las características de fácil tallado de la toba volcánica.

Asimismo, el levantamiento incluyó un análisis detallado de la decoración pictórica, permitiendo comprender la secuencia constructiva y decorativa.

El uso de la información existente sobre materiales constitutivos de los hipogeos y de bibliografía que refería con anterioridad el tema, permitió identificar y caracterizar las particularidades de las técnicas

empleadas en la construcción y decoración de los hipogeos S5, S10, S11, S12, S21, SA1, SA8, A36, A41, A13 y A14.

El levantamiento de la técnica de elaboración se fundamentó en describir de manera detallada e ilustrada tanto los procesos constructivos como decorativos de los hipogeos a intervenir. Este proceso implicó la revisión del glosario propuesto por el convenio ICANH Universidad Externado de Colombia (Bateman et al, 2019) y posterior verificación y registro fotográfico en cada hipogeo de cómo éstas evidencias materiales develan diferentes aspectos de la técnica constructiva y decorativa. Las fotografías permitieron ilustrar los apartados de técnica de elaboración de los Expedientes de documentación de los hipogeos anexos a este documento.



Ilustración 8. Ejemplo de glosario visual, técnica de elaboración del hipogeo A41. Fuente: proyecto FIAN 2025-2026.

Los resultados obtenidos en esta fase constituyen un insumo fundamental para el proyecto, en tanto proporcionan una comprensión integral de la materialidad y las técnicas constructivas y decorativas de los hipogeos objeto de intervención, facilitando la toma de decisiones en las fases posteriores del proyecto.

4.3 SOBRE LAS INTERVENCIONES ANTERIORES

Como fue referido con anterioridad, en los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro se han realizado y documentado intervenciones de conservación particularmente desde los años ochenta. Dichas intervenciones aparecen referidas en informes técnicos e investigaciones que fueron en su mayoría recogidas por el Plan de Conservación adelantado entre 2023 y 2024 (Álvarez et al, 2024) y cuyos resultados se recogen en las siguientes líneas. Estas intervenciones aparecen también referidas en el Expediente de Documentación de cada hipogeo (anexo 8 a 18) en el apartado de intervenciones anteriores.

Se presenta cronológicamente una síntesis de las intervenciones o modificaciones en los Altos, por ejemplo, para el manejo de aguas. También las realizadas en la infraestructura de protección o

directamente en los hipogeos y que proponían su conservación y mantenimiento. Se refieren también los estudios e intervenciones relacionadas con el control biológico y el saneamiento ambiental.

Antes de los años ochenta: construcción de primeros cobertizos y reconstrucción de columnas en hipogeos de San Andrés por parte de los trabajadores

Años ochenta: Construcción de cobertizos seguido por la instalación cercas de madera en el umbral del hipogeo. Además de intervenciones para controlar o detener el biodeterioro mediante *Fosfamina Detia-Gas* dirigido a la población de insectos y *Diamin* (*Cloruro de benzil-dimetil-alquil-amino*) en solución acuosa al 1%, *borax* al 5% e *hipoclorito* al 5% y complejo *Cobre e Hidracina* ($\text{CuSO}_4 + \text{Hidracina}$), agentes dirigidos al control de macroorganismos, líquenes y algas. (Alvarez et al 2002). Estudios de conservación, fichas e indicadores de deterioro. (CNR, Bocanegra, 1989)

1990 y 1991: Diseño de sistema de drenaje superficial. (INGENIERIA E HIDROSISTEMAS LTDA, 1990 y IEH Ltda, 1991)

Helbert Guerrero en 1990 propuso realizar un tratamiento en intervalos de 24 horas, 6 meses y un año, con la finalidad de controlar las especies biológicas encontradas en los hipogeos, donde la presencia de ejemplares de la división Chlorophyta (*Ulothrix* spp. *Mougeotia* spp. y *Chlorella* spp.), Cyanophyta (*Oscillatoria* spp.) y Chrysophyta conforman la comunidad de algas fotosintéticas encontradas en los hipogeos, además de los ejemplares de líquenes y briofitas (Familia Pottiaceae) que dadas las condiciones ambientales y el intemperismo de las zonas, se desarrollan y proliferan favoreciendo la mineralización y sucesión biológica.

1995 y 1996: Primer taller de conservación y Programa de Conservación Técnica de los Parques Arqueológicos de Colombia apoyado por la UNESCO y realizado con profesionales del Centro de Restauración y expertos internacionales que permite tener un diagnóstico de 4 hipogeos de Segovia, ahondar en el conocimiento de la técnica constructiva, hacer pruebas de consolidación, resanes, inyección de morteros, mantenimiento de los cobertizos de protección de los hipogeos, apuntalamiento preventivo en el hipogeo S8, SA1 y SA5.

1996; Diagnóstico con levantamiento de deterioros en 13 hipogeos, incluidos el S30, A43 y A42), propuestas de intervención. (Preciado, 1996)

2001: Estudios y reconstrucción de columna en el hipogeo S8. Impermeabilización en torno a los hipogeos S8, S14, S26, S29, S9, S10, S11 y S12 en el Alto de Segovia (Hermida et al y Hermida, 2001)

2002: Recopilación de toda la información existente en torno a los hipogeos que permite comprender su problemática, las intervenciones que han tenido y que acciones de conservación están pendientes (Álvarez et al. 2002).

2004: Diagnóstico integral del hipogeo S12 con estudio de materiales de la pintura mural, referencia de biocolonización en el hipogeo y la barrera de ingreso (Jiménez, 2024)

2006: Diagnóstico general de hipogeos abiertos en todos los Altos / S12: Metodología de intervención, pruebas de limpieza y procesos estructurales (Alvarez et al, 2006)

2010: Villalba (2010) mediante el saneamiento ambiental en hipogeos reporta un nivel de biocontaminación dado principalmente por hongos filamentosos y bacterias, donde los principales géneros fúngicos identificados fueron *Penicillium* spp., *Cladosporium* spp., *Aspergillus* spp., *Rhizopus* spp., *Nigrospora* spp., *Trichoderma* spp., *Bipolaris* spp., *Phoma* spp., además de los géneros de bacterias *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. Siendo sus requerimientos fisiológicos compatibles con las condiciones que ofrece el hipogeo, T 20º - 30º y HR >70%. Para el saneamiento ambiental la contratista empleo *Enilconazole* (Azoles) a una concentración de 5g para microorganismos, mientras que para la desinsectación empleo *Detia-Gas* (Fosfuro de Aluminio).

Por otro lado, Mendoza (2010) realizó un estudio y evaluación de la actividad de los cienpies (Myriapoda – Diplopoda) sobre la conservación de los hipogeos, donde los daños (micro cavernas o galerías) no son exclusivamente causados por estos insectos, sino es un conjunto de insectos en los que se destacan al orden Blattodea y Formicidae. De los órdenes identificados, la autora reporta a Spirobolida (Familia *Spirobolidae*), donde sus dietas son constituidas por detritus, materia orgánica en descomposición, raíces y madera. A su vez reporta a los órdenes Scutigeromorpha y Scolopendromorpha cuya dieta consiste en otros artrópodos siendo un controlador biológico clave para el equilibrio del ecosistema y en especial de los factores biológicos (insectos) asociados al deterioro de los hipogeos.

2012: Estabilización de los orificios ocasionados por insectos en los hipogeos S15, S19 y S24 S8, S12, SA1 y SA8: Evaluación estructural e implementación de apuntalamientos en SA1 por parte del ingeniero Juan Carlos Rivera, construcción de filtros alrededor de hipogeos SA2 y SA3 mantenimiento del sistema de iluminación en hipogeos de Segovia realizado por el ingeniero Veloza. (Estela, 2012)

2013: Conservación preventiva, limpieza, propuestas de intervención para problemas estructurales en hipogeos de Segovia y San Andrés. Construcción de cinco cobertizos, excavación de 12 hipogeos y clausura de 14 hipogeos, instalación de geotextil alrededor de los hipogeos: A4, A20, A21, A28, A29, A25 Construcción de filtro entre los hipogeos S17 y S19. (Zuluaga, 2013).

2014: Cambio de barreras de guadua deterioradas y eliminación de suciedad superficial en hipogeos del Alto de Segovia S1, S2, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S15, S16, S17, S18, S19, S20, S21, S24, S25, S26 y S30, Alto del Duende (D1, D2, D3 y D4) y en los seis hipogeos del Alto de San Andrés (SA1, SA3, SA4, SA5, SA6 y SA8), construcción de peldaños adicionales en hipogeo SA8, construcción de filtro entre hipogeos S17 y S19, en el Alto de Segovia, el Duende y San Andrés se realizaron labores de limpieza a los canales de los cobertizos, (Zuluaga, 2014)

Estudio de la materialidad de la pintura mural de los hipogeos (Rodríguez, 2014; Wright, 2015)

2015: Se finaliza la instalación de mallas en las puertas de acceso a los hipogeos de San Andrés, el Duende y Segovia, limpieza de canales en cobertizos, se arreglan los sistemas de iluminación de los hipogeos S20 y S21 en el hipogeo S11 se inyecta aceite de creosota diluido en agua al 10%, en las galerías de abejorro y luego se sellaron los orificios con mortero de cal y toba en proporción 1:2. Se cambia la teja de los cobertizos D3 y D5, se cierra la entrada de lo que se presume es el hipogeo S5

con geotextil. (Zuluaga, 2015) Se determina que la luz LED no afecta la pintura de los hipogeos (Rodríguez, 2015) y que la iluminación artificial no debe ser instalada con tanta proximidad a las superficies de los hipogeos para fomentar la biocolonización. (Villalba, 2015)

2017: Ampliación cobertizos Segovia S21 y S21, limpieza de canales, instalación de testigos para evaluar grietas, corte de raíces al interior de S21, resane de escaleras en S26 y S28. En el Alto del Aguacate en hipogeos con cobertizos se hace la eliminación de vegetación (manualmente), eliminación superficial de plantas no vasculares (cepillo de cerdas duras), eliminación de material orgánico en escaleras, entradas techo y cobertizos con una escoba y eliminación del material particulado proveniente de la disgregación de escaleras. (López, 2017)

2018: Diagnóstico y estudio de materiales constitutivos de hipogeos del Aguacate (Giraldo, 2018) En S10, S12: Piloto metodología de diagnóstico en convenio ICANH e INAH (Bateman et al, 2020)

2019: Formulación de mortero de inyección para superficies decoradas (Vernaza, 2019) y aplicación de dicho mortero en nicho del S12 (Bateman et al, 2020)

2019: Análisis geológico y geotécnico de hipogeos en el Alto de Segovia (Tenjo et al, 2019)

2020: Propuesta del sistema de documentación para abordar la conservación de hipogeos de Tierradentro (Bateman et al, 2020)

2023: Villalba y colaboradores integran una desinsectación mediada por productos y extractos naturales como extracto Ajo-ají y extracto de hojas de Tabaco aplicada en los bordes del hipogeo, además del uso de vela humidificadora desinfectante generadora de humo con principio activo de *Ortofenol* como producto bactericida, viricida y fungicida, posterior a estas aplicaciones se realizó el cerramiento de los hipogeos para contener los productos volátiles y asegurar una acción desinfectante. (Villalba, 2023)

2024: Plan estratégico de conservación que permite recopilar toda la información producida en las últimas dos décadas con relación al registro, documentación y conservación de los hipogeos, esculturas y colecciones del Parque Arqueológico de Tierradentro además de tener el diagnóstico hidráulico, estructural y de conservación de las superficies (Álvarez et al. 2024).

4.4 SOBRE LOS ESTADOS DE CONSERVACIÓN Y EL DIAGNÓSTICO DE LOS HIPOGEOS EN ESTUDIO

Como fue antes referido el estudio del estado de conservación de los hipogeos inició con la identificación en campo de los deterioros lo que implicó la inspección organoléptica de las superficies, la identificación de deterioros y alteraciones y su denominación y el correspondiente registro fotográfico.



Lo anterior llevó a hacer la revisión crítica y el ajuste terminológico del glosario de deterioros y alteraciones previamente desarrollado en el marco del convenio entre la Universidad Externado de Colombia y el Instituto Colombiano de Antropología e Historia- ICANH- (Bateman et al, 2019). Este si bien consideraba los deterioros del soporte pétreo independientemente de los del enlucido y capa pictórica no incluía descriptores normalizados para el deterioro y alteración de la piedra, asunto que fue incluido en este caso con la referencia del glosario ICOMOS Piedra (2011).

El glosario resultante considera los siguientes deterioros y alteraciones que se presentan por categoría:

Para el soporte pétreo:

Deterioros de la categoría grietas y deformaciones: fractura, grieta, fisura, disyunción en lajas.

Deterioros de la categoría pérdida de material: Faltante, galerías-orificios, erosión.

Deterioros de la categoría desprendimientos: desprendimiento, fragmentación, delaminación, descamación, disgregación.

Deterioros de la categoría alteración cromática (denominados en el estudio geológico como recubrimientos naturales): concreción salina, depósito blanco, manchas de óxido y ahumado, acumulación de tierra.

Deterioros de la categoría biocolonización: raíces.

Deterioros de la categoría fenómenos antrópicos: impacto.

Para el enlucido y la capa pictórica:

Deterioros de la categoría grietas y deformaciones: grieta, fisura, craqueladura.

Deterioros de la categoría pérdida de material: galerías-orificios, abrasiones, faltante.

Deterioros de la categoría desprendimientos: desprendimientos.

Deterioros de la categoría alteración cromática: mancha de óxido, acumulación de tierra, concreción amarilla, concreción salina, mancha de resina.

Deterioros de la categoría biocolonización: Nido o celda de insecto, microorganismos, y residuos de insectos.

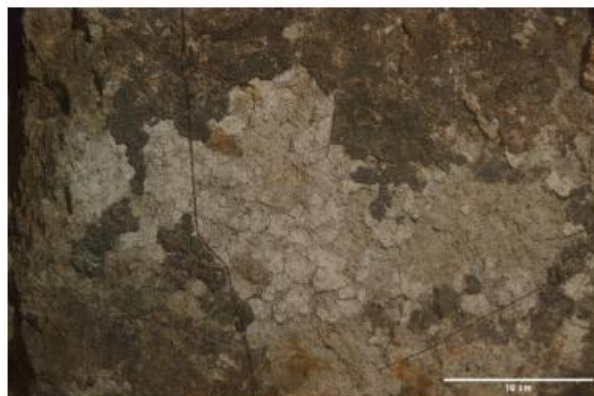
Deterioros de la categoría fenómenos antrópicos: impacto, rayones, grafiti.

Dicho glosario, ilustra el apartado del estado de conservación de los Expedientes de documentación de los hipogeos S5, S10, S11, S12, S21, SA1, SA8, A36, A41, A13 y A14, anexos a este informe, y

presenta tanto descripciones técnicas estandarizadas de los deterioros como su registro fotográfico como se ve en la siguiente imagen:

e. Craqueladura

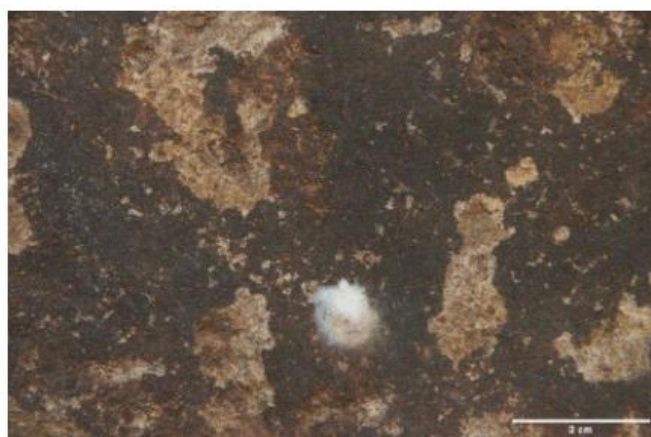
Aparición de una red de grietas en la superficie del enlucido y/o capa pictórica asociados a cambios de temperatura y humedad relativa o a la misma técnica y materiales utilizados en su elaboración.



PAT_25_10_01_S11_PL6_0001_M1

f. Microorganismos

Concentración de micro-fibras delgadas con apariencia blanquecina, normalmente asociada a microorganismos. En el S11 es posible apreciar un punto de mayor concentración de microfibras blancas, específicamente de un hongo.



PAT_25_09_27_S11_B3_0001_M1

Ilustración 9. Ejemplo de glosario visual del estado de conservación del hipogeo S11. Fuente: proyecto FIAN 2025-2026.

Posteriormente, en campo sobre hojas de acetato que cubren las fotos ortonormadas obtenidas del levantamiento fotogramétrico de los hipogeos se llevó a cabo el levantamiento detallado de las afectaciones identificadas en cada una de las estructuras. La captura de la información se hizo con bolígrafos de diferentes colores siguiendo las convenciones previamente definidas por el equipo de trabajo. Esta información gráfica levantada en campo mediante el uso de soportes en acetato fue procesada posteriormente utilizando la herramienta especializada MetigoMAP, herramienta que facilita la digitalización precisa del levantamiento realizado en sitio.

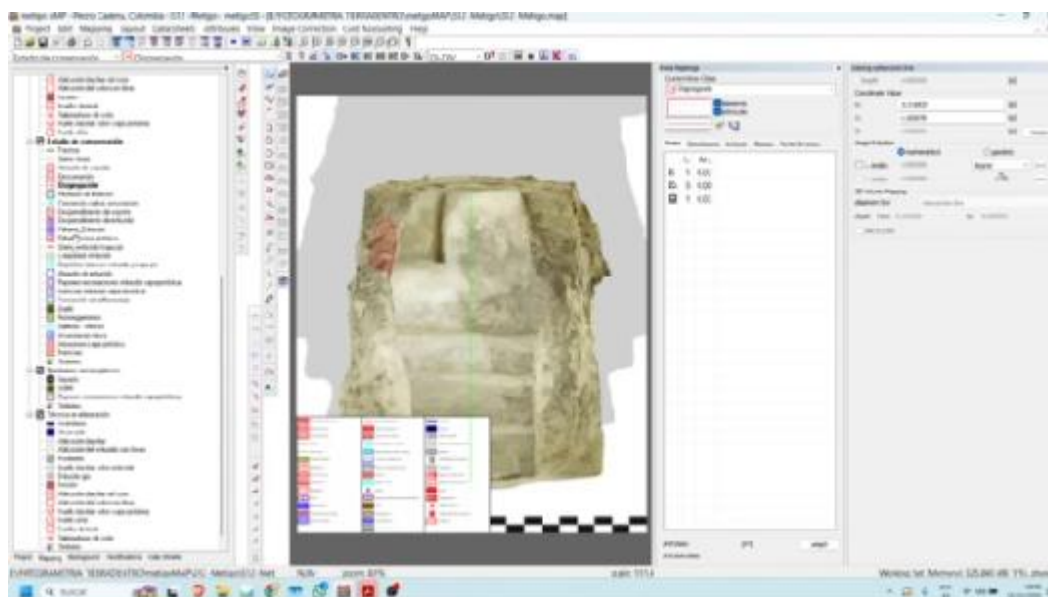
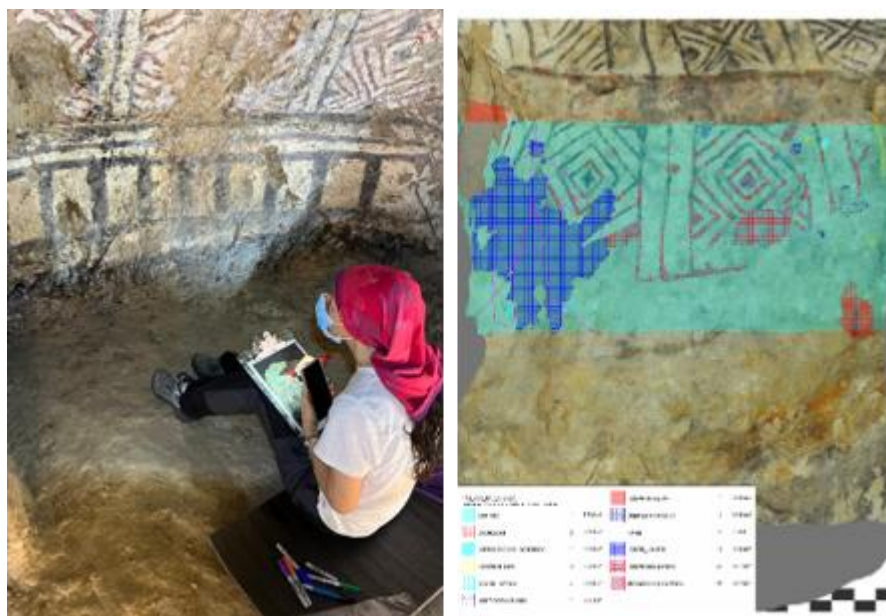


Ilustración 10. Proceso y resultado del levantamiento de deterioros para hipogeo S11. Fuente: proyecto FIAN 2025-2026



La siguiente tabla sintetiza los hallazgos del diagnóstico de los hipogeos estudiados en cuanto a la relación entre indicadores y factores, desglosa las causas y establece las prioridades de intervención y monitoreo al evaluar si se trata de deterioros que implican la pérdida de volúmenes y que deben atenderse de manera prioritaria pues acarrearán la pérdida de información, o si se trata de deterioros que ocurren más a nivel superficial y afectan valores estéticos pero no ponen en riesgo la estabilidad de las formas.

Componente	Indicadores de deterioro	Factor (causa)	Mecanismo	Estado	Prioridad intervención
Condiciones estructurales	Grietas, diaclasas fragmentación, desprendimientos y faltantes de gran tamaño en pilastras y columnas	Intrínsecos (Fenómenos geológicos asociados a discontinuidades del macizo rocoso, proceso de talla original, excavación)	Diaclasas en cuña que generan zonas de mayor susceptibilidad o redistribución de cargas que ocasionan faltantes y fragmentación	Activo en zonas muy puntuales,	Urgente (Grado I)
Soporte (toba volcánica)	Disgregación y descamación del material	Extrínsecos (ambientales) e Intrínsecos	Expansión de arcillas, Procesos de arrastre e hidratación del vidrio volcánico	Activo	Prioritaria (Grado II)
Enlucido y capa pictórica	Craqueladura, abrasiones	Intrínsecos (presencia de yeso y componentes orgánicos degradados; soporte reseca) Extrínsecos (filtraciones, impacto)	Retracción por naturaleza de materiales, falta de humedad en el soporte o el enlucido, disolución y arrastre	Alta (si el craquelado está asociado a desprendimiento del enlucido)	Urgente (Grado I)
	Desprendimientos y faltantes generalizados	Extrínsecos (variaciones higrotérmicas; Filtración de humedad, Crecimiento de raíces, galerías de insectos)	Falta de adhesión entre roca y enlucido, fuerzas físicas	Alta	Prioritaria (Grado II)
	Rayones, grafiti, Depósitos blancos y de tierra, manchas de humo u óxido	Extrínsecos (vandalismo, variaciones higrotérmicas; Filtración de humedad, sales biocolonización) Intrínseco	Depósito, fuerza física Cristalización y depósito, arrastre	Media	Moderada (Grado III)
Capa pictórica	Faltantes, pérdida de saturación cromática	Extrínsecos (escorrentías, fluctuaciones de HR) Intrínsecos (Técnica al seco aplicado en áreas)	Alteración de aglutinantes. Pérdida de humedad en la capa pictórica, falta de adhesión al enlucido	Media - Alta	Prioritaria (Grado II)

		sin aglutinantes)			
Factores biológicos	Actividad de animales (galerías, nidos, residuos, excrementos), microorganismos y raíces	Luz, nutrientes, condiciones adecuadas de HR y temperatura	Depósito, fuerzas físicas, reacciones químicas por productos metabólicos	Activo	Urgente (Grado I)

*Tabla 1. Tabla sobre componentes del hipogeos y su deterioro. Relación indicador, factor, mecanismo, prioridad de intervención. **Grado I (Urgente):** riesgo estructural o pérdida irreversible a corto plazo.*

***Grado II (Prioritaria):** deterioros activos que amenazan la estabilidad material o el equilibrio microambiental.*

***Grado III (Moderada):** deterioros secundarios o pasivos, controlables mediante monitoreo preventivo.*

Las anotaciones y observaciones hechas a lo largo de este proyecto permiten confirmar que los hipogeos se ven afectados por variaciones mínimas de las condiciones medioambientales, donde la temperatura y la humedad influyen en la condición y estabilidad del material rocoso y la pintura mural, estas también favorecen el crecimiento de vegetación, organismos y microorganismos los cuales contribuyen con la meteorización del soporte. Se destaca que el clima que condiciona el comportamiento de los hipogeos es tropical de alta montaña característico de la región andina, normalmente sujeto a precipitaciones de 1000 - 2000 mm de forma bimodal, siendo abril a mayo y octubre a noviembre periodos de lluvias (Jiménez, 2004; Villalba, 2010), sin embargo que presenta hoy en día regímenes cambiantes que responden al cambio climático y a las variaciones que pueden darse por la presencia de personas (visitantes o trabajadores) en su interior.

5. ESTUDIO GEOLÓGICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de caracterizar la roca soporte de los hipogeos de Tierradentro y sus procesos de deterioro y alteración y comprender mejor la materialidad usada en la pintura mural y presente en los deterioros fue usada la petrografía y espectroscopía Raman. Dichas técnicas analíticas arrojan información que permite determinar las características texturales y composicionales de la roca soporte, además, evaluar el grado de alteración de la roca y comprender los procesos que la ocasionan. En muestras que incluyen capas de enlucido y/o película pictórica, con dichos análisis se pueden inferir aspectos tecnológicos asociados a su elaboración, lo que aporta criterios técnicos para su conservación e intervención.

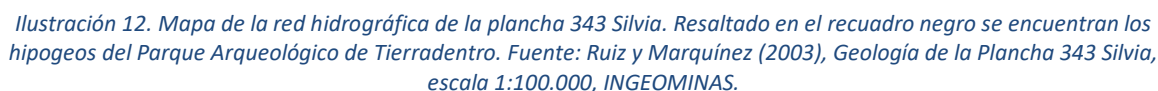
Características geomorfológicas del área y otros aspectos geológicos.

García Núñez y Castro Guerra (2018) señalan que la microcuenca de la quebrada San Andrés donde se encuentra el Parque arqueológico de Tierradentro, 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 Inzá 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).

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.



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 (Ilustración 13). Está compuesto por rocas volcanoclásticas del neógeno y suprayace rocas de edades Cretácica (Formación Coquiyú) y paleozoica (Complejo Cajamarca).

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.

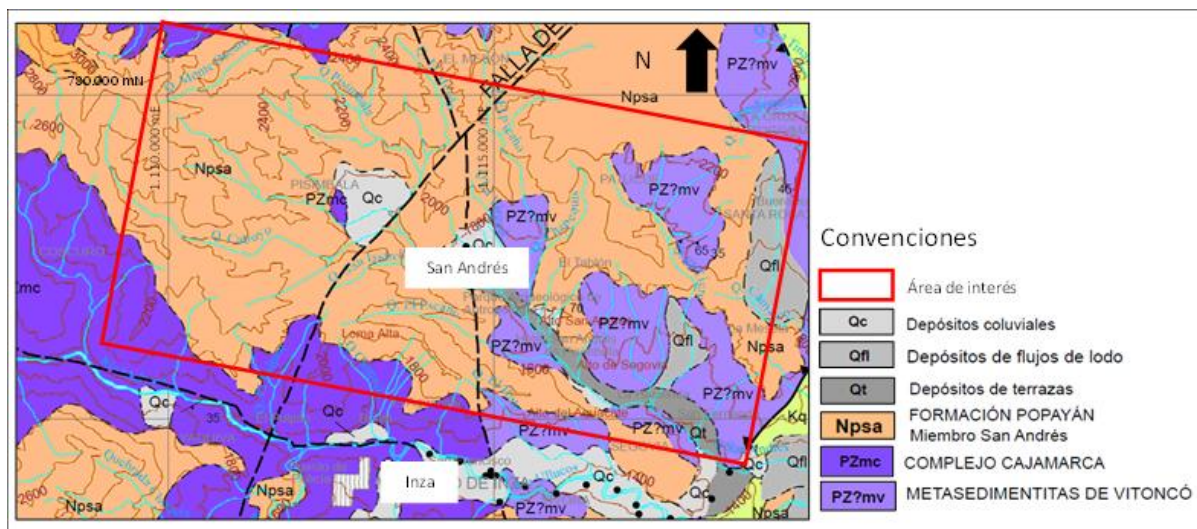


Ilustración 13. Mapa geológico del área de interés, localizada en los alrededores de San Andrés de Pisimbalá. Fuente: Ruiz y Marquínez (2002), *Geología de la Plancha 343 Silvia*, escala 1:100.000, INGEOMINAS (versión digital 2009). Base cartográfica IGAC.

5.2 METODOLOGÍA

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 $\times$, 50 $\times$ y 100 $\times$, y con láseres de 532 nm, 638 nm y 785 nm en los laboratorios de la Universidad de los Andes. El sistema presenta un rango de desplazamiento Raman entre 50 y 4000 cm^{-1} .

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 pintura mural. La última, puede estar constituida por capas de enlucido o por capas de enlucido suprayacidas por capas pictóricas o 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 estratos constitutivos de la pintura mural, 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 (Tabla 2).

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	San Andrés	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			Roca con enlucido	Nicho 2-Pared A
13	M13-SA1			Roca con enlucido y costra	Nicho 2-Pared D
14	M14-SA8	Deterioro		Roca con capa negra (delgada)	Pared bóveda
15	M15-SA8			Roca sin recubrimientos	Pared entrada
16	M16-SA1	Caracterización		Roca sin recubrimientos	Pilastra 2

Tabla 2. Muestras colectadas de hipogeos de Tierradentro para realizar análisis científicos.

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 recubrimientos naturales o de pintura mural, 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 capas de enlucido, 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.

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 usaron 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).

5.3 RESULTADOS

Características petrográficas generales

Las muestras escogidas para realizar la arqueometría provienen de hipogeos de dos de los altos del Parque arqueológico de Tierradentro: Segovia y San Andrés (Ver Anexo 3. Análisis geológicos). 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 (Ilustración 14), 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 (Ilustración 15) que varían desde frescas hasta incipientemente devitrificadas o hidratadas.

Características de la matriz en las muestras del Alto de Segovia

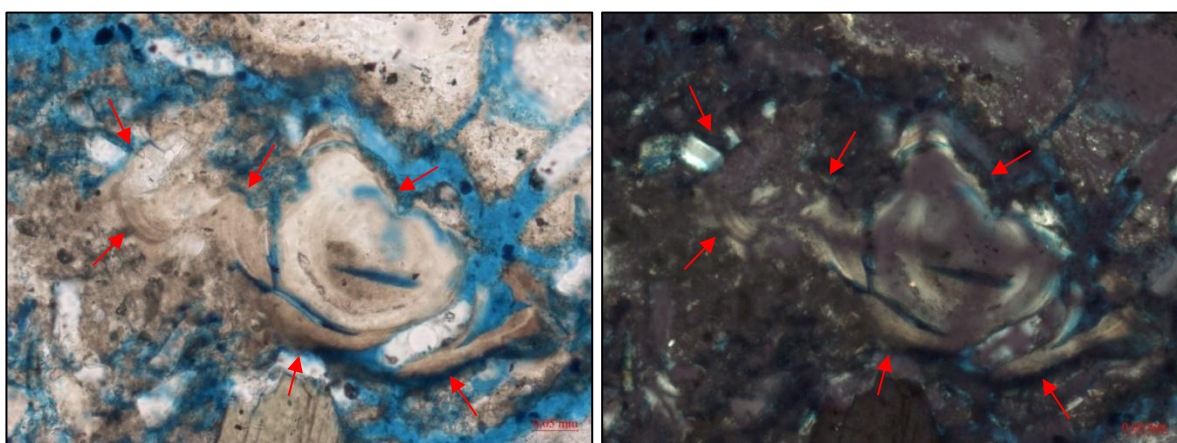


Ilustración 14. Muestra 2 (M2-S10). Detalle de arcilla secundaria dispuesta en la forma de recubrimientos concéntricos (clay cutans), ocluyendo grietas y oquedades en las muestras del Alto de Segovia. Izquierda nicoles paralelos. Derecha nicoles cruzados. Longitud de las fotografías 0.62 mm.

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

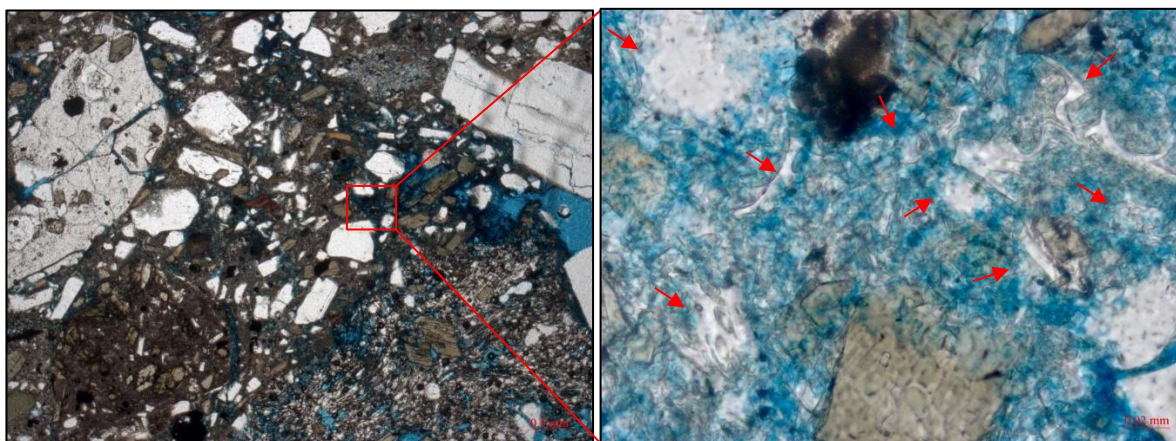


Ilustración 15. Muestra 16 (M16-SA1). Matriz formada por partículas frescas de vidrio volcánico (señaladas por flechas rojas), predominante en las muestras del Alto de San Andrés. Nícoles paralelos. Longitud de la fotografía izquierda: 5.2mm. Longitud de la fotografía derecha: 0.32 mm.

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.

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

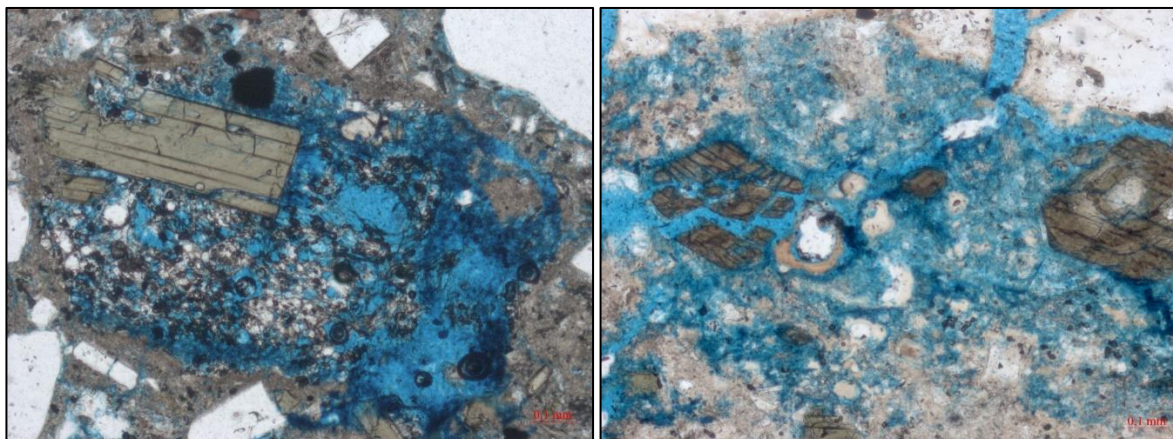


Ilustración 16. Izquierda: detalle de fragmento de pumita parcialmente disuelto (M16-SA1). Derecha: zonas azules en la matriz generadas por disolución (M2-S10). Nícoles paralelos. Longitud de las fotos: 1.3mm.

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 naturaleza amorfa y metastable, es propenso a adsorber agua, hidratándose y debilitando progresivamente 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 (Ilustración 17).

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 (Ilustración 17). 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 (Ilustración 18). 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 una matriz-soportado. En una fábrica flotante, la resistencia NO la otorga el contacto grano-grano, sino la matriz (Ilustración 19).

Apariencia de la matriz parcialmente transformada en minerales de arcilla

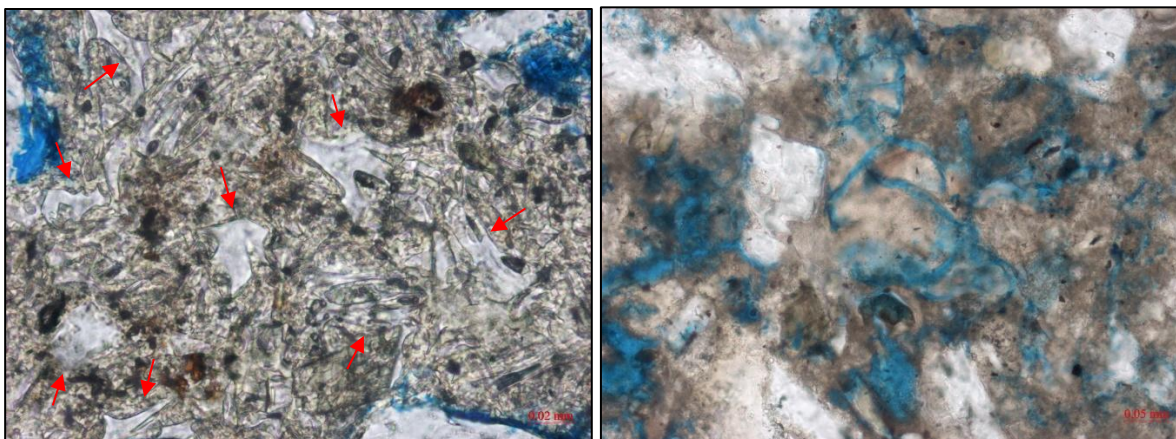


Ilustración 17. Izquierda: observe matriz constituida por partículas de vidrio volcánico (señalada por flechas rojas), embebidas en una masa de minerales de arcilla (M5-S12). Derecha: detalle de arcilla intersticial agrietada debido a expansión-contracción generada por hidratación-deshidratación (M1-S10). Nícoles paralelos. Longitud de la fotografía izquierda: 0.31 mm. Longitud de la fotografía derecha 0.62 mm.

Desarrollo de arcilla secundaria (clay cutans)

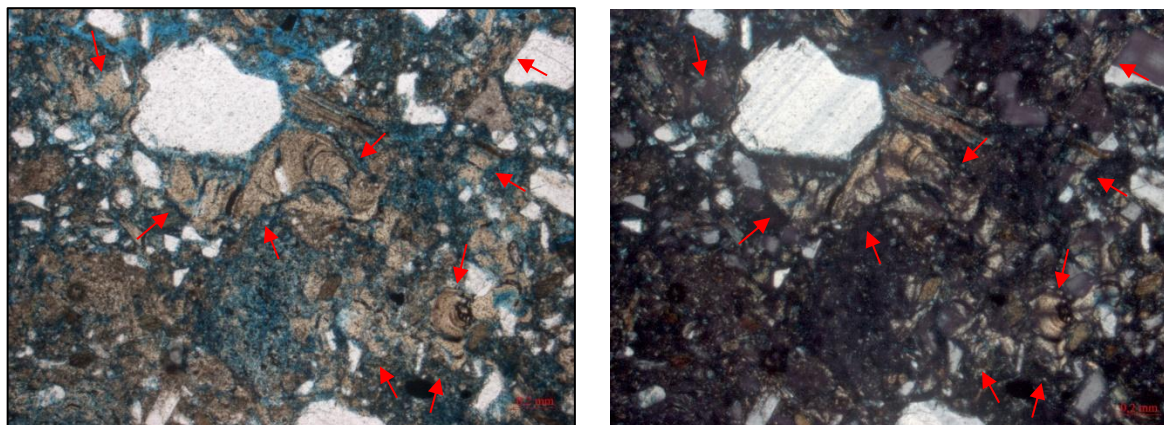


Ilustración 18. Muestra 6 (M6-S21). Ejemplo de arcilla secundaria, dispuesta como recubrimientos concéntricos (flechas rojas) producidos por infiltración de fluidos desde el horizonte de suelo suprayacente. Izquierda nı́coles paralelos. Derecha nı́coles cruzados. Longitud de las fotografías 2.5 mm.

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 deposición 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

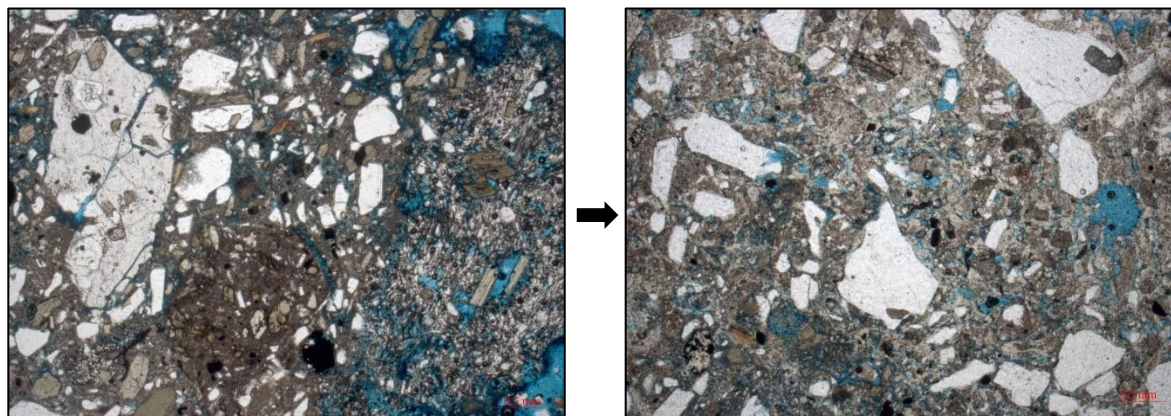


Ilustración 19. Ejemplo comparativo entre dos rocas de hipogeos con grado de alteración diferente. Observe en la foto izquierda (M16-SA1), como los granos aparecen dispuestos en un arreglo clasto-soportado a matriz-soportado. Note en la foto derecha (M5-S12), como los fragmentos se encuentran completamente diseminados flotando en el material intersticial, que corresponde netamente a arcilla secundaria. Nícoles 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 avanzada 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.

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 3 y 4).

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. - Iluviación 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 3. 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 4. Esquema jerárquico de los procesos de alteración y deterioro reconocidos en las rocas de los hipogeos de Tierradentro.

Resultados de los análisis científicos aplicados a la pintura mural y a recubrimientos de origen natural

A continuación, se presentan los resultados integrados de las técnicas analíticas empleadas (petrografía y espectroscopía Raman) en el estudio de la pintura mural y de los recubrimientos de origen natural identificados en la mayoría de las muestras procedentes de los hipogeos de Tierradentro (Tabla 5). Los resultados completos pueden consultarse en el Anexo 31-Petrografía y el Anexo 32-Espectroscopía Raman.

Muestra	Código	Composición y otras características
1	M1-S10	Capa blanca de enlucido: principalmente caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular / minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas) / matriz estratificada. 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: principalmente caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular / minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas). Capa pictórica: minerales de arcilla teñidos con óxido de hierro amorfo e hidratado (limonita).
	M3B-S12	Capa blanca de enlucido: principalmente caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular / minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas) / matriz con evidencias de amasado.
4	M4-S12	Capa blanca de enlucido: principalmente caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular / minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas) / matriz estratificada y con evidencias de homogenización incompleta. 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: principalmente caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular / minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas).
13	M13-SA1	Capa 1 de enlucido de color crema: principalmente arcilla tipo esmectita o halloysita / remanentes de rocas volcánicas (tobas). Capa 2 de enlucido de color blanco a crema: principalmente caolinita / ocasionales cristales de caolinita con hábito tabular vermicular. Recubrimiento: óxido de hierro variedad hematita, mezclado con eventuales micas finas o minerales de arcilla.
14	M14-SA8	Capa blanca (a crema) de enlucido: caolinita / arcilla tipo esmectita o halloysita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular. Capa pictórica: fragmentos de rocas metamórficas con carbono grafitizado o grafito pobremente cristalino / arcilla tipo esmectita o halloysita / caolinita / cristales de caolinita con hábito tabular vermicular.

Tabla 5. Resultados de los análisis científicos (petrografía y espectroscopía Raman) aplicados a la pintura mural y a recubrimientos de origen natural.

Consideraciones sobre los recubrimientos naturales

Todos los recubrimientos naturales identificados están relacionados al proceso pedogenético de iluviación detectado 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.

Consideraciones sobre la pintura mural

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

1. Las características microscópicas de la pintura mural analizada en los distintos hipogeos sugieren el uso de una técnica constructiva semejante y una posible procedencia común de las materias primas, aparentemente de origen local.
2. Las capas de enlucido blanco probablemente tuvieron una función estética y están constituidas al menos por: (1) caolinita, (2) cristales de caolinita con hábito tabular vermicular, (3) minerales de arcilla con características de esmectita o halloysita y (4) remanentes volcanoclásticos derivados de tobas no soldadas, tales como fragmentos de plagioclasa, piedra pómez y biotita.
3. Las capas de enlucido con predominio de minerales de arcilla tipo esmectita o halloysita, de tonalidad crema o beige, posiblemente fueron utilizadas para la regularización o nivelación de superficies.
4. De la técnica constructiva de los enlucidos blancos, se deduce que los fabricantes identificaron y explotaron directamente un material natural con propiedades adecuadas para su aplicación sobre la roca soporte. Este material, rico en caolinita, es el producto de la alteración masiva de tobas no soldadas, en ambientes tropicales con eficiente circulación de fluidos y alta acidez, debido a la presencia de materia orgánica. Bajo estas condiciones se pueden producir cristales de caolinita con hábito tabular vermicular, heredado de cristales precursores de plagioclasa (Zhang et al., 2023).
5. 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.
6. Aunque el número de muestras analizadas es limitado y no necesariamente representativo, la comparación entre ejemplares de pintura mural procedentes de 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, un único nivel

de enlucido. En San Andrés, si bien la mayoría de las muestras analizadas también presentan un solo nivel, en uno de los casos se observan dos estratos superpuestos (M13-SA1). El estrato basal exhibe mayor contenido de arcilla tipo esmectita o halloysita y un carácter más granular, lo que sugiere una función de relleno y regularización superficial, mientras que el superior es relativamente más rico en caolinita y presenta menor contenido de fracción volcánoclastica. Cuando solo se identifica una capa en las muestras de San Andrés, esta tiende a exhibir características similares a las descritas para la capa superior de la muestra 13. Adicionalmente, se reconocen diferencias en la composición del pigmento negro: en Segovia está asociado a materia orgánica carbonizada, mientras que en San Andrés corresponde a grafito.

Consideraciones sobre la procedencia de las materias primas de la pintura mural

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 caolinita como matriz y como cristales con hábito tabular vermicular, así como otras variedades de minerales de arcilla y remanentes de tobas, se propone como posible fuente la Formación Popayán, de carácter volcánoclastico y de edad plioceno-pleistoceno (Figura 20).

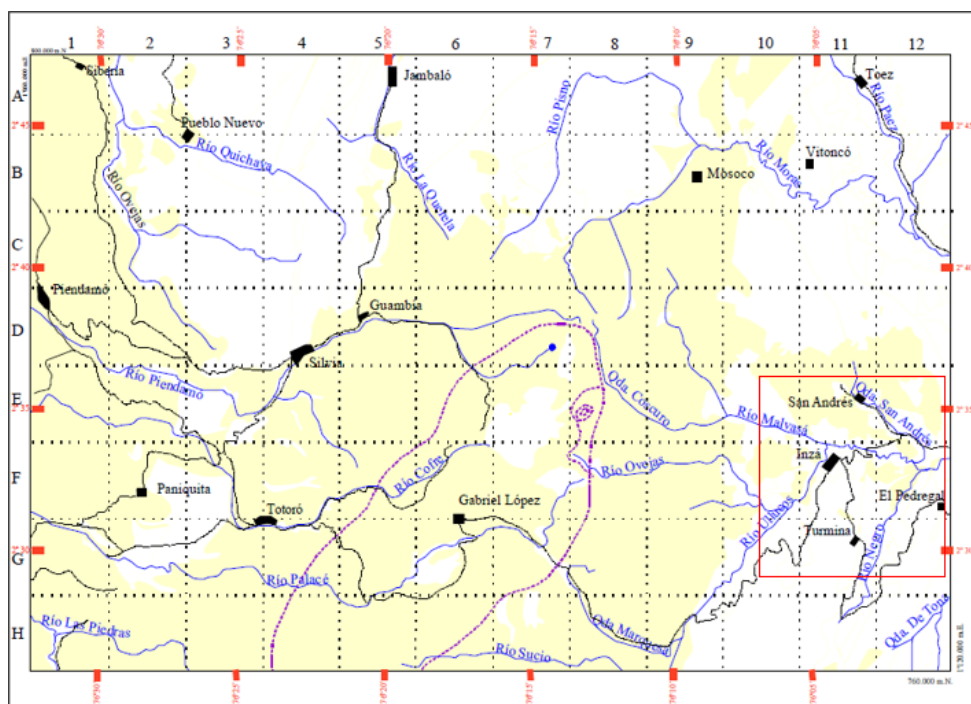


Ilustración 20. Mapa geológico del sector de los hipogeos (recuadro rojo) y zonas aledañas, en el que se resalta con color amarillo la Formación Popayán. Fuente: Ruiz y Marquinez (2003), Geología de la Plancha 343 Silvia, escala 1:100.000, INGEOMINAS.

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**

[illegible]

5.4 CONCLUSIONES

- 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.

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.

Respecto de la pintura mural

- La pintura mural analizada apunta al 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 tipo esmectita o halloysita podría haber sido utilizada para la regularización de superficies, mientras que la arcilla caolinítica habría desempeñado un papel netamente estético.
- Respecto de la tecnología de manufactura, la evidencia petrográfica sugiere que los fabricantes aprovecharon directamente un material volcánico alterado, derivado de la meteorización de una toba no soldada. Las características de la matriz y de las inclusiones indican que dicho material poseía propiedades adecuadas para su utilización como materia

prima, requiriendo únicamente procesos de trituración, humectación y amasado previos a su aplicación sobre la roca soporte.

- 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 la pintura mural de los Altos de Segovia y de 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.

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.
-

Respecto de la procedencia de materiales

- La selección de materias primas para la elaboración de enlucidos y capas pictóricas, sugiere un patrón de aprovisionamiento local.
- La composición mineralógica de los enlucidos apunta a que la materia prima empleada fue obtenida a partir de depósitos volcanoclásticos alterados. En este contexto, la Formación Popayán constituye una fuente compatible, dado que sus materiales presentan características mineralógicas y litológicas acordes con las observadas en los enlucidos analizados.
- 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. ANÁLISIS DE SALES

6.1 INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de determinar la naturaleza de los depósitos blancos presentes en los hipogeos del Alto de Segovia, trabajados en el marco del proyecto Tierradentro FIAN 2025-2026 y si estos correspondían a eflorescencias salinas, se tomaron muestras representativas para su análisis químico y se realizó en el Laboratorio (LIPAC) de la Universidad Externado de Colombia la marcha analítica para identificar aniones.



Depósito blanco hipogeo
S11

Depósito blanco hipogeo
S12

Depósito blanco hipogeo
S21

Ilustración 22. Depósitos blancos presentes en los hipogeos S11, S12 y S21 del Alto de Segovia.

Este estudio consiste en un procedimiento técnico y sistemático de análisis cualitativos para la identificación de iones negativos en material inorgánico mediante una serie ordenada de pruebas químicas. De esta manera, se agregan reactivos específicos para observar reacciones características, como precipitados, cambios de color y generación de gases, entre otros, que permiten distinguir las sales.

6.2 METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para desarrollar la marcha consistió en tomar muestras en los hipogeos a analizar mediante pequeños raspados superficiales en las zonas con depósitos blancos visibles en la superficie. Estas muestras fueron almacenadas en bolsas resellables y transportadas a Bogotá para su análisis en laboratorio; esta decisión se tomó teniendo en cuenta los resultados inconclusos de las pruebas de análisis con tirillas reactivas para la detección de sales realizadas in situ.

Para estas muestras se siguió la siguiente marcha y se realizaron las pruebas el día 14 de abril de 2026 en el Laboratorio Interdisciplinar del Patrimonio Cultural (LIPAC) de la Universidad Externado de Colombia.



Ya con las muestras en el laboratorio, se disolvió una pequeña fracción en un tubo de ensayo con agua desionizada. Para la parte soluble, la solución resultante se divide en pequeñas cantidades para realizar la prueba específica con cada uno de los reactivos. En el caso de muestras insolubles, se divide la muestra en tubos de ensayo con agua desionizada y se realizan las pruebas específicas con los reactivos correspondientes.

Este proceso se repitió con cada una de las seis muestras tomadas, dos por hipogeo seleccionado. Dando resultados similares en cada uno de los procesos que se expondrán a continuación.

6.3 RESULTADOS

Hipogeo S11

Se tomaron dos muestras que arrojaron los siguientes resultados:

Muestra PL5		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Positivo	Precipitado rosado

Muestra PL5		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

En esta primera muestra, tomada en una pilastra del hipogeo el análisis arroja como resultado solo un precipitado rosado de nitratos solubles. Los otros procedimientos no mostraron ninguna reacción correspondiente a la presencia de otro tipo de sales solubles o insolubles.

Muestra N4		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Negativo	Reacción incolora

Muestra N4		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

La segunda muestra de este hipogeo resultó inconclusa. Ya que la muestra no reaccionó con ninguno de los reactivos, tanto con los correspondientes a sales solubles como con los de sales insolubles.

Hipogeo S12

Se tomaron dos muestras que arrojaron los siguientes resultados:

Muestra PL3		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Positivo	Precipitado rosado

Muestra PL3		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

Muestra N6B abajo		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora

Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Positivo	Precipitado rosado

Muestra N6B abajo		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

En el caso de este hipogeo, ambas muestras dieron un resultado positivo para la presencia de nitratos, con precipitados de coloración rosada. Igualmente, no se identificó ninguna sal insoluble presente dentro de las muestras tomadas.

Hipogeo S21

Se tomaron dos muestras que arrojaron los siguientes resultados:

Muestra Escalera		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Positivo	Precipitado rosado

Muestra Escalera		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

Esta primera muestra, tomada en la entrada del hipogeo, en la zona de las escaleras, da un resultado positivo para nitratos con la solución, que se torna rosada. Igualmente, no presenta ninguna reacción frente a sales insolubles.

Muestra Cámara		
Sales solubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Cloruros	Negativo	Reacción incolora
Nitritos	Negativo	Reacción incolora
Nitratos	Negativo	Reacción incolora

Muestra Cámara 5		
Sales Insolubles		
Tipo	Resultado	Descripción
Carbonatos	Negativo	Reacción incolora y sin burbujeo
Sulfatos	Negativo	Reacción incolora
Silicatos	Negativo	Reacción incolora

Esta segunda muestra, tomada en la zona de la cámara central del hipogeo, presenta resultados inconclusos, ya que no hubo reacción alguna de las muestras frente a las sales solubles ni a las insolubles.

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos evidenciaron la presencia exclusiva de nitratos. Este tipo de sales puede asociarse a procesos de humedad y a la posible incorporación de materia orgánica o de infiltraciones, factores que favorecen su formación y migración hacia la superficie del soporte.

Los nitratos son sales altamente solubles y con gran capacidad higroscópica; estas características favorecen procesos continuos de disolución y cristalización en función de las fluctuaciones de la humedad relativa. Esto puede generar tensiones en el material pétreo y en las capas de la pintura mural, provocando deterioros como desprendimientos y disgregación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se relacionan estos resultados con las características del Alto de Segovia, donde los cobertizos se encuentran rodeados de pasto, zonas con estancamiento de agua y se presentan fluctuaciones frecuentes de las condiciones microclimáticas dentro de los hipogeos, así como la presencia de actividad biológica.

En el caso específico de los hipogeos estudiados, el hipogeo S21 presenta un faltante significativo de soporte que facilita la infiltración de agua al hipogeo, lo que propicia el crecimiento de material orgánico, como raíces sobre las paredes de toba volcánica. Adicionalmente, se observa un recubrimiento generalizado de una capa de tierra arcillosa en estado de humedad constante.

Por su parte, el hipogeo S11 también presenta crecimiento de raíces y un recubrimiento arcilloso generalizado en el soporte. Esta situación se ve complementada por la presencia de la geomembrana que comparten con el hipogeo S12, la cual favorece fluctuaciones, principalmente en la humedad relativa de ambos hipogeos.

Por otro lado, las pruebas que no presentaron reacción alguna durante la marcha analítica se consideran resultados no concluyentes, lo cual puede estar asociado a diversos factores. Entre ellos se incluyen la baja concentración de sales en las muestras tomadas, la alta solubilidad de compuestos como los nitratos, que se mantienen constantes en los resultados, o la presencia de materiales no salinos como arcillas, partículas del sustrato o depósitos ambientales. De igual manera, la complejidad de la matriz propia de contextos arqueológicos y las posibles limitaciones en la disolución de las muestras pueden haber afectado la detección de aniones mediante los procedimientos cualitativos aplicados.

7. ESTUDIO ESTRUCTURAL

7.1 INTRODUCCIÓN

El municipio de Inzá se localiza en una región caracterizada por intensa actividad volcánica y fuertes movimientos tectónicos asociados a la Cordillera Central y al departamento del Cauca, lo que ha dado origen a un relieve heterogéneo que influye en las variaciones climáticas y de vegetación. Geológicamente, el municipio presenta rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, con edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. En este contexto, la estabilidad de los hipogeos está condicionada por factores como las discontinuidades (diaclasas y fracturas), los procesos de meteorización, la interacción agua-roca y los cambios en el estado de esfuerzos generados por su excavación, aspectos que han favorecido diferentes niveles de deterioro estructural en estas construcciones.

La región de Tierradentro, que comprende los municipios de Belalcázar e Inzá en el nororiente del departamento del Cauca, está localizada en la vertiente oriental de la Cordillera Central y pertenece a la hoya hidrográfica del río Magdalena, con los ríos Páez y Ullucos y la quebrada San Andrés. El Parque Arqueológico de Tierradentro, cuyos hipogeos datan de los siglos VI a X, se localiza en la cuenca de la quebrada San Andrés, en el resguardo indígena de San Andrés de Pisimbalá. Estas condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas influyen directamente en el comportamiento geotécnico de las estructuras subterráneas presentes en la zona.

El presente capítulo tiene como objetivo evaluar el estado geotécnico y estructural de un conjunto representativo de hipogeos (S10, S11, S12, S21 y SA1), identificar los principales mecanismos de inestabilidad y formular recomendaciones de intervención orientadas a su conservación. Para ello, se integran observaciones de campo, caracterización de discontinuidades, análisis de propiedades mecánicas de la roca y revisión de intervenciones previas, con el fin de establecer criterios técnicos que permitan mitigar los riesgos estructurales y preservar este patrimonio arqueológico.

7.2 METODOLOGÍA

Para realizar el diagnóstico estructural de los hipogeos con riesgos estructurales, se implementó un enfoque integral que combina recopilación de información secundaria, inspección de campo, caracterización geotécnica del macizo rocoso (Plan Estratégico de Conservación de Tierradentro, noviembre de 2024) y evaluación estructural de los hipogeos analizados. La metodología aplicada se describe a continuación:

Recopilación, análisis e interpretación de información existente.

Con la información recopilada, se logró establecer el contexto geológico, las propiedades del macizo rocoso y los antecedentes de intervención. Entre los documentos consultados, se destacan:

- Estudios geológicos y geotécnicos previos del área de Tierradentro.
- Plan de Manejo del Parque Arqueológico de Tierradentro (Fundación Alma, 2014).

- Análisis Geológico y Geotécnico de los hipogeos del Alto de Segovia en el Parque Arqueológico de Tierradentro (Ricardo Tenjo Sarmiento, Milton Alfonso Santos Santos, Dr. Thomas Cramer). Diciembre de 2019.
- Plan Estratégico de Conservación de Tierradentro (María Paula Álvarez, Patricia Ramírez, Sofía Sabogal, Alejandra Buitrago, Juan Dávila, Fernando Gómez, Natalia Jaramillo, Rubén García y Sara Moncada). Noviembre de 2024.

Reconocimiento e inspección de campo.

Se efectuaron visitas técnicas a los hipogeos objeto de estudio (S10, S11, S12, S21 y SA1), donde se desarrollaron las siguientes actividades: inspección visual detallada del estado estructural, identificación de patologías (fracturas, diaclasas, desprendimientos, humedad), evaluación de condiciones geométricas (bóvedas, columnas, pilastras y nichos), registro fotográfico y levantamiento de información cualitativa. Esta inspección permitió identificar zonas críticas y mecanismos de falla asociados.

Evaluación de propiedades mecánicas de la roca.

En 2019 se utilizaron resultados de ensayos de carga puntual (Point Load Test – PLT) para estimar la resistencia a la compresión simple de la roca, mediante correlaciones empíricas (Tenjo et al, 2019). Estos ensayos permitieron determinar el índice de resistencia I_s , estimar la resistencia a compresión simple (σ_c) y comparar la resistencia del material con la carga litostática actuante.

Caracterización geotécnica del macizo rocoso.

La caracterización, realizada en el año 2023 para el Plan Estratégico de Conservación de Tierradentro, se basó en la descripción de las discontinuidades del macizo rocoso, siguiendo criterios de la ISRM, considerando: orientación (rumbo y buzamiento), espaciado entre diaclasas, persistencia o continuidad, rugosidad de las superficies, abertura de las discontinuidades, condiciones de filtración. Adicionalmente, se analizaron factores condicionantes como: grado de meteorización, presencia de agua, interacción agua–roca y efectos de la excavación (descompresión del macizo).

Análisis estructural de los hipogeos.

Se evaluó el comportamiento estructural considerando geometría de las excavaciones (efecto arco en bóvedas), redistribución de esfuerzos por pérdida de material, interacción entre discontinuidades (formación de cuñas) y condiciones de carga (litostática y esfuerzos inducidos). Así las cosas, se identificaron los principales mecanismos de inestabilidad, tales como caída de bloques por gravedad, desprendimiento de cuñas y fallas localizadas en columnas y bóvedas.

Evaluación de intervenciones existentes.

Se revisaron las intervenciones realizadas previamente, incluyendo inyección de morteros, recuperación de secciones estructurales y sistemas de monitoreo (testigos en diaclasas). De igual manera, se analizó su efectividad en términos de estabilización estructural, control de infiltraciones y recuperación de capacidad resistente.

Formulación de diagnóstico y recomendaciones.

Con base en las reuniones de acompañamiento al proyecto para revisar el estado de los hipogeos, en la integración de la información recopilada, las apreciaciones in situ, se elaboró el diagnóstico geotécnico y estructural de cada hipogeo, estableciendo nivel de deterioro, condiciones de estabilidad y factores de riesgo. Finalmente, se plantearon recomendaciones orientadas a técnicas de conservación compatibles con el patrimonio, intervención estructural localizada, control de agua y monitoreo e instrumentación.

7.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA.

Todo tipo de diseño ingenieril en roca envuelve la determinación de las constantes elásticas y de las propiedades de resistencia de la roca. En resumen, se puede decir que la resistencia puede ser considerada como la fuerza por unidad de área, necesaria para causar la rotura en un determinado ambiente de condiciones dadas.

Además de la composición mineralógica, dureza de los minerales y durabilidad de la roca, existen otros factores que afectan las propiedades mecánicas de las rocas:

- Resistencia interna de las partículas minerales individuales.
- Orientación de los cristales y granos minerales con relación a la carga aplicada y subsecuente deformación lateral y deslizamiento.
- Defectos de las rocas (diaclasas, fracturas, grietas, poros).
- Grado de saturación.
- Tensiones in situ.

La resistencia de la roca puede determinarse tanto en especímenes de roca intacta en el laboratorio, como en ensayos in situ. Los testigos pueden proceder de sondeos o también de pedazos irregulares de roca.

Para la roca de los hipogeos de Tierradentro estos ensayos se realizaron en 2019 en laboratorio al aplicar el Ensayo de Carga Puntual PLT (Point load test) y obtener valores de IS sobre muestras tomadas en Segovia (Tenjo et al, 2019), los resultados se presentan más adelante.

Explicación de la técnica:

La máquina para la realización del ensayo de resistencia de carga puntual consiste en un equipo hidráulico portátil, con un bastidor de carga de gran rigidez y dos puntas cónicas fácilmente ajustables a las dimensiones de la pieza de roca a ensayar. El ensayo determina la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca o de testigos cilíndricos de sondeos, a partir del índice IS.

La resistencia a la compresión simple, bajo carga puntual, se calcula como $c=23 \cdot I_s$, donde I_s es el denominado Índice de Resistencia de Carga Puntual.

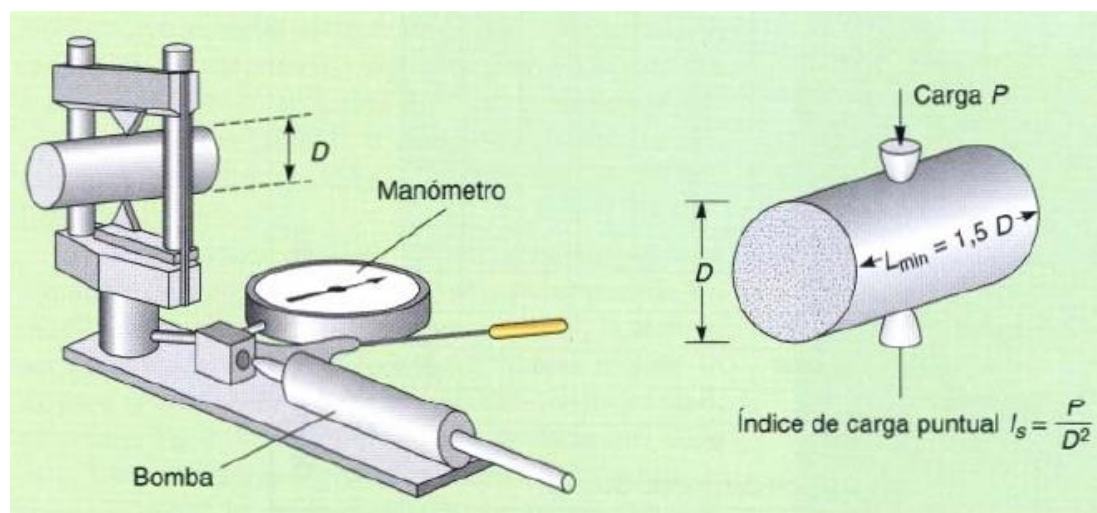


Ilustración 23. Explicación del ensayo de carga puntual.

Aplicación del ensayo:

De acuerdo con los resultados que se encuentran consignados en el informe “ANÁLISIS GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DE LOS HIPOGEOS DEL ALTO DE SEGOVIA EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIERRADENTRO” (Ricardo Tenjo Sarmiento, Milton Alfonso Santos Santos, Dr. Thomas Cramer. Diciembre de 2019), relacionados con la densidad del suelo y la roca, es posible estimar la carga litostática promedio que actúa en los hipogeos (en particular los del Alto de Segovia) y compararla con los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos a partir de los ensayos de carga puntual.

Material	Densidad promedio (T/m ³)	Cobertura promedio (m)	Carga litostática promedio (T/m ²)	I _s mínimo (T/m ²)	I _s máximo (T/m ²)	I _s promedio (T/m ²)
Roca	1,600	2,64	4,22	2,47	-	-
				-	14,06	-
				-	-	7,27
				σ _c mínimo (T/m ²)	σ _c máximo (T/m ²)	σ _c promedio (T/m ²)
				57	323	167
				σ _c mínimo (MPa)	σ _c máximo (MPa)	σ _c promedio (MPa)
				0,57	3,23	1,67

Tabla 6. Carga litostática promedio vs resistencia a la compresión simple.

En la Tabla 6 se observa que el valor promedio de la carga litostática que actúa en los hipogeos (4,22 T/m²), es inferior al valor promedio de la resistencia a la compresión simple (167 T/m²).

Al respecto, es importante recordar que una toba volcánica (debido a su naturaleza porosa, grado de cementación), puede presentar alta variabilidad en los valores de resistencia a la compresión simple (tan bajos como 20 T/m² ≈ 0,20 MPa); sin embargo, se advierte que dicho valor sigue siendo mayor que la carga litostática promedio.

De otra parte, un porcentaje importante de los hipogeos presentan un elemento constructivo tipo “arco”, de forma curvada, el cual se encarga de trasladar la carga litostática a los apoyos (nichos y pilastras laterales), en otras palabras, la carga la recibe el elemento “arco”.

7.4 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO.

Antes de profundizar en el comportamiento geotécnico de los hipogeos en estudio, es importante definir los términos “discontinuidades” y “diaclasas” utilizados en este apartado. Al respecto, se indica lo siguiente:

- **Discontinuidades:** son cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa de un macizo rocoso.
- **Tipos de discontinuidades:** *diaclasas*, planos de estratificación, fallas, zonas de corte, planos de exfoliación o esquistosidad, contactos litológicos, venillas, pliegues y diques.
- **Diaclasas:** son fracturas que no han tenido desplazamiento y son las que más comúnmente se presentan en la masa rocosa.

Origen de las fracturas en los hipogeos

Con el propósito de comprender mejor el comportamiento estructural de los hipogeos, a continuación, se indican las posibles causas que dieron origen a las fracturas:

- Interacción agua – roca. La infiltración del agua a través de los espacios intergranulares de la roca (porosidad primaria) y de las diaclasas y/o fracturas (porosidad secundaria), lubrica las discontinuidades, lava el material de relleno y permite que las piezas de roca se muevan o aflojen, ocasionando desprendimientos o grietas.



Ilustración 24. Proceso de infiltración del agua a través de las diaclasas.

- Descompresión de la roca por excavación de los hipogeos. La sustracción del material para la construcción de los espacios subterráneos produce un cambio en el estado de esfuerzos del material rocoso (descompresión), lo cual se manifiesta en fracturas sobre la roca.

En resumen, las diaclasas tienen un origen geológico (proceso de formación de la roca) o están asociadas a eventos tectónicos previos a la construcción de los hipogeos; las fracturas obedecen principalmente a la interacción agua-roca y la descompresión de la roca por efectos de la excavación de los hipogeos. Adicionalmente, la confluencia de diaclasas y fracturas facilitan desprendimientos de roca por la acción de la gravedad.

7.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS HIPOGEOS Y DIAGNÓSTICO

Hipogeo S12

Desde el punto de vista estructural, el hipogeo presenta un alto grado de deterioro y de disgregación (en particular a nivel de bóveda); lo anterior trae como consecuencia una redistribución de esfuerzos, fracturamiento en sitios localizados del hipogeo y desprendimiento de piezas en forma de cuñas.



Ilustración 25. Pérdida total de columna N°1



Ilustración 26. Pérdida de pieza en forma de cuña a nivel de bóveda

La inspección visual que se efectuó al interior del hipogeo S12, permitió caracterizar desde el punto de vista geotécnico, las diaclasas más representativas. A continuación, se presentan las propiedades de las diaclasas que se tuvieron en cuenta en el diagnóstico adelantado en 2023 (Álvarez et al, 2024):

PROPIEDAD	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
Orientación	Es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su rumbo y buzamiento.	Se registraron datos estructurales de siete (7) diaclasas.
Espaciado	Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes.	Separado (600 – 2000 mm) *
Continuidad o persistencia	Es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad.	Continuidad media (3 – 10 m) *
Rugosidad	Es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad.	Perfil de rugosidad tipo IV (ondulada rugosa) *
Abertura	Es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de apertura que ésta presenta.	Moderadamente ancha (2,5 – 10 mm) * Muy ancha (1 – 10 cm) *
Filtraciones	El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria).	Clase II (relleno húmedo en la diaclasa, pero sin agua libre) *

Tabla 7. Fuente ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Plan Estratégico de Conservación de Tierradentro (Álvarez et al, 2024).

En resumen, con respecto al comportamiento geotécnico del hipogeo S12, se indica lo siguiente:

- El hipogeo S12 se encuentra en estado significativo de deterioro, debido a pérdida de soporte estructural por el colapso de una columna y daños severos en la bóveda. La presencia de discontinuidades abiertas y húmedas favorece la inestabilidad de bloques. Los elementos remanentes muestran alta fragilidad, y la existencia de pintura mural exige especial cuidado en la intervención. Se requiere acción inmediata, incluyendo estabilización estructural a nivel de bóveda y monitoreo continuo.
- Es importante indicar que en el Alto de Segovia existen hipogeos cuyas dimensiones (geometría) son notablemente menores que las del hipogeo S12; esta afirmación permite explicar por qué hipogeos circunscritos a un mismo lugar no presentan el mismo nivel de deterioro o afectación, toda vez que, en la medida en que las excavaciones subterráneas sean cada vez mayores, los defectos del macizo rocoso (discontinuidades, diaclasas, fracturas, etc) quedarán más expuestos.
- Excavaciones en roca no meteorizada, con algunas discontinuidades (diaclasas), usualmente no están afectadas por problemas serios de estabilidad cuando los esfuerzos sobre la roca que rodea la excavación son menores que aproximadamente un quinto de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- La inspección visual del hipogeo S12, a nivel de bóveda, permitió identificar problemas avanzados de disgregación; al respecto, es importante indicar que la presencia de esta patología implica realizar la consolidación del material, de tal manera que las diaclasas y grietas se puedan unir utilizando la inyección de micromortero.

- Inicialmente, se tenía contemplado realizar la restitución total de la columna colapsada y reforzar la bóveda con mortero estructural; posteriormente, con base en una evaluación in situ interdisciplinaria, se determinó que no era necesario reconstruir la columna, toda vez que no representa un aporte estructural importante (recordar el efecto “arco”). De igual manera, la aplicación directa de capas de mortero estructural a nivel de bóveda puede convertirse en una condición desfavorable al generar una carga adicional que induce esfuerzos de tracción por gravedad.

Hipogeo S11

El hipogeo S11 presenta un estado de conservación alterado, con una condición desfavorable en su eje central, debido a la pérdida parcial de soporte en el elemento columna 1(sección transversal disminuida); al respecto, se recomienda realizar una intervención localizada que permita recuperar parcialmente la sección de la columna. El deterioro responde principalmente a la interacción entre la debilidad inherente de la toba volcánica y los efectos gravitacionales, lo que ha favorecido procesos activos de fracturamiento y desintegración del material. También es importante indicar que el hipogeo S11 presenta un menor número de diaclasas con respecto a hipogeos cercanos, cuenta con buena cobertura, la bóveda exhibe buenas condiciones y no se evidencia infiltración de agua.

La afectación estructural, concentrada en columnas y pilastras, reduce la capacidad de la estructura para distribuir adecuadamente las cargas, generando un escenario de vulnerabilidad progresiva, a pesar de que la bóveda aún se comporta como autoportante. La degradación no es estable, sino evolutiva, con mayor incidencia en las zonas medias y superiores de los soportes. Adicionalmente, la presencia de agentes biológicos y condiciones de humedad refuerzan los procesos de deterioro, afectando tanto la integridad física como la conservación superficial del hipogeo.

Hipogeo S10

En la comisión del mes de febrero, se verificó que, para evaluar el comportamiento de las diaclasas, se instalaron testigos de comportamiento frágil; al respecto, se evidencia que, desde el momento en que se colocaron los testigos, la abertura de las diaclasas no ha presentado cambios significativos.

Con base en la inspección visual realizada al interior del hipogeo, se recomienda, como medida preventiva, continuar con el monitoreo y la instrumentación de las diaclasas más visibles, que contienen relleno arcilloso. Así mismo, se recomienda adelantar una intervención localizada en la columna 2, para recuperar parcialmente su sección.



Ilustración 27. Testigos instalados en las diaclasas.

Hipogeo S21

Con base en la inspección visual del hipogeo S21, se estableció que las columnas 1 y 3 presentan desprendimientos. Así mismo, se aprecian raíces de diámetro considerable entre las diaclasas de la roca, que facilitan la infiltración y la caída de bloques. Entrando al hipogeo, hacia el costado derecho, es notable la presencia de agua subterránea producto de la infiltración, esta patología se debe controlar desde el exterior instalando drenes subhorizontales que permitan captar el agua y conducirla hasta un sitio geotécnicamente estable.

La presencia de agua subterránea producto de la infiltración, hacia el costado derecho del hipogeo, se debe controlar desde la ladera exterior, instalando drenes subhorizontales que permitan captar el agua y conducirla hasta un sitio geotécnicamente estable.

Hipogeo SA1

Con base en la inspección visual que se realizó al interior del hipogeo SA1, fue posible caracterizar desde el punto de vista geotécnico, las diaclasas más representativas. A continuación, se presentan las propiedades de las diaclasas que se tuvieron en cuenta en el diagnóstico:

PROPIEDAD	DEFINICIÓN	DESCRIPCIÓN
Orientación	Es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su rumbo y buzamiento.	Se registraron datos estructurales de nueve (9) diaclasas.
Espaciado	Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes.	Separado (600 – 2000 mm) *
Continuidad o persistencia	Es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad.	Baja continuidad (1 – 3 m) *

Rugosidad	Es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad.	Perfil de rugosidad tipo VII (plana rugosa) *
Abertura	Es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de apertura que ésta presenta.	Abierta (0,5 – 2,5 mm) *
Filtraciones	El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria).	Clase III (junta seca, pero con evidencia de haber circulado agua) *

Tabla 8. Fuente ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Fuente Plan Estratégico de Conservación de Tierradentro (2024).

En resumen, con respecto al comportamiento geotécnico del hipogeo SA1, se indica lo siguiente:

- Las diaclasas encontradas se deben comúnmente a procesos de enfriamiento y contracción de los depósitos volcánicos durante su formación (Davis, Reynolds, & Kluth, 2011).
- Las discontinuidades (diaclasas) condicionan de una manera definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico del macizo rocoso que conforma el hipogeo.
- El comportamiento mecánico de las discontinuidades (diaclasas) queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su defecto, por la del material de relleno.
- En términos generales, la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidad es muy baja o nula.
- La orientación de los esfuerzos que se ejercen sobre el macizo rocoso genera una anisotropía asociada al estado tensional.
- El proceso de excavación (retiro de material) realizado por los indígenas de la época, alteró el estado tensional del macizo rocoso, generando concentración de esfuerzos sobre los elementos estructurales de los hipogeos (columnas y pilastras).

Al respecto, es indiscutible el diagnóstico con respecto al alto grado de afectación estructural que presenta el hipogeo. Considerar una intervención de refuerzo desde la superficie, puede resultar en un desacierto, considerando la escasa cobertura que tiene, la recuperación del hipogeo debe enfocarse en el reforzamiento de las columnas centrales y la inyección de morteros que mejoren la adherencia e incrementen la resistencia del macizo rocoso.

7.6 CONCLUSIONES

- El elemento constructivo tipo arco, que tiene forma curvada, traslada la carga a los apoyos; en otras palabras, los hipogeos presentan un comportamiento estructural favorable debido a su geometría subterránea y al efecto tipo arco, que permite una adecuada redistribución de cargas hacia los apoyos laterales.
- A pesar de que la región donde se localiza el Parque Arqueológico de Tierradentro es sísmicamente activa (zona andina colombiana), los hipogeos han sobrevivido siglos de sismicidad. Los deterioros que se observan están más asociados a humedad, meteorización,

diaclasas abiertas, planos de debilidad, alteración superficial del macizo rocoso, y no a colapsos sísmicos generalizados.

- Desde una perspectiva geotécnica y sísmica, los hipogeos son intrínsecamente sismo-resistentes, debido a su excavación en roca, geometría compacta, comportamiento monolítico y confinamiento subterráneo.
- En términos generales, la carga litostática que actúa sobre los hipogeos es inferior a la resistencia a la compresión de la roca, lo que indica condiciones intrínsecas de estabilidad; sin embargo, las condiciones locales pueden generar inestabilidades puntuales.
- Los principales procesos de deterioro identificados corresponden a infiltración de agua, meteorización, pérdida de material de relleno en discontinuidades y descompresión del macizo rocoso producto de la excavación.
- Las discontinuidades (diaclasas) condicionan de una manera definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico del macizo rocoso que conforma el hipogeo.
- El proceso de excavación (retiro de material) realizado por los indígenas de la época, alteró el estado tensional del macizo rocoso, generando concentración de esfuerzos sobre los elementos estructurales de los hipogeos (columnas y pilastras).
- En términos generales, en la medida en que las excavaciones subterráneas sean cada vez mayores, los defectos del macizo rocoso (discontinuidades, diaclasas, fracturas, etc.) quedarán más expuestos. Con base en esta afirmación, es posible explicar los diferentes niveles de deterioro que se presentan en los hipogeos del Alto de Segovia (especialmente en el hipogeo S12 y los circunvecinos).
- Excavaciones en roca no meteorizada, con algunas discontinuidades (diaclasas), usualmente no están afectadas por problemas serios de estabilidad cuando los esfuerzos sobre la roca que rodea la excavación son menores que aproximadamente un quinto de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- Los cobertizos que se construyeron sobre algunos hipogeos no transmiten cargas de magnitud importante que comprometan la estabilidad geotécnica de los mismos, y no representan riesgo desde el punto de vista estructural.
- Ninguno de los hipogeos evaluados se encuentra afectado por fallas geológicas.

8. IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE AGENTES BIOLÓGICOS

8.1 INTRODUCCIÓN

Considerando el entorno en el que se encuentran los hipogeos del Alto del Aguacate, Alto de San Andrés, Alto de Segovia y Alto del Duende, así como la naturaleza de los materiales que los conforman, y lo referido por los responsables del saneamiento y control biológico realizados en el pasado y consignados en el apartado de intervenciones anteriores, es posible afirmar que las condiciones medioambientales externas, además de la baja ventilación y altos niveles de humedad y temperatura registrados al interior de los hipogeos, son parámetros cruciales para el desarrollo de biocolonización.

A lo largo de este capítulo se presenta la identificación de los parámetros biológicos observados en los hipogeos del Parque Arqueológico Nacional Tierradentro, así como las estrategias utilizadas para su control.

La identificación de organismos biológicos aporta elementos para el diagnóstico de los hipogeos en la medida en que dichos organismos son indicadores de biocolonización que interactúan con los hipogeos objeto de estudio. El control de dichos agentes biológicos se hace necesario en la medida en que permite mitigar la carga ambiental al interior de los hipogeos y dicho saneamiento ambiental es necesario para asegurar condiciones de trabajo adecuadas para el equipo de investigadores que llevan a cabo los procesos de documentación e intervención de los hipogeos. Implica la evaluación y aplicación de productos biocidas con efectos sobre la biocolonización biológica. Para la selección de los biocidas y el control biológico se considera la necesidad de desarrollar actividades de monitoreo y dar recomendaciones desde un punto de vista de conservación de la biodiversidad del área natural y el patrimonio cultural.

8.2 METODOLOGÍA

Identificación de organismos biológicos

Se llevó a cabo la observación y colecta de artrópodos presentes en los hipogeos objeto de estudio. A los cuales se les realizó un registro fotográfico y posterior identificación hasta el rango taxonómico de familia o un rango superior que se permita, esto mediante el uso y consulta de claves dicotómicas y fuentes literarias y de antecedentes de estudios en la zona (Mendoza, 2010; Villalba, 2010; Villalba, 2023). Cabe recalcar que no se colectaron muestras de poblaciones de artrópodos debido a la ausencia de un permiso de colecta, por lo cual las observaciones directas y fotografías fueron cruciales para asignar identidad a estos ejemplares.

Los artrópodos fueron colectados mediante colecta activa, fotografiados y liberados en las zonas aledañas a los sitios de muestreo o hipogeos. Se realizó la colecta de información relacionada con la ocurrencia del organismo, teniendo en cuenta lugar de colecta, si este se encuentra asociado a cavidades o nidos, entre otras características de importancia que permitieran indagar la ecología de este.

Adicionalmente a esto, se realizó la observación de agentes de biocolonización asociados a material vegetal (briofitos), macrohongos y microorganismos (hongos, bacterias y algas).

- **Muestras de hongos y bacterias:** Se realizó la toma de muestras mediante el frotis o raspado no invasivo de la superficie en donde se evidencie el indicador. Este material fue dispuesto en medios de cultivo no selectivos (Agar Nutritivo y Agar Sabouraud) para su crecimiento y posterior identificación mediante caracteres morfológicos en el Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- **Muestras de biopelículas de algas:** Se realizó la toma de muestras mediante el hisopado de la superficie y disposición en tubos Eppendorf de 1.5ml con agua destilada estéril + gotas de Lugol. Este material fue identificado mediante caracteres morfológicos en el Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- **Muestreo General:** Empleando la técnica de importa de cinta adhesiva, se tomaron muestras de áreas críticas o con indicadores con dudosa naturaleza, con el fin de indagar en los componentes. Estas improntas fueron trasladadas al Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano para su observación e identificación bajo microscopio óptico.

Control de agentes biológicos y saneamiento ambiental

El saneamiento ambiental se llevó a cabo en los hipogeos que presentan características críticas de biocolonización por agentes biológicos. Los sitios seleccionados corresponden a las observaciones iniciales por parte del grupo de conservadores-restauradores (Tabla 9).

En el marco de una la conservación curativa se prioriza los hipogeos seleccionados en la Tabla 9, sin embargo y entorno a una conservación preventiva se realizará el proceso de saneamiento ambiental en los hipogeos de constante visita turística, esto de acuerdo con las recomendaciones dadas en informes y procesos de saneamiento pasados (Villalba, 2010; Villalba, 2012; Villalba, 2023), además de hipogeos que el grupo de restauradores y conservadores considere incluir.

<i>Alto de Segovia</i>	<i>S-5, S-10, S-11, S12, S21.</i>
<i>Alto de San Andres</i>	<i>SA1, SA8.</i>
<i>Alto del Aguacate</i>	<i>A-36, A-41.</i>

Tabla 9. Hipogeos con características críticas de biocolonización por agentes biológicos adjudicados al proyecto FIAN.

El saneamiento ambiental se llevó a cabo mediante la aspersión de productos de origen natural (Tabla 9), alternativas sostenibles para el cese, reducción y neutralización de la biocolonización interna del hipogeo. Cabe recalcar que la selección de los productos consistió en una revisión bibliográfica y oferta de productos en el mercado colombiano, además de los ya empleados (Extracto ajo - ají) en el saneamiento realizado por Villalba en el 2023.

Producto	Grupo objetivo	Descripción
Alisín® (Estrato ajo - ají)	Insectos	<i>Alisín®</i> es un producto que contiene como principio activo extractos de Ají y Ajo, el cual, según el proveedor <i>Safer®</i> y bibliografía consultada, componentes químicos naturales como el limoneno, disulfuro de alilo, capsaicina, ácido nicotínico, carotenoides. Los cuales favorecen el efecto protector mediante la repelencia, disuasión de la alimentación, ovoposición e interferencia con el desarrollo de los insectos plaga (Tomado de Ficha técnica <i>Alisín®</i>). Los extractos de ajo (<i>Allium</i> spp.) proveen compuestos como el Alisín® y otros compuestos sulfurados que reducen la actividad de insectos, así como el ají (<i>Capsicum</i> spp.) que por medio de compuestos con capsaicina afectan el sistema nervioso de los insectos siendo un compuesto neurotóxico y repelente. Este producto presenta un amplio espectro como repelente desde plagas de cultivos como pulgones, polillas, mosca blanca, trips entre otros hasta arácnidos, insectos como escarabajos y larvas de todo tipo de insecto (Dugma & Zeleke, 2025; Ramos, 2016). En el PAT, estos componentes se han empleado en los saneamientos realizados en el 2015, 2017 y 2023. El cual se reporta como producto que presenta mejores resultados que el utilizado anteriormente (<i>Detiagas</i>), el cual desencadena procesos de oxidación de las barandas de protección en el alto de Segovia (ICANH, 2023). La aplicación del producto se realizó de acuerdo con recomendaciones del proveedor, además de concentraciones evaluadas por autores el cual proponen emplear una dosis de 2cc/L. La aplicación del producto fue direccionando a los bordes y fisuras de la superficie, además de los escalones de la cámara y alrededores del hipogeo.
Acido Piroleñoso 6% (AP6%)	Control de Carga microbiana	El destilado de madera o acido piroleñoso es un subproducto del uso de biomasa vegetal para producir bioenergía. El cual ha demostrado ser eficaz como biocida de líquenes y microorganismos sin causar alteraciones en el color y dureza superficial de la piedra. En particular, el contenido de compuestos fenólicos, carbonilos y ácidos orgánicos probablemente expliquen su acción antimicrobiana (Banchi et al, 2022). El ácido piroleñoso demuestra una actividad antimicrobiana a concentraciones superiores a 3% (Velmurugan, Han, & Lee, 2009) mientras que Nunura y Pacheco (2023) emplean una concentración inhibitoria para el crecimiento de hongos en concentraciones de 4 – 6%, además de ser concentraciones en las que observaron la reducción de insectos plaga para el lugar de estudio. El vinagre de madera es otro nombre al cual se asocia el destilado de madera o acido piroleñoso, el cual es catalogado como una sustancia multifuncional debido a las componentes volátiles, su baja toxicidad y buen efecto bactericida y fungicida. Diferentes estudios demuestran la inhibición del crecimiento de hongos como <i>Fusarium oxysporum</i>, <i>Rhizoctonia solani</i> además de ser fitotóxico a concentraciones superiores al 2%. Adicionalmente se reporta que el ácido piroleñoso inhibe el crecimiento de microbios como <i>Sallmonella</i>, patógenos vegetales como <i>Colletotrichum capsici</i> y <i>Phytophthora</i>

		<i>palmivora</i>, además de plagas como termitas, mosquitos y moscas domésticas. (Zhang, Tang, & Li, 2017; Anggrayni et al, 2025). En esta oportunidad se propuso al ácido piroleñoso como una sustancia de origen natural, con propiedades capaces de reducir los agentes biológicos que se encuentran en interacción con las estructuras hipogeas. Este producto se aplicó a una concentración de 6% al ambiente interno de los hipogeos por medio de aspersión.
Ácido Pelargónico 3% (AP3%)	Control de plantas y biopelículas de algas	El Ácido Pelargonico ha sido implementado como bioherbicida para el control de amplias especies de plantas, siendo una alternativa sostenible con el medio ambiente. Este compuesto muestra una actividad fitotóxica, alcanzando una elevada eficacia (Muñoz, 2024). Es por ello por lo que se propone el uso de este compuesto para el control de plantas y biopelículas de algas que biocolonizan las superficies del hipogeo. Este ácido orgánico actúa sobre las cutículas, afectando a permeabilidad de las membranas y la peroxidación de los tilacoides lo que resulta en un sece del crecimiento y desarrollo (Barbero, 2023; Muñoz, 2024). Este producto se propuso como controlador y biocida para biopelículas de algas y material vegetal (Briofitos), donde se procedió a aplicar a una concentración de 3% mediante aspersión en las zonas afectadas.

Tabla 10. Productos de origen natural propuestos para el saneamiento de los hipogeos.

Validación del Ácido Piroleñoso 6%

Empleando la metodología denominada Agar enmendado, se procedió a evaluar la efectividad del biocida Ácido Piroleñoso al 6% en condiciones in vitro, utilizando cepas de hongos recuperadas de muestreos ambientales realizados en los hipogeos en estudio. Esta metodología fue ejecutada en el Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

La metodología consistió en enmendar un medio de cultivo que contiene todas propiedades nutricionales adecuadas para el crecimiento de los microorganismos, con Ácido Piroleñoso hasta alcanzar una concentración final del 6%.

Se realizaron entre dos a cuatro réplicas por ensayo, además de un control negativo (sin producto ácido Piroleñoso). Se dejaron incubando a temperatura de 25°C por 72 horas. Transcurrido el tiempo de incubación se midieron los halos de crecimiento, para posteriormente efectuar el análisis comparativo correspondiente.

Control de agentes biológicos y saneamiento ambiental

El control y saneamiento ambiental se llevó a cabo en dos oportunidades a lo largo del proyecto, justo los días anteriores a que el grupo de restauradores – conservadores iniciaran las labores de intervención de los hipogeos, de la siguiente manera:

Saneamiento Ambiental 1 – Febrero: Se ejecutó un saneamiento ambiental el cual consistió en la aplicación de *Alisín*® a una dosis de 2mL / 1 L y Ácido Piroleñoso a una concentración de 6%. Este

protocolo se ejecutó con la finalidad de reducir la carga microbiana y ejercer acción repelente para insectos y otros organismos, previo a la llegada del grupo de restauradoras – conservadoras. Para de esta manera asegurar un ambiente idóneo para el trabajo al interior de los hipogeos.

Se emplearon dosis prácticas de 2 L de producto (AP6%) por hipogeo, mientras que para el *Alisín*® se aplicó manteniendo la dosis de 2ml/L y a un volumen por hipogeo, según consideración del profesional, siendo criterios decisivos el perímetro del hipogeo.

Saneamiento Ambiental 2 – Marzo: El segundo saneamiento tuvo la finalidad de neutralizar la carga o esporas microbianas movilizadas por las actividades de intervención. En esta oportunidad el saneamiento siguió los parámetros de área a sanear y volumen de producto a emplear.

El volumen de producto de Ácido Piroleñoso 6% aplicado está basado en el área del Hipogeo y según una dosis de 2L por cada 100 metros cuadrados de área (Tabla 10) esto con el fin de saturar el ambiente interno del hipogeo asegurando su infiltración y contacto con las superficies y áreas biocolonizadas.

En general el AP6% se aplicó mediante movimientos circulares y en paralelo a las superficies del hipogeo, en otras palabras, el producto se aplicó a una distancia considerable, de forma indirecta, evitando que la nube de microgotas entre en contacto inmediato con la superficie, esto para evitar que la fuerza con la que sale la microgota no ejerza una presión adicional a los fragmentos de toba que no se encuentran firmemente sujetos, reduciendo de esta manera la posibilidad de desprendimiento.

Alto	Hipogeo	Área (m ²)	Volumen Total (L)	Acido Piroleñoso 6% (mL)
San Andrés	SA1	156.78	3.0	188
	SA8	142.35	2.8	171
Segovia	S5	54.71	1.0	66
	S10	148.73	3.0	178
	S11	148.73	3.0	178
	S12	177.65	3.0	200
	S21	141.99	2.8	170
Aguacate	A36	49.14	1.0	59
	A41	46.81	1.0	59

Tabla 11. Volumen de producto (Acido piroleñoso 6%) por hipogeo según dimensiones de área (m²)

Adicionalmente se aplicó *Acido Pelargonico* 3% y *Alisín*® según requerimientos, es decir, se realizó una evaluación previa a la aplicación de estos productos, teniendo en cuenta criterios como población de insectos al interior de hipogeo, comunidades vegetales o sucesión ecológica dada por la biocolonización de algas, musgos o líquenes.

Para ambos saneamientos se realizó un cerramiento de los hipogeos de 12 horas, con las cuales se buscó saturar el lugar con los productos volátiles y compuestos activos de cada producto, favoreciendo el control, reducción y neutralización de agentes biológicos que interactúan con las

superficies y compuestos de la toba volcánica y pintura mural. Cabe recalcar que para el control y efectividad del saneamiento ambiental 2 se realizó un análisis del microbioma cultivable antes y después de la aplicación de los productos.

El muestreo microbiológico previo al saneamiento y post aplicación de productos (Saneamiento 2 – Marzo). Se propuso de acuerdo con la metodología de impactación directa en medios de cultivo, el cual consta de realizar un recorrido activo por 15 min a lo largo del hipogeo con dos medios de cultivo (Tolosa-Moreno, Lizarazo-Forero, & Blanco-Valbuena, 2012; Gómez, García, Lanche, & Cuéllar, 2021; Romero, Castañeda, & Acosta, 2016; Farro-Barragan, Ramos-Iturregui, Iglesias-Osores, & Carreño-Farfan, 2021). Los medios de cultivo fueron Agar nutritivo, para el recuento, aislamiento de bacterias y Agar Sabouraud + cloranfenicol para el recuento de hongos y levaduras. Las muestras colectadas fueron llevadas al Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano para su incubación a 25°C por 72 horas a 7 días según crecimiento de los microorganismos.

El número de unidades formadoras de colonias por metro cúbico de aire (UFC/m³) se calculó según la fórmula propuesta por Omeliansky: $N=5ax10^4 bt$

Donde N es el número de microorganismos en el aire interno de la zona de estudio, siendo a el número de unidades formadoras de colonia (UFC), b superficie de la caja de Petri (cm²) y t es el tiempo de exposición en minutos (Formula 1) (Romero, Castañeda, & Acosta, 2016; Tolosa-Moreno, Lizarazo-Forero, & Blanco-Valbuena, 2012).

Formula 1. Fórmula de Omeliansky para el cálculo de concentración de microorganismos en el aire (UFC/m³) mediante muestreo pasivo (sedimentación en placas de Petri).

Los criterios empleados para establecer el grado de contaminación correspondieron a referencias desde los ámbitos hospitalarios (Pasquarella, Pitzurra, & Savino, 2000) (Tabla 12), talleres de procesos agroindustriales (Vivas et al, 2022) y según la comisión europea para establecimientos no industriales (Ashuro, y otros, 2022) (Tabla 11).

Lugar	Optimo	Aceptable	No aceptable
Salas hospitalarias, como salas de médicos, urgencias y farmacias*	0 - 450	451 – 750	>751

Tabla 12. Recuento microbiano total en el aire según Fisher en entornos hospitalarios (UFC en placas de Petri de 9cm de diámetro)

*Se tendrá en cuenta estos valores con la finalidad de comparar carga microbiana establecida en entornos donde no debería sobrepasar los rangos aceptables dado el criterio de salud o riesgo infecciosos que se establece.

Niveles de contaminación	Concentración de microorganismos (UFC/m ³)
Muy baja	<25
Baja	26 – 100
Intermedia	101 – 500

Alta	501 – 2000
Muy alta	>2000

Tabla 13. Recuento microbiano empleado para establecer el grado de contaminación de aire.

8.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componente externo y materiales reactivos

Los hipogeos muestran biocolonización por artrópodos, algas, musgos y otros organismos. Este fenómeno se atribuye al entorno natural, condiciones ambientales y fuentes de nutrientes que propician el ingreso y establecimiento de colonias biológicas. Se resalta la existencia de posibles cadenas tróficas, evidenciada por ejemplares que ejercen control biológico, lo que permite estimar que el ecosistema posee capacidad de autorregulación. La infraestructura de protección de los hipogeos evidencia también la presencia de biocolonización.

Materiales como la madera, ampliamente utilizados en cercas y cobertizos, representan un foco potencial de contaminación. Anteriormente, esta situación ha sido documentada principalmente por trabajadores, conservadores y profesionales (Alvarez, García, & Jiménez, 2002; Villalba, 2010; Villalba, 2023). La madera puede albergar colonias de microorganismos y macrohongos que emplean la lignina y celulosa como fuente de carbono (Ilustración 28 y 29), así como colonias de artrópodos que emplean la madera como fuente de nutrientes. Durante el proceso de descomposición, mediado por microorganismos, la madera libera compuestos ácidos al ambiente como resultado de la oxidación y despolimerización de hemicelulosa y lignina. Estos ácidos contribuyen a la acidificación local y pueden modificar tanto las condiciones ambientales como la bioreceptividad de los materiales circundante (Goodell & Jellison, 2022).



Ilustración 28. Cerca de madera deteriorada, la cual puede ser fuente de nutrientes para organismos y hongos xilófagos. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez



Ilustración 29. Crecimientos de macrohongos posiblemente asociados a la descomposición de la madera. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez

No solo de evidencia actividad biológica al interior de los hipogeos, sino también al exterior donde los cobertizos y puertas de ingreso presentan hendiduras y perforaciones por insectos, además de zonas donde la acumulación de madera puede traer consigo un lugar favorable para artrópodos u organismos que de alguna manera busquen recursos nutricionales o de refugio como es el caso de los arácnidos y culebras (Ilustración 30).



Ilustración 30. Materiales cercanos a los hipogeos, los cuales pueden ser funcionales para organismos o especies xilófagas como fuente nutricional o bien como resguardo. Areas cercanas al hipogeo S5. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez

Organismos identificados

En las diferentes comisiones se detectó la presencia de organismos que hacen parte de un ciclo natural desempeñando actividades y nichos en el ecosistema, donde algunos de estos se pueden clasificar en un grupo amplio como controladores biológicos o depredadores. Estos, gracias a sus requerimientos nutricionales depredan y cazan sus presas ejerciendo un control poblacional y de esta manera manteniendo la estabilidad y equilibrio del microecosistema que se forma en cada hipogeo y de forma general en cada uno de los ecosistemas de los Altos. Algunos de los ejemplares identificados por medio de observaciones in situ y fotografías son:

Arthropoda: Arachnida: Scorpiones: Buthidae: Tityus spp

Alacranes

Los ejemplares encontrados en algunos de los hipogeos del Alto de Segovia y Alto de San Andrés (S5-SA8), se identificaron como alacranes de la familia *Buthidae* del género *Tityus* spp (Ilustración 31).

En concordancia con anteriores inventarios faunísticos como el realizado en el contrato No. 460-2023 que reportan la ocurrencia de estos ejemplares. Siendo ejemplares que habitan en diversos ambientes desde bosques húmedos tropicales hasta bosque seco montano en estructuras secas como cuevas o áreas construidas que presenten los requerimientos nutricionales, estos desempeñan actividades como controladores biológicos pero que pueden ser un riesgo para los visitantes y trabajadores del parque debido a su capacidad de inyectar veneno cuando se sienten en peligro o atacados.

Castro (2025) realiza un estudio reconociendo los aspectos biológicos y ecológicos del escorpio *Tityus colimbianus* donde encuentra una relación entre el desarrollo del ejemplar y el ciclo estacional, siendo mayor presencia de organismos recién eclosionados en el periodo lluvioso, juveniles en un periodo intermedio y adultos en un periodo seco.

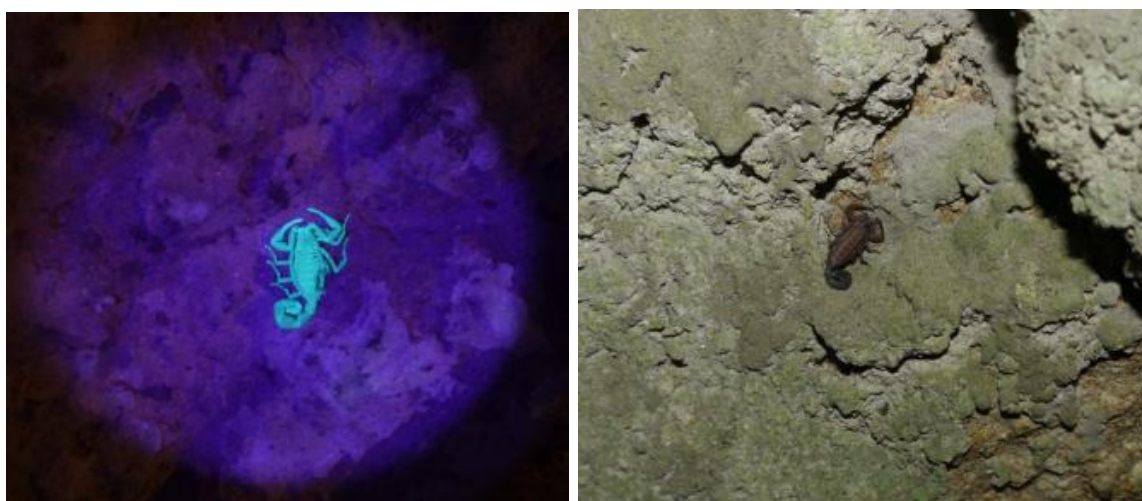


Ilustración 31. Alacranes de la familia *Buthidae* del género *Tityus* spp Koch, 1836. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Arachnida: Araneae: Lycosidae

Arañas

Las arañas aparecen como los ejemplares más comunes en los hipogeos dadas las condiciones ambientales y la oferta alimenticia que estos les puede proveer además de las grietas y hendiduras donde pueden desarrollar sus viviendas. Al igual que en el contrato No. 460-2023 se reporta la presencia de estos individuos identificados como arañas de la familia *Lycosidae* (Ilustración 32).

Los ejemplares de esta familia suelen realizar construcciones de madrigueras que consisten en excavaciones bajo rocas, siendo una estructura vertical o diagonal al suelo. Estas arañas son consideradas controladoras biológicas dado su potencial como cazadoras al asecho, detectan la presencia de sus presas por medio de vibraciones que se producen sobre el suelo, en su dieta se encuentran individuos de grillos, cucarachas, cucarrones, tijeretas moscas y mosquitos, incluso se han reportado ataques entre arañas de esta familia (Rodríguez-Ramos, 2006)



Ilustración 32. Araña de la familia Lycosidae. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Aracnida: Opiliones

Arañas / Opiliones

Ejemplares caracterizados por un cefalotórax y un abdomen ampliamente fusionados, patas largas y un estilo de vida depredador, son de hábito crepusculares y carecen de glándulas venenosas. Los opiliones cumplen una función de controladores biológicos al desempeñarse como depredadores generalistas dentro de la red trófica. Además de ser un grupo de organismos con potenciales características de indicador biológico, siendo su presencia indicadora de un entorno saludable y en equilibrio, ya que estos ejemplares son sensibles a cambios drásticos de humedad y temperatura (De Moya Guerra, Martínez Hernández, & García, 2021)

En los hipogeos estos individuos se encontraron asociados a grietas y fisuras de la superficie donde generan sus nidos y tienen sus camadas. Están presentes en la gran mayoría de hipogeos ya que encuentran en ellos las condiciones adecuadas para su óptimo desarrollo. No fue posible identificar a estos ejemplares hasta un rango taxonómico más alto debido a su complejidad, sin embargo y en concordancia con el Contrato No. 460-2023 es posible que las especies de opiliones se encuentren agrupadas en la familia Cosmetidae (Ilustración 33).

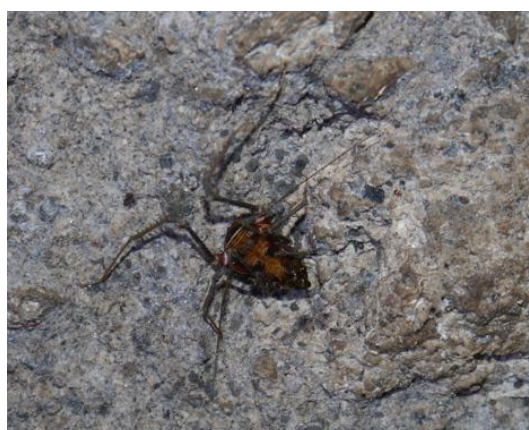


Ilustración 33. Opiliones encontrados en los hipogeos del alto de Segovia. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Myriapoda

Cienpies y milpies

Los miriápodos se encuentran constituidos por cuatro clases de artrópodos terrestres (quilópodos, diplópodos, sínfilos y pauropodos) de los cuales los diplópodos (milpiés, de cuerpo cilíndrico) junto con los quilópodos (ciempiés, cuerpo alargado con patas prolongadas, largas en algunos casos) son recurrentes organismos de los hipogeos. A estos organismos se les atribuye la formación de galerías que alteran la estructura de la pintura mural (Mendoza, 2010) Sin embargo, Mendoza en 2010, reporta diversos daños que difícilmente se pueden atribuir a un solo factor o directamente a los Diplópodos, por ejemplo, la bióloga reporta a ejemplares del orden Blattaria e Hymenoptera, como organismos que se evidenciaron in situ, realizando actividades cercanas a estas galerías.

Por otro lado, la biología de los diplópodos asocia a formación de túneles a especies excavadoras de las familias *Spirobolida* y *Julidae* en especial de los géneros *Julus* spp., *Ommatoiulus* spp. y *Cylindroiulus* spp., siendo el primer genero asociado a un modo de vida troglóxena (recurrentes de cuevas, pero no de forma intencional) mientras que los dos géneros siguientes se encuentran mayormente asociados a un modo de vida en cavernas (troglófilas) donde llevan a cabo sus respectivos ciclos de vida, donde las hembras una vez fecundadas entierran sus huevos en galerías o fisuras del suelo (Ilustración 34) (Melic, 2015).

Por su parte, los ejemplares de la clase Chilopoda son troglófilas en ambientes de alta humedad y baja luz, de habito nocturno y carnívoros (controladores biológicos de otras especies de artrópodos), siendo depredadores estrictos, estos organismos cuentan con apéndices bucales y glándulas venenosas que les permiten inmovilizar a sus presas (Guerrero & Pereira, 2023).



*Chilopoda: Scutigermorpha:
Pselliodyidae*



Diplopoda: Spirobolidae



Chilopoda: Polydesmida



Diplopoda: Spirobolidae

Ilustración 34. Ejemplares del orden Myriapoda encontrados en los hipogeos. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Orthoptera: Gryllidae & Acrididae

Saltamontes, cigarras, langostas

El orden Orthoptera incluye los grupos de saltamontes, grillos, chicharras y langostas, los cuales se caracterizan por generar sonidos mediante un mecanismo conocido como estridulación. Estos individuos se encuentran asociados a hábitats y regiones tropicales diversas desde áreas abiertas como pastizales a cuevas o grietas y taludes de tierra. Son principalmente herbívoros, alimentándose de hojas, tallos y semillas de gramíneas y otras plantas herbáceas, en algunos casos pueden ser omnívoros oportunistas, complementando su dieta con pequeños invertebrados por lo cual son considerados como controladores biológicos, además de desempeñar funciones ecológicas en el reciclaje de nutrientes mediante la transformación de biomasa vegetal en recursos para otros niveles tróficos (Naskrecki, 2013)

La familia Gryllidae (grillos) suelen vivir en suelos arenosos, praderas y ambientes cálidos. Algunos de sus ejemplares suelen excavar madrigueras donde se refugian creando nidos para su progenie. En cuanto a su alimentación, son de hábito herbívoro. Por otro lado, la familia Acrididae (saltamontes), hace parte de uno de los grupos más representativos del orden. Estos ejemplares suelen encontrarse en praderas abiertas, raramente en entornos subterráneos, sin embargo, se asocian a hábitats cálidos. Su dieta es estrictamente herbívora (Naskrecki, 2013).

Se pudo establecer que estos organismos emplean las grietas y como tal la cámara del hipogeo como área de refugio y descanso en los momentos del día, donde su actividad es baja, mientras que la noche suelen salir de sus nidos para forrajear y suplir sus necesidades nutricionales (Taylor, 2005). Los hipogeos al ser ambientes cálidos con humedades relativas altas, pueden ser un ambiente propicio para su óptimo desarrollo. Estos ejemplares fuera de ser un riesgo directo son un indicador del equilibrio del ecosistema, promoviendo la activación de ciclos biogeoquímicos.



Ejemplar de la familia Gryllidae



Ejemplar de la familia Acrididae

Ilustración 35. Orden Orthoptera, individuos que se encontraron asociados a las superficies y grietas. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Blattodeae

Cucarachas

En general, las cucarachas buscan ambientes húmedos y resguardados, como grutas y cavidades, por lo que suelen presentar hábitos cavernícolas. Su desarrollo biológico ocurre en condiciones térmicas cercanas a los 20 °C. La mayoría de las especies son nocturnas y evitan la luz (Torres, 2015).

Poseen aparato bucal masticador, lo que les permite raspar superficies y alimentarse de restos orgánicos y detritos. Su presencia puede favorecer la aparición de controladores biológicos, como escorpiones y arácnidos (Mendoza L., 2010; Torres, 2015).

En concordancia con lo reportado en el Contrato No. 460-2023 (Villalba, 2023), también se observaron ejemplares asociados a este orden. Por ello, se estima que son ejemplares recurrentes y que dadas sus funciones ecosistémicas se encuentran asociadas a las estructuras hipogeas. Es por ello por lo que, para reducir su intervención al interior de las cámaras, se recomienda evitar dejar residuos de comida en las zonas de acceso y disminuir la acumulación de materia orgánica, como hojarasca, ya que estos organismos participan en los ciclos biogeoquímicos y pueden verse favorecidos por la disponibilidad de este tipo de recursos.



*Ilustración 36. Orden Blattodea, se observa el momento en el ejemplar realizo su muda de exoesqueleto (ecdisis).
Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez*

Arthropoda: Hymenoptera

Avispas, abejas, hormigas

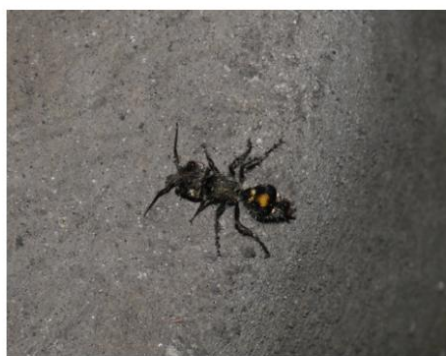
La ocurrencia de estos ejemplares en los hipogeos del PAT está asociada al igual que los demás grupos de organismos a la disponibilidad de recursos y posibles áreas de anidamiento. Los Himenópteros en general desempeñan diversas funciones desde polinización hasta control de plagas, sin embargo, en su desempeño de actividades pueden colonizar lugares como las cámaras de los hipogeos, donde la superficie es suave y fácil de excavar, esto con el fin de realizar lugares de anidación caso que se reporta en el informe técnico del contrato No. 460-2023 (Villalba, 2023)

Para este caso se reportan ejemplares de avispas parasitoides al ingreso de los hipogeos. Estas avispas localizan hospedadores en ambientes variados, incluyendo cavidades y suelos, donde pueden encontrar larvas de insectos y arácnidos, donde depositan sus huevos en otros insectos u arácnidos, los huevos eclosionan y se alimentan del cuerpo de presas. Por lo cual se consideran controladoras biológicas influenciando en la población de organismos que pueden estar directamente asociados con la estabilidad del hipogeo (Fernández Gayubo & Pujade-Villar, 2015).

Por otro lado, La familia Mutillidae, conocida como “hormigas de terciopelo”, está presente en Colombia y se ha registrado en varias regiones del Cauca. Estos himenópteros son avispas parasitoides, de aspecto piloso y coloración llamativa (rojo, negro, anaranjado), y suelen encontrarse en ambientes secos con suelos arenosos, rocosos o cavidades subterráneas. Poseen una picadura potente y dolorosa, aunque no son agresivas si no se manipulan (Fernández & Sharkey, 2006).



Hymenoptera clasificada como avispa parasitoide



Hymenoptera, hormiga felpa asociada a familia Mutillidae

Ilustración 37. Orden Hymenoptera. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez

Arthropoda: Lepidoptera

Mariposas, polillas

Se reporta la presencia de una oruga de posiblemente una mariposa, la cual se considera una ocurrencia accidental, ya que el hipogeo no cuenta con las fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, sin embargo, se recomienda monitoreo de este tipo de insectos, con la finalidad de dilucidar una posible relación (Ilustración 38).

Por otro lado, se reportan indicadores asociados a ejemplares de la familia Tineidae, siendo un grupo diverso, con hábitos queratófagos y quitinófagos, es decir, se alimentan de materiales ricos en queratina y quitina: plumas, pelo, pieles, restos animales, madera, guano y otros detritos orgánicos. Las larvas suelen estar asociadas a ambientes húmedos y con materiales en descomposición. Como método de estrategia al ambiente y depredadores, las larvas crean estuches o cápsulas con guano y fibras, dentro de los cuales pupan y se protegen (Ilustración 38) (Byun et al., 2014).

La presencia de esta familia de lepidópteros está asociada a la disponibilidad de guano de murciélago, el cual es rico en restos orgánicos y microorganismos, lo que lo convierte en un recurso estable. Sumado a microclimas con humedad, temperatura estable y baja ventilación favorecen su ciclo vital (Byun et al., 2014; Brimblecombe & Querner, 2026).



Oruga de mariposa, posiblemente una ocurrencia accidental



Estuche de ejemplar de la familia Tineidae, conocida comúnmente como "polilla estuche"

Ilustración 38. Lepidoptera. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

Animalia: Reptiles: Escamosos: Colubrideae: Atractus

Culebra cazadora

Se estima que este ejemplar corresponde a la especie *Atractus lehmannii* (Boettger, 1898) (Ilustración 39). En consecuencia, la descripción que se presenta a continuación se basa en la información disponible para este taxón. Esta identificación es consistente con los reportes previos realizados para la zona (Ayala Sarasty, López López, & Urbano Delgado, 2025).

Estos ejemplares denominados culebras son de hábitos discretos y fosoriales (excavador y de vida subterránea) cuya distribución se centra en las cordilleras central y oriental de Colombia, especialmente en departamentos como el Cauca, Quindío, Caldas, Risaralda, y Valle del Cauca. Estos ejemplares son recurrentes de ambientes de bosques montanos, bajo piedras, troncos, hojarasca y escombros (Himes, Arteaga, Vera-Pérez, & Enge, 2022). Su alimentación se basa en lombrices de tierra y otros invertebrados que se encuentran asociados a entornos húmedos y oscuros, como es el caso de los hipogeos, como se ha venido reportando su alta ocurrencia de artrópodos puede ser fuente de alimento para este tipo de culebras. Por lo cual, se consideran un componente esencial en la cadena trófica desempeñando funciones como controlador biológico (Himes, Arteaga, Vera-Pérez, & Enge, 2022; Ayala Sarasty, López López, & Urbano Delgado, 2025).

La mayoría de los especímenes se encontraron asociados a los hipogeos del Alto de Aguacate, sin embargo, se reportan ocurrencias de diferentes ejemplares en los demás sitios arqueológicos, esto según los aportes y experiencias de los trabajadores y el reporte realizado en el contrato No. 460-2023 (Villalba, 2023). Cabe recalcar que estos ejemplares NO hacen parte de las serpientes venenosas. Su manejo al interior de las cámaras se recomienda y forma de retiro manual, donde se propone emplear guantes de nitrilo para evitar el contacto directo.



Ilustración 39. Ejemplar de Atractus lehmannii (Boettger, 1898). Reportes del alto de Aguacate. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

Animalia: Anuros: Craugastoridae

Rana

La información a continuación se da partiendo de la identificación del ejemplar como miembro del género *Pristimantis* spp. (Ilustración 40) los cuales se distribuyen en la zona de influencia por el PAT, además de ser uno de los géneros más diversos.

Este género de ranas presenta hábitos terrestres y actividad principalmente nocturna. Suele habitar bosques húmedos, donde se encuentra sobre la hojarasca, troncos caídos o vegetación baja. En

general, prefiere ambientes con alta humedad y temperaturas estables. En este sentido, los hipogeos, especialmente sus cámaras y grietas pueden ofrecer nichos adecuados para su desarrollo, así como recursos nutricionales donde su dieta al ser generalista, pueden consumir pequeños artrópodos como coleópteros, dípteros, hormigas y arañas (Brito, Batallas, & Yáñez-Muñoz, 2017).

Caber recalcar que estos ejemplares fueron evidenciados solo en el Alto de Aguacate, posiblemente a la ausencia de una barrera física como las puertas de acceso que se encuentran en los demás altos. Sin embargo, y partiendo desde la mirada ecológica y estabilidad del ambiente, la presencia de estos ejemplares representa un equilibrio del ecosistema, además de ser un controlador biológico.

Se recomienda monitorear su presencia en los hipogeos, ya que no se reportan daños directos (agente de deterioro) pero su presencia puede proporcionar desechos para otras especies para de esta manera favorecer la sucesión ecológica.



*Ilustración 40. Rana en Alto de Aguacate, ejemplar asociado al género *Pristimantis* spp. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.*

Animalia: Mammalia: Chiroptera

Murciélagos

Los murciélagos se refugian en cuevas o estructuras subterráneas, donde desarrollan sus actividades como cortejo, crianza e hibernación. Generalmente se congregan en áreas oscuras con rangos térmicos que mantiene constantes durante todo el año (baja variabilidad térmica) y humedad relativa alta, condiciones que favorecen la integridad de las membranas alares evitando la deshidratación, además la supervivencia de las crías (Muñoz Valbuena & Fonseca Cipagauta, 2023).

Es posible asociar a los murciélagos como indicadores de ecosistemas estables donde se presencia está relacionada con funciones de polinización y de control de poblaciones de artrópodos o reptiles. Sin embargo, el guano (heces de murciélago) es considerado el motor energético, ya que le provee carbono, nitrógeno, fosforo y otros minerales que sostienen complejas redes tróficas de organismos, asegurando de esta manera los recursos nutricionales necesarios para su desarrollo (Prada, 2014).



Ilustración 41. Murciélago Hipogeo A0. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez.

Flora

En cuanto al componente de flora asociada a los hipogeos se detecta biocolonización por microalgas del género ***Chlorella* spp.**, **algas filamentosas**, **briofitos (musgos y hepáticas)** y **helechos**. Estos ejemplares favorecidos por parámetros como la humedad, escorrentía de agua lluvia e incidencia de luz solar, ya que estos organismos al ser fotosintéticos dependen en gran medida de la fotosíntesis como motor energético, el cual en algunos casos esta biocolonización se rigen por el recorrido de luz solar cuando ingresa al hipogeo (Ilustración 42).



Ilustración 42. Incidencia de material vegetal (Briofitos, líquenes, algas y plantas). Se observa boca del hipogeo A57 colonizada en un 80 %, al igual que en la superficie de la parte derecha de la entrada al Hipogeo A47, donde se observa el

establecimiento de un helecho. Adicionalmente se observa el crecimiento de ejemplares fotosintéticos según el recorrido de la luz solar. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez.

La presencia de estos componentes fotosintéticos está relacionada con condiciones ambientales de humedad, luz solar y superficies irregulares con nutrientes básicos para su supervivencia. Marcado así un proceso de sucesión biológica, además de acelerar los procesos de meteorización. Donde la maquinaria bioquímica del componente natural permite la disolución de iones y elementos de la roca que son requeridos para el crecimiento biológico. Permitiendo de esta manera que los componentes primarios (briofitos, líquenes) favorezcan el establecimiento de ejemplares más complejos como helechos o plantas vasculares.

Hongos

Por otro lado, se pudo evidenciar el crecimiento de cuerpos fructíferos o esporocarpio de hongos, estas estructuras que determinan la reproducción del ejemplar. Estos hongos fueron observados en los umbrales de las bóvedas, cercanos o asociados a las cercas de madera (Ilustración 43).

Se infiere que estas colonias fúngicas están en interacción con los componentes de la madera de la cerca, clasificándolos como ejemplares xilófagos, los cuales encuentran en la madera sus requerimientos nutricionales que le permiten llevar a cabo su ciclo de vida, produciendo estas setas, componente sexual de los hongos.



Ilustración 43. Presencia de cuerpos fructíferos de hongos. Se observa una posible relación en el crecimiento del ejemplar con la madera de la cerca del hipogeo. A. cerca de madera del hipogeo S19 y presencia de ejemplares de Coprinus spp. B. Hongos cercanos a la madera de la cerca del hipogeo D4, Basidiomiceto - identificación pendiente. Fotografías Antonio Guarnizo-Pérez.

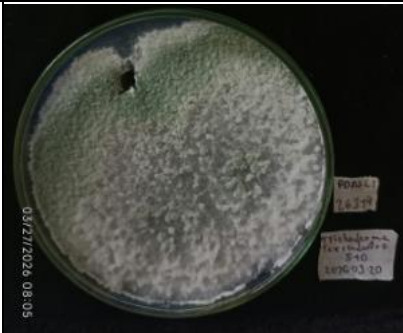
La presencia de estos ejemplares fotosintéticos y fúngicos además de los organismos como insectos, arácnidos y vertebrados, representan un ecosistema sano, activo y que forman parte del equilibrio natural. Sin embargo, algunas de estos ejemplares, desde la mirada de conservación del patrimonio son perjudiciales para las estructuras y representaciones de los hipogeos.

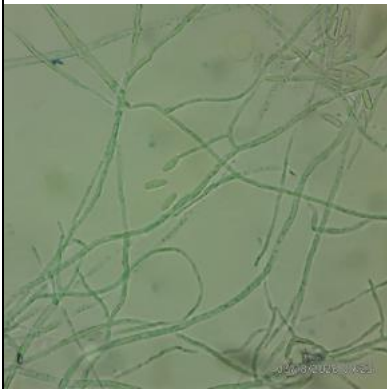
UNESCO menciona que los 1157 sitios del patrimonio mundial no solo conservan los lugares con evidencias históricas y de la cultura humana, sino también protegen la diversidad biológica.

Validación Acido Piroleñoso 6%

Para este análisis se seleccionaron ejemplares de *Trichoderma* spp., *Fusarium* spp., *Cunninghamella* spp., y un Oomycete (Tabla 14).

El criterio de selección se basó en su elevada capacidad de crecimiento: a las 72 horas estas cepas alcanzaron un desarrollo completo en cajas de Petri de 9 cm de diámetro. Además, presentan características fenotípicas similares a los microorganismos que colonizan rápidamente las estructuras de las bóvedas.

Morfotipo Fúngico	Observaciones	Imágenes
<i>Trichoderma</i> spp. S10	Morfotipo fúngico aislado de la carga microbiana interna del hipogeo S10. Este ejemplar cuenta con características macroscópicas de colonia de textura algodonosa o granulosa de tonalidades inicialmente blancas que con el tiempo adquieren tonalidades verdes. Microscópicamente este ejemplar presenta hifas hialinas, septadas y ramificadas. Conidioforos en forma de botella (de mayor tamaño en la base y estrechas en el ápice), productores de conidios hialinos al inicio y verdes cuando maduros.	 Imagen colonia en la caja de Petri con medio PDA  Imagen bajo microscopio en objetivo 40X
<i>Cunninghamella</i> spp. SA1	Ejemplar fúngico aislado de ambiente interno del hipogeo SA1. Presenta una colonia de rápido crecimiento, de micelio aéreo de color blanco y textura algodonosa. Microscópicamente se observan hifas hialinas cenocíticas, con esporangióforos erectos, simples o ramificados con presencia de vesícula globosa	 Imagen colonia en la caja de Petri con medio PDA

	recubiertas de esporangios dispersos que dan origen a esporas esféricas.	 Imagen bajo microscopio en objetivo 40X
<i>Fusarium</i> spp. SA8	Ejemplar fúngico aislado del ambiente interno del hipogeo SA8. La colonia presenta una textura algodonosa de color crema a un leve tono amarillo. No es de crecimiento rápido, sin embargo, se selecciona por su recurrencia en las muestras. Microscópicamente el hongo presenta hifas hialinas, septadas. Conidióforos simples o ramificados, con fiálides cortas. Conidios fusiformes (forma de hoz) cuando macroconidios y ovalados o elipsoides cuando microconidios.	 Imagen colonia en la caja de Petri con medio PDA  Imagen bajo microscopio en objetivo 40X

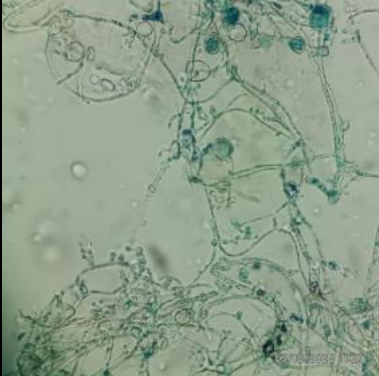
Oomycete S12	Ejemplar aislado del hipogeo S12. Colonia de crecimiento rápido, donde se observa un micelio algodonoso de coloración blanquecina. Microscópicamente se observan hifas hialinas ramificadas, sin septos. Oosporas esféricas de pared gruesa.	 Imagen colonia en caja de Petri con medio PDA  Imagen bajo microscopio en objetivo 40X
----------------------------	---	--

Tabla 14. Características e imágenes de los ejemplares fúngicos seleccionados.

Como primer paso del estudio se realizó la evaluación de la pureza del Ácido Piroleñoso al 6%, con el objetivo de detectar posibles impurezas o la presencia de agentes microbianos que pudieran interferir en el correcto uso de sus componentes. Este análisis es fundamental para garantizar que los resultados obtenidos en las pruebas de efectividad correspondan exclusivamente a la acción del biocida y no a contaminantes externos.

Los ensayos efectuados evidenciaron que el producto no contiene agentes contaminantes ni microorganismos asociados, lo que asegura que no existe riesgo de contaminación atribuible al biocida durante su aplicación. La ausencia de impurezas confirma la estabilidad del producto y su idoneidad para ser empleado en pruebas de laboratorio y en aplicaciones en los lugares de estudio.

Posteriormente se llevó a cabo la evaluación de la efectividad del Ácido Piroleñoso al 6% frente a las cepas fúngicas seleccionadas (*Trichoderma* spp., *Fusarium* spp., *Cunninghamella* spp. y un Oomycete).

En las cajas de control (sin biocida) se observó un crecimiento total de los microorganismos, consistente con el comportamiento previamente registrado en condiciones ambientales. El micelio cubrió completamente la superficie del medio de cultivo, confirmando la elevada capacidad de colonización de las cepas.

Por el contrario, en las cajas de tratamiento (medio de cultivo enmendado con Ácido Píroleñoso al 6%) no se evidenció crecimiento micelial durante el periodo de observación (72 horas). La ausencia de desarrollo indica una inhibición completa (100%) de la actividad biológica de los hongos evaluados (Tabla 15, Ilustración 44).

Morfotipo Fúngico	Promedio control	Promedio Tratamiento	% Efectividad
<i>Trichoderma</i> spp.	9.00 cm	0 cm	100
<i>Cunninghamella</i> spp	9.00 cm	0 cm	100
Oomycete	9.00 cm	0 cm	100
<i>Fusarium</i> spp.	4.75 cm	0 cm	100

Tabla 15. Resultados efectividad biocida (Acido Píroleñoso 6%) frente a morfotipos fúngicos seleccionados.

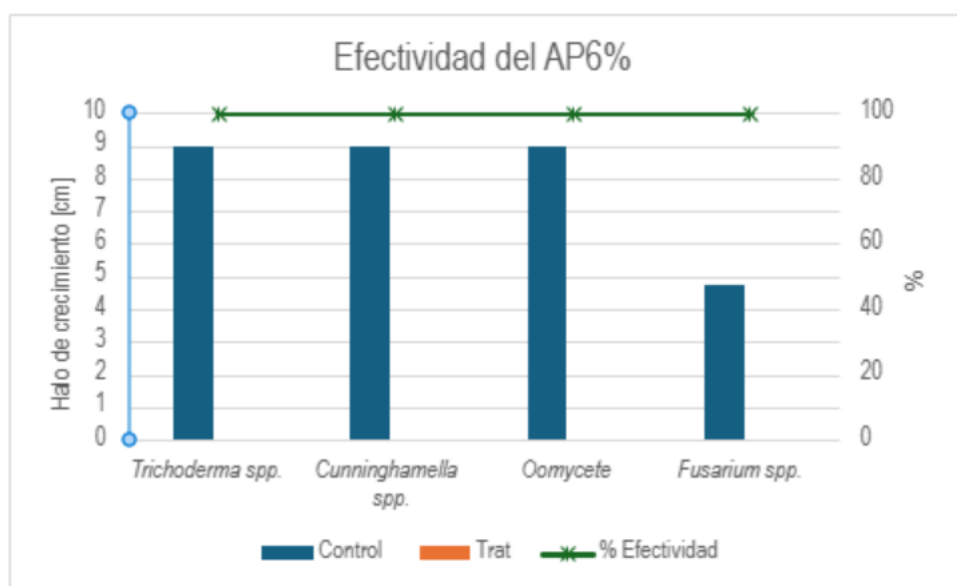


Ilustración 44. Efectividad del biocida ácido píroleñoso 6% frente a los microorganismos fúngicos seleccionados. Se evidencia un crecimiento en las cajas de Petri control (sin producto) mientras que en el tratamiento (con producto) no se evidencia halo de crecimiento. La línea verde corresponde al porcentaje de efectividad donde para cada uno de los casos es del 100%.

De esta manera se estableció que en las pruebas realizadas bajo condiciones *in vitro*, el ácido píroleñoso al 6% alcanzó una efectividad del 100% frente a los morfotipos fúngicos evaluados. Este resultado indica una inhibición completa del crecimiento de hongos filamentosos con alta capacidad de desarrollo, dentro de las condiciones experimentales establecidas.

Control de agentes biológicos y saneamiento ambiental

Se llevaron a cabo dos fases de saneamiento (Tabla 16). Se emplearon los tres productos planteados los cuales están direccionados a los grupos funcionales de microorganismos, insectos y material

vegetal (Tabla 10, 16) estos productos se aplicaron de forma individual, iniciando con los de aplicación focalizada (Alisin[®] y Ácido Pelargonico) para luego aplicar el Acido piroleñoso.

Saneamiento	Producto	Alto de Segovia	Alto de San Andrés	Alto de Aguacate	Alto de Duende
Febrero	Alisin [®] , se aplica en los bordes y grietas de la superficie.	S30, S20, S1, S2, S3, S17, S4, S25, S19, S18, S24, S15, S14, S6, S7, S28, S14 y S8	SA1, SA8, SA3, SA4 y SA5	A57, A47, A41, A36, A38, A28, A27, A23-A24, A22, A20, A4, A13, A14 y A0	D1, D4, D2 y D3
	Ácido Piroleñoso, se aplica por aspersión masiva	S5, S10, S11, S12 Y S21	SA1 y SA8	A36 y A41	-
Marzo	Ácido Piroleñoso, se aplica por aspersión masiva	S5, S10, S11, S12 Y S21	SA1 y SA8	A36 y A41	-
	Ácido Pelargonico, se aplica por aspersión en zonas de biocolonización por ejemplares fotosintéticos.				

Tabla 16. Proceso de saneamiento realizado para el proyecto FIAN-2026

Producto	Concentración	Aplicación
Alisín [®]	2 – 3 mL / L	Por aspersión. Se aplica en zonas de grietas y hendiduras, además de forma generalizada en la zona inferior de las paredes de las bóvedas. Entrada y escaleras de ingreso.
Ácido Piroleñoso	60 mL /L para una concentración de 6%	Por aspersión de gota fina. Se aplica de paralelo a las paredes de la bóveda para que de forma indirecta la superficie entre en contacto con el producto.
Ácido Pelargónico	30 mL/L para una concentración de 3%	Por aspersión. Se aplica exclusivamente en zonas con crecimiento de material vegetal, como algas, musgos y hepáticas.

Tabla 17. Productos, concentración/dosis y observaciones de aplicación.

Seguimiento al Componente Microbiológico

Se realizó la toma de muestras de ambiente de acuerdo con plan de trabajo (Informe enero), estos resultados se presentan a continuación y resultados asociados a la calidad de aire de los hipogeos antes y después de la aplicación (Tabla 18 y 19), estos valores fueron evaluados de acuerdo con los criterios planteados en el plan de trabajo (Tabla 14 y 15).

Alto	Hipogeo	Pre-Tratamiento		Post-Tiramiento	
San Andrés	SA1				
		Agar SB 162 UFC Hongos filamentoso	Agar N 29 UFC Hongos filamentoso 5 UFC Bacteria/ Levadura	Agar SB 2 UFC Hongos filamentoso	Agar N 3 UFC Bacteria/ Levadura
	SA8				
		Agar SB 48 UFC Hongos filamentoso	Agar N 87 UFC Bacteria/ Levadura	Agar SB 3 UFC Hongos filamentoso	Agar N 3 UFC Bacteria/ Levadura
Segovia	S5				
		Agar SB 97 UFC Hongos filamentoso	Agar N 37 UFC Hongos filamentoso 7 UFC Bacteria/ Levadura	Agar SB 9 UFC Hongos filamentoso	Agar N 8 UFC Hongos filamentoso 4 UFC Bacteria/ Levadura
	S10				
		Agar SB 10 UFC Hongos filamentoso	Agar N 34 UFC Hongos filamentoso 4 UFC Bacteria/ Levadura	Agar SB 7 UFC Hongos filamentoso	Agar N 13 UFC Hongos filamentoso 2 UFC Bacteria/ Levadura

	S11				
		Agar SB 24 UFC Hongos filamentoso	Agar N 6 UFC Hongos filamentoso 33 UFC Bacteria/ Levadura	Agar SB 4 UFC Hongos filamentoso	Agar N 3 UFC Hongos filamentoso 1 UFC Bacteria/ Levadura
	S12*				
		Agar SB 300 UFC Hongos filamentoso	Agar N 200 UFC Hongos filamentoso 100 UFC Bacteria/Levadura	Agar SB 42 UFC Hongos filamentoso	Agar N 56 UFC Hongos filamentoso 1 UFC Bacteria/Levadura
	S21				
		Agar SB 20 UFC Hongos filamentoso	Agar N 12 UFC Hongos filamentoso 3 UFC Bacteria/Levadura	Agar SB 1 UFC Hongos filamentoso	Agar N 1 UFC Hongos filamentoso 1 UFC Bacteria/Levadura
	A36*				
		Agar SB 170 UFC Hongos filamentoso	Agar N 150 UFC Hongos filamentoso 3 UFC Bacteria/Levadura	Agar SB 92 UFC Hongos filamentoso	Agar N 50 UFC Hongos filamentoso 7 UFC Bacteria/Levadura

	A41*				
		Agar SB 18 UFC Hongos filamentoso	Agar N 43 UFC Hongos filamentoso	Agar SB 20 UFC Hongos filamentoso	Agar N 8 UFC Bacteria/Levadura

Tabla 18. Muestras microbiológicas de ambiente colectadas antes (Pre) y después (Post) tratamiento con biocida Acido Piroleñoso 6%

*Para las muestras de correspondientes al Alto de Aguacate, no se realizó el cerramiento del hipogeo y las muestras fueron tomadas una vez terminada la aplicación de los productos.

Alto	Hipogeo	N1t *	Nft**	%R
Aguacate	A36	1692,3	670,6	60,37
	A41	309,1	83,8	72,88
San Andrés	SA8	686,4	31,4	95,42
	SA1	1026,9	26,2	97,45
Segovia	S21	183,4	15,7	91,43
	S11	330,1	41,9	87,30
	S12	3143,7	665,4	78,83
	S5	738,8	110,0	85,11
	S10	251,5	89,1	64,58

Tabla 19. Resultados Número de microorganismos en el aire interno de las zonas de estudio [UFC/m³].

N1t : Numero de Microorganismos antes del tratamiento AP6%,
Nft : Numero de Microorganismos después del tratamiento AP6%. %R: porcentaje de reducción por hipogeo y en promedio por alto.

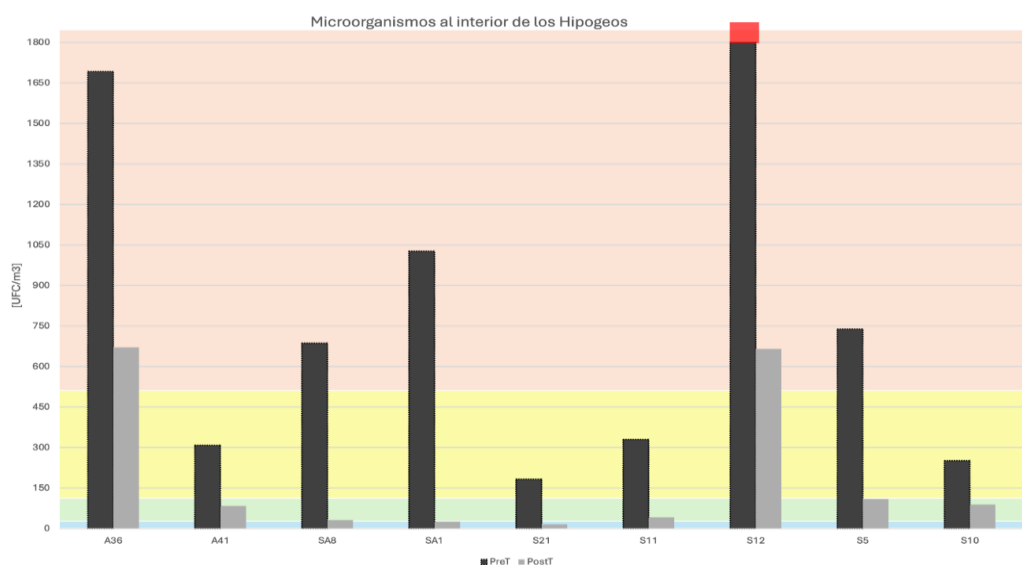


Ilustración 45. Valores asociados a los niveles de microorganismos al interior de los hipogeos, se traslapa con los rangos demarcados por escala de color, donde azul representa el nivel de contaminación "Muy Bajo" con un rango <26 UFC/m³, seguido por el color verde que representa el nivel "Bajo" entre 26 – 100 UFC/m³, amarillo como el nivel

“intermedio” entre 101 – 500 UFC/m³, naranja para el nivel “alta” entre 501-2000 UFC/m³ y en rojo el nivel “muy alto” con valores mayores a 2000 UFC/m³

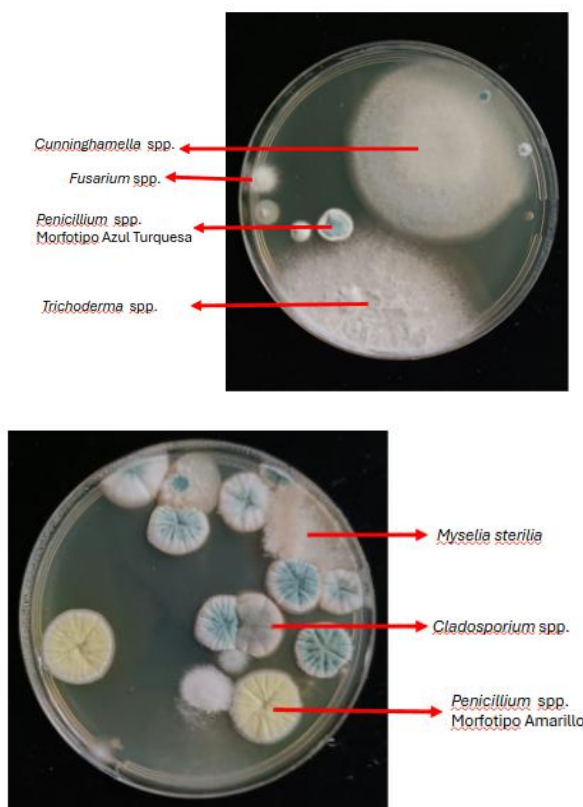


Ilustración 46. Muestras de hipogeos S5 después del saneamiento y A41 antes del saneamiento. Se indica la identidad de algunos de los ejemplares fúngicos que se desarrollaron en los medios de cultivo.

Con relación a los datos obtenidos, se logran identificar 6 géneros fúngicos, siendo mayormente reportados los géneros *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Cladosporium*, por otro lado, se destaca la presencia de *Trichoderma* spp., además de hongos agrupados como Oomycetes y *Mycelia sterilia*. A su vez, es notable la predominancia de ejemplares fúngicos sobre morfotipos bacterianos o levaduriformes. Estos ejemplares son en su mayoría asociados a componentes del ambiente que viajan o se encuentran suspendidas en las matrices de aire, donde las condiciones favorables como humedad y temperatura pueden activar su metabolismo y por ende favorecer la biocolonización.

Adicionalmente, se reporta la presencia de *Cunninghamella* spp., género de hongos que se aísla con frecuencia en suelo, almacenes de granos y sustratos orgánicos diversos. Puede ser considerado un patógeno oportunista, donde las especies *C. blankesleeana*, *C. echinulata* y *C. elegans* son patógenos poco comunes en pacientes inmunocomprometidos que pueden desarrollar un cuadro de mucormicosis (Ibrahim et al., 2023).

Los hongos son componentes naturales de la biosfera, coadyuvantes en la fijación de minerales y participación en diversos ciclos biogeoquímicos, su capacidad para descomponer, degradar y transformar sustancias orgánicas e inorgánicas justifica su gran importancia como agentes de biodeterioro en el entorno de patrimonio cultural. Sin embargo, también se destaca el potencial de

estos hongos como agentes involucrados en la calidad del suelo y por ende del ecosistema, así como su posible potencial en bioprospección.

Cabe recalcar que las esporas y conidios de estos géneros fúngicos se encuentran suspendidas en el aire interno del hipogeo a manera de unidad latente o bajo metabolismo, que le permite perdurar en el ambiente por largos periodos de temporales hasta que las condiciones sean propicias para su desarrollo y crecimiento. Por lo cual, la colonización se encuentra directamente relacionada con los factores ambientales y climáticos fluctuantes (corrientes de viento, fuentes de humedad, deposición de partículas orgánicas, temperaturas variables) así como la naturaleza física y química del soporte, la cual está en constante cambio debido a la meteorización y alteración abiótica (Gadd et al, 2024).

Por otro lado, los Altos presentan estudios microbiológicos como el realizado por Villalba en 2010 y en 2023, donde los géneros cultivables de mayor incidencia de biocontaminación fueron *Penicillium* spp., *Micelia esterilia*, *Cladosporium* spp., y *Aspergillus* spp., géneros de hongos que se logran correlacionar con los datos obtenidos para este proyecto.

Se integraron los datos reportados por Villalba (2010, 2012 y 2023) para compararlos con los resultados obtenidos en el presente estudio (Tabla 20). Este ejercicio permitió identificar tendencias en la composición microbiana de los hipogeos y evaluar la persistencia de ciertos agentes a lo largo del tiempo, aun cuando no todos los estudios incluyeron exactamente los mismos hipogeos.

En términos generales, el análisis confirma la presencia continua de agentes microbianos en el interior de los hipogeos. Aunque algunos hipogeos no coinciden entre proyectos, la comparación sí permite reconocer patrones de recurrencia en los géneros fúngicos identificados. En particular, se mantiene el predominio de hongos de géneros como *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Cladosporium*, que continúan figurando entre los microorganismos de mayor incidencia en estos ambientes subterráneos.

Alto	Hipogeo	Géneros de Microorganismos			
		(Villalba, 2010)	(Villalba, 2012)	(Villalba, 2023)	Actual (2026)
Aguacate	A36	-		-	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. Morf. Blanco 1 y 2 <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 y 2 y Blanco <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.
	A41	-		-	<i>Penicillium</i> spp. Morf. Amarillo <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 <i>Cladosporium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Trichoderma</i> spp. Oomycete Morf. 1 <i>Bacillus</i> spp.
Duende	D1	<i>Cladosporium</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp.	-

		<i>Penicillium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i>	<i>Penicillium</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Levaduras</i>	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Phoma</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Conidiobullus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.	
	D2	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Phoma</i> spp.	<i>Phoma</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i>	<i>Trichoderma</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Fusarium</i> spp. <i>Bipolaris</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	-
San Andrés	SA1	-		-	<i>Aspergillus</i> spp. Morf. Blanco 1 <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 2 <i>Mycelia sterilia</i> <i>Cladosporium</i> spp. <i>Cunninghamella</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.
	SA4	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Penicillium</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Mucor</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Botrytis</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.	-
	SA5	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Penicillium</i> spp.	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Aspergillus terreus</i>	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Penicillium</i> spp. <i>Chaetonium</i> spp. <i>Geotricum</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	-
	SA8	-		-	<i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 <i>Fusarium</i> spp. Morf. Amarillo 1 y 2 y Blanco <i>Mycelia sterilia</i> <i>Cladosporium</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.
Segovia	S1	-	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Fusarium</i> spp.	-	-
	S2	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Nigrospora</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i>	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Conidiobullus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Chaetonium</i> spp.	-

		<i>Rhizopus</i> spp.		<i>Bacillus</i> spp.	
S3		<i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Mucor</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Stachybotrys</i> spp. <i>Levaduras</i>	-	-
S4		<i>Cladosporium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Rhizomucor</i> spp.	-	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Phoma</i> spp. <i>Epicoccum</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.	-
S5	-	-	-	-	<i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 2 <i>Penicillium</i> spp. Morf. Amarillo <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. Morf. Blanco <i>Cunninghamella</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.
S7	-	-	-	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Phoma</i> spp. <i>Epicoccum</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Fusarium</i> spp.	-
S8		<i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i> <i>Phoma</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Rhizomucor</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Phoma</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp. <i>Epicoccum</i> spp. <i>Aureobasidium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	-
S9	-	-	-	<i>Phoma</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Epicoccum</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	-
S10		<i>Curvularia</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Desrhela</i> spp. <i>Artrobotrys</i> spp. <i>Mycelia sterilia</i>	-	-	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Cunninghamella</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 2 <i>Aspergillus</i> spp. Morf. Soles <i>Mycelia sterilia</i> <i>Bacillus</i> spp.

	S11	-	-	<i>Epicoccum</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Chaetonium</i> spp. <i>Bipolaris</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	Oomycete Morf. 2 <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 y Blanco <i>Fusarium</i> spp. Morf. Blanco y Amarillo 1 <i>Curvularia</i> spp. Mycelia sterilia
	S12	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Fusarium</i> spp. <i>Bipolaris</i> spp. Mycelia sterilia <i>Penicillium</i> spp.	<i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Bipolaris</i> spp. Phoma spp.	-	<i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 <i>Penicillium</i> spp. Morf. Amarillo <i>Aspergillus</i> spp. Morf. Soles <i>Bacillus</i> spp.
	S21	-	-	-	<i>Penicillium</i> spp. Morf. Azul 1 y 2 Oomycete Morf. 1 <i>Fusarium</i> spp. Morf. Blanco Mycelia sterilia <i>Bacillus</i> spp.
	S26	-	-	Phoma spp. <i>Epicoccum</i> spp. <i>Mucor</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Trichoderma</i> spp. <i>Bacillus</i> spp.	-

Tabla 20. Datos de microorganismos aislados de los hipogeos del Parque Arqueológico Tierradentro.

Se identifica que los hipogeos presentan una homogeneidad entre las comunidades microbianas. Sin embargo, géneros como *Cunninghamella*, *Curvularia*, *Botrytis*, *Desdrhela*, *Artrobotrys*, *Nigrospora* y *Aureobasidium* se pueden agrupar como ejemplares “raros” o ejemplares de frecuencia esporádica a poco recurrente. Esto posiblemente asociado a las condiciones climáticas del momento de la toma de muestras, corrientes de aire como vector inerte de esporas, actividades de intervención y visitas, además del uso del suelo circundante a los altos.

Es importante destacar que la mayoría de los géneros fúngicos acá reportados producen una serie de micotoxinas que según la Organización Mundial de la Salud pueden provocar cuadros clínicos de micotoxicosis, además del denominado Síndrome del edificio enfermo el cual abarca una sintomatología en vías respiratorias e irritación de mucosas (Villalba, 2010; Revelo et al, 2016).

En comparación con otros estudios, De La Rosa-García (2011) identifica a los géneros *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Cunninghamella*, *Fusarium*, *Beauveria* y *Penicillium* como los ejemplares de mayor recurrencia sobre monumentos de roca a lo largo del planeta. Además de ser componentes típicos del microbioma de los ecosistemas, los cuales son dispersados y movilizados por corrientes de aire o vectores biológicos.

En este caso, los Altos presentan condiciones que les permiten recambios de microbiotas constantes, dados por las corrientes de aire que pueden circular e ingresar a los cobertizos y posteriormente a los hipogeos; así como el constante flujo de personas que pueden ser vectores de esporas, que se adhieren por medio de diferencias de cargas electromagnéticas en la ropa o el calzado y que posteriormente pueden ser depositadas en las estructuras funerarias. A su vez materiales ajenos a los hipogeos como cercas de madera o materiales con componentes de celulosa como papel pueden ser receptores de estas esporas favoreciendo el foco de infección y el aumento de cargas microbianas (Villalba, 2010-2012-2023).

Manejo de zonas de biocolonización por material vegetal

Respecto al control de biocolonización por material fotosintético, se validó en la comisión de febrero, en el sitio de SA1 (columna derecha parte inferior) la efectividad de tres concentraciones 3%, 6% y 9% del producto Ácido Pelargónico, siendo la concentración de 3% adecuada para el control de las capas de biocolonización microbiana (Ilustración 47). Se estima que el ácido pelargónico actúa sobre las capas de las membranas celulares de las algas, en este caso de algas que se identifican como *Chlorella* spp.



A. Zona de tratamiento, se apreció un área con colonización de algas dada la exposición de la pilastra a las condiciones de luz constantes brindadas por la boca e ingreso al hipogeo.



B. Aplicación de tres concentraciones de biocida Ácido Pelargonio 3%, 6% y 9%. Método de aplicación, atomizador.



C. Evaluación de datos en comisión de marzo. Donde se observa que las tres concentraciones son efectivas frente a la reducción de colonización de algas.

Ilustración 47. Evaluación de tres concentraciones de ácido piroleñoso sobre la pilastra del hipogeo SA1. La cual presenta una biocolonización extendida en la cara frontal al ingreso a la bóveda. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

De acuerdo con las observaciones realizadas se decidió aplicar ácido pelargónico al 3% en la totalidad de la columna con el fin de reducir la colonización de algas (Ilustración 48). Se observó a las 72 horas

de aplicado el producto. Se observa una reducción de la tonalidad verde. Sin embargo, se recomienda una segunda aplicación o esto según el monitoreo posterior a la primera aplicación.



Ilustración 48. Pilastra correspondiente al hipogeo SA1, donde se aplicó biocida Acido pelargonio 3%, en dos oportunidades. Se evidencia una reducción de la biocolonización de las algas y tonalidad verdosa. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez y Ana Jaimes.

En cuanto a las raíces observadas al interior de los hipogeos, se evidenció que el ácido piroleñoso 6% y en sinergia con el biocida Alisín[®], pueden desvitalizar los tejidos radiculares. Por lo cual es una alternativa viable para el control (Ilustración 49).



Ilustración 49. Raíces con cambio de color indicativo de la acción de los biocidas. Se observa un color café claro en la sección de la raíz más cercana a la superficie del hipogeo, esta coloración indicativa de la muerte celular radicular. Las flechas señalan los fragmentos de raíz con cambio de coloración asociado a la viabilidad celular. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

Por otro lado, para la comisión de marzo se reportan intervenciones en el Hipogeo S18 (Tabla 21), en donde se realiza una remoción mecánica, manual de forma cuidadosa de raíces y lo que se clasifica

como el conjunto de raíces colonizadas por hongos. Esta remoción fue efectiva debido a la aplicación previa de biocida Alisín®.

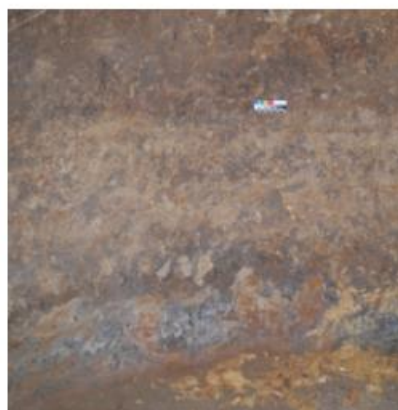
Alto	Hipogeo	Imagen	
Segovía	S18		
			

Tabla 21. Hipogeo S18 sobre el cual se llevaron a cabo procesos de saneamiento y control de agentes biológicos debido a su alta biocolonización

8.4 CONCLUSIONES

- El diagnóstico realizado en los hipogeos objeto de estudio confirmó la presencia de múltiples agentes de biocolonización, entre ellos artrópodos, material vegetal, algas, hongos y otros microorganismos, cuya ocurrencia está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales propias del sitio, especialmente la humedad, la ventilación limitada y la disponibilidad de sustratos susceptibles.
- Los resultados microbiológicos evidenciaron que los hipogeos mantienen una comunidad fúngica recurrente y relativamente homogénea, con predominio de géneros como *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Fusarium*, en concordancia con estudios previos realizados en

Tierradentro. Esto sugiere una persistencia temporal de estos microorganismos en el sistema hipogeo. Además de estos, se reporta a *Cunninghamella* como componente ambiental, pero en condiciones favorables puede llegar a presentar riesgo en la salud pública, esto debido a su calidad de patógeno oportunista, sin embargo, es necesario recalcar que los hongos oportunistas actúan en cuando un sistema inmune se ve comprometido, por lo cual se recomienda el uso correcto de equipos de protección personal, siendo un tapabocas N95 como el elemento clave para salvaguardar la salud de los visitantes y funcionarios.

- En condiciones in vitro la efectividad del Acido Piroleñoso 6% es del 100%, logrando una inhibición completa, reduciendo el crecimiento de hongos filamentosos con características de crecimiento rápido.
- La aplicación de ácido piroleñoso al 6% mostró una respuesta favorable en la reducción de la carga microbiana del aire interno, con porcentajes de disminución importantes en los hipogeos evaluados, por lo que se perfila como una alternativa útil dentro de las estrategias de saneamiento ambiental implementadas en este tipo de contextos.
- El uso de ácido pelargónico al 3% mostró resultados positivos en el manejo de biocolonización por algas y otros componentes fotosintéticos, evidenciando reducción de la tonalidad verdosa y afectación de la viabilidad de estas colonias en las zonas tratadas.
- Las observaciones posteriores a las intervenciones permitieron identificar que algunos eventos recientes de crecimiento microbiano podrían estar asociados a una combinación de factores, entre ellos aportes localizados de humedad, condiciones microambientales favorables, materiales empleados en intervención, circulación de partículas biológicas y dinámica ecológica propia del sitio.
- Elementos externos o añadidos, como cercas de madera, residuos orgánicos y algunos materiales introducidos durante las labores de intervención, continúan representando fuentes potenciales de nutrientes o reservorios de microorganismos, por lo que su presencia puede influir en la estabilidad biológica de los hipogeos.
- El flujo y tiempo de exposición de personas puede ser un parámetro clave en los eventos de crecimiento microbiano.
- En conjunto, los resultados confirman que el manejo de la biocolonización en los hipogeos de Tierradentro requiere una aproximación integral, en la que el saneamiento ambiental se realice siempre y cuando se realicen análisis de carga microbiana previa a la aplicación, para de esta manera reducir saneamientos masivos, incrementando limpiezas puntuales y controladas. Además de un constante monitoreo, control de fuentes de humedad, manejo cuidadoso de materiales y evaluación periódica de las condiciones del entorno.

8.5 RECOMENDACIONES

- Mantener un programa de monitoreo periódico microbiológico, ambiental y visual en los hipogeos intervenidos, con especial atención a aquellos que presentaron mayores cargas microbianas o eventos recientes de crecimiento biológico, como los hipogeos S11, s12 y SA1.
- Continuar evaluando el ácido piroleñoso al 6% como alternativa de saneamiento ambiental para el control de carga microbiana, especialmente en intervenciones donde se requiera reducir el riesgo biológico de forma puntual.

- Implementar el ácido pelargónico al 3% en zonas con colonización por algas, musgos y otros componentes fotosintéticos, acompañado de seguimiento posterior que permita definir la necesidad de nuevas aplicaciones.
- Reducir, en la medida de lo posible, los aportes de humedad durante las intervenciones, especialmente en procedimientos que impliquen hidratación previa, inyección de morteros o uso de materiales con alta retención de agua.
- Priorizar el reemplazo progresivo de cercas y elementos de madera deteriorados, o en su defecto aplicar medidas de protección e inmunización que reduzcan su papel como fuente de contaminación o sustrato biológico.
- Evitar dejar al interior de los hipogeos materiales ajenos al contexto, como papeles, cintas adhesivas u otros elementos de base celulósica o alta reactividad, ya que pueden favorecer la deposición y desarrollo de colonias microbianas.
- Considerar tiempos de descanso entre jornadas de intervención, de manera que se reduzca la alteración microambiental al interior de los hipogeos y se minimice la acumulación de humedad y calor derivados de la presencia prolongada del personal.
- Fortalecer el uso de elementos de protección personal, en especial mascarillas N95 y overoles, durante labores de intervención y monitoreo, como medida preventiva frente a la exposición a esporas y material particulado biológico.

8.6 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Profundizar en estudios sobre la dinámica ecológica y microbiológica de los hipogeos, con el fin de comprender mejor la interacción entre ambiente, materiales, intervenciones y procesos de biocolonización.
- Desarrollar investigaciones que permitan reestablecer el equilibrio ecológico ante eventos de biocolonización
- Continuar incentivando el uso de biocidas naturales para el control de biocolonización.

9. INVESTIGACIÓN DE MATERIALES PARA LA INTERVENCIÓN DE LOS HIPOGEOS

Una vez estudiados los hipogeos y con la claridad de que en la intervención se requería realizar procesos para abordar zonas inestables del soporte pétreo y la pintura mural con desprendimientos, fisuras, fracturas, grietas, disgregación y descamación y que además era necesario reforzar estructuralmente elementos como pilares y pilastras, se emprendieron una serie de estudios. Estos buscaron determinar las formulaciones de los morteros de inyección y de resane, morteros estructurales, consolidantes y adhesivos requeridos para el tratamiento de los deterioros antes mencionados y se presentan en las siguientes líneas.

9.1 MORTEROS DE INYECCIÓN

Introducción

Para hacer la estabilización de zonas inestables en el soporte pétreo y la pintura mural de los hipogeos más afectados en Tierradentro era necesario hacer uso de un mortero de inyección, esta solución planteada desde 2019 por la restauradora Clemencia Vernaza, establecía que dicho mortero tenía que ser lo más similar a la toba y por tanto estar elaborado con materiales que se encontraran en la zona. La investigación desarrollada por Vernaza presentaba la metodología para lograr una formulación efectiva. Las pruebas con dicho mortero desarrolladas en una zona del hipogeo S12, reportadas en 2020 (Bateman et al; 2020) y que pueden hoy verse in situ, muestran la buena la efectividad del mortero de inyección para estabilizar tanto zonas de la roca frágil, con disyunción en lajas, grietas y fisuras como zonas desprendidas en la pintura mural donde se aprecian galerías de insectos, grietas y fracturas. En este proyecto se buscó repetir dicha formulación, sin embargo, en tanto el lugar exacto de la extracción de las tierras que conforman dicho mortero no era del todo precisa, fue necesario implementar la metodología del estudio de Vernaza (2019) haciendo uso de las tierras colectadas en esta ocasión. Este estudio presenta la evaluación del comportamiento reológico y físico-mecánico de diversas fórmulas experimentales de morteros de inyección con el fin de determinar su viabilidad para la estabilización del soporte y la pintura mural en hipogeos en estado crítico del Parque Arqueológico de Tierradentro. La metodología implementada coincide con lo establecido por Vernaza (2019) en su estudio. El mortero de inyección desarrollado por dicha restauradora para el Hipogeo del Alto de Segovia S12 sirve como referencia para ajustar la compatibilidad y el desempeño de materiales destinados a la conservación de sustratos volcánicos.

Metodología

Los morteros estudiados utilizan como componentes principales tobas volcánicas extraídas del Alto de Segovia y del Alto del Aguacate, junto con tierras arcillosas provenientes del Alto de San Andrés y del Alto del Duende que fueron debidamente tamizadas. Al mezclarlas se lograron ocho variaciones, cinco de mortero y tres de micromorteros, con las cuales se hicieron las pruebas de inyectabilidad, fluidez, contracción, adhesión y rezumo sobre maquetas (superficies de toba extraída del Alto de Segovia) que se ubicaron dentro del hipogeo S12 para tener las mismas condiciones

medioambientales que tendrán los morteros al aplicarse. Lo anterior, buscando asegurar el buen comportamiento de las formulaciones seleccionadas al momento de devolver la estabilidad a los materiales constitutivos de los hipogeos.

A continuación, se presenta el listado y composición de las fórmulas evaluadas:

Fórmulas evaluadas:

Formula No 1		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (75 micras)	2	80g
Tierra arcillosa - Duende (250 micras)	0.5	13g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 5ml	85g

Fórmula No 2		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Aguacate (250 micras)	2	136.61g
Tierra arcillosa - San Andres (250 micras)	0.5	8.76g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g

Fórmula No 3		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (75 micras)	2	82.9g
Tierra arcillosa - San Andrés (75 micras)	0.5	22.14g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½	80g

Fórmula No 3.1 (micro - mortero)		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (75 micras)	2	82.9g
Tierra arcillosa - San Andrés (75 micras)	0.5	22.14g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 10 ml	90g

Fórmula No 4		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Aguacate (75 micras)	2	114.40g
Tierra arcillosa - Duende (250 micras)	0.5	16.71g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 25ml	105g

Fórmula No 5		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (250 micras)	2	116.29g
Tierra arcillosa - San Andrés (75 micras)	0.5	22.68g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 12ml	92g

Fórmula No 6		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (250 micras)	1.5	97g
Tierra arcillosa - San Andrés (250 micras)	1	50.41g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 12ml	92g

Fórmula No 7		
Componente	Proporción	Peso
Toba - Segovia (250 micras)	1.5	97g
Tierra arcillosa - San Andrés (75 micras)	1	22.16g
Microesferas de vidrio 3M - K1	3	12g
Genapol	2-mar	2g
Agua	1 ½ + 13ml	93g

Resultados

En las tablas a continuación, se presenta la hora y condiciones de humedad relativa y temperatura bajo las cuales se desarrollaron las distintas pruebas y las observaciones realizadas. Luego los resultados se resumen en la tabla expuesta en tabulación de resultados:

- **Prueba # 1 Inyectabilidad**

Fórmula No.1					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
25/11/2025	10:00 a. m.	62.5	23.5	P	Posible
25/11/2025	11:00 a. m.	63.2	22.1	P	Posible
25/11/2025	12:00 p. m.	63.9	22.7	I	Imposible, no fluye con la aguja y pasa de forma muy forzada con una sonda de 6 mm

Fórmula No.2					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
26/11/2025	9:49 a. m.	60.7	25.6	I	Imposible: pese a las variaciones y la humedad agreda el mortero no fluye por la jeringa.

Fórmula No.3					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
26/11/2025	10:53 a. m.	88.0	21.8	F	Fácil
26/11/2025	1:00 p. m.	76.9	22.3	P	Posible
26/11/2025	5:00 p. m.	75.7	20.5	P	Posible
27/11/2025	9:00 a. m.	60.4	26.2	P	Posible, con dificultad, no pasa por aguja únicamente por sonda
27/11/2025	11:10 a. m.	67.4	26.2	D	Difícil

Fórmula No.3.1 (micro - mortero)					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
26/11/2025	3:00 p. m.	66.1	25.8	F	Fácil
26/11/2025	4:00 p. m.	63.4	23.7	F	Fácil
26/11/2025	6:00pm	72.3	22.1	P	Posible
27/11/2025	9:40 a. m.	66.9	25.5	D	Difícil, pese a haber transcurrido 20 horas tras la preparación, aún pasa por la jeringa y sonda, sin embargo, su aplicación se torna difícil.

Fórmula No.4					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
26/11/2025	1:18 p. m.	70.3	25.9	D	Difícil
26/11/2025	3:00 p. m.	72.5	23.7	I	Imposible pasar por la aguja, sin embargo, con una sonda de calibre 10 pasa.
26/11/2025	5:00 p. m.	65.6	24.5	I	Imposible pasar por la aguja, sin embargo, con una sonda de calibre 10 pasa.
27/11/2025	9:31 a. m.	50.6	28.9	I	Imposible pasar por la aguja, sin embargo, con una sonda de calibre 10 pasa.

Fórmula No.5 (micro mortero)					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
27/11/2025	1:12 p. m.	52.3	30.3	P	Posible
27/11/2025	2:22 p. m.	47.6	30.2	D	Difícil
27/11/2025	6:00pm	69.8	23.6	D	Pasa por sonda, pero para pasar con aguja se debe ejercer excesiva presión

Fórmula No.6 (micro mortero)					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
27/11/2025	2:30pm	49	30.3	P	Posible
27/11/2025	5:30 p. m.	56	23.8	D	Difícil

27/11/2025	6:30 p. m.	64.7	24.8	D	Difícil, se debe ejercer una fuerza considerable para que el mortero fluya
------------	------------	------	------	---	--

Fórmula No.7					
Fecha	hora	HR	T	Clasificación	Observaciones
27/11/2025	3:30 p. m.	56	29.3	P	Posible
27/11/2025	6:30 p. m.	64.7	23.8	P	Posible
27/11/2025	7:30 p. m.	71.2	20.8	D	Difícil, se debe ejercer fuerza para poder inyectar

Clasificación

Imposible (I): El mortero no pasa por la aguja

Difícil (D): Si la presión para que el mortero pase por la aguja es extrema y el tiempo de paso es mayor a 15 segundos

Posible (P): Si se requiere cierta presión para que el mortero pase por la aguja y el tiempo de paso es entre 5 y 15 segundos

Fácil (F): Si con una presión "normal" el mortero pasa por la aguja y el tiempo de paso es menor a 15 segundo

• Prueba # 2 Flujo en maqueta

Ficha de consignación de datos de flujo en la maqueta					
Fecha	Fórmula No.	HR%	T °C	Clasificación	Observaciones
25.11	1	51.8	27.7	B	Recorrió 2.7cm, la prueba fue realizada en una probeta de madera.
26.11	2	N/A	N/A	N/A	No se realizó la prueba porque la fórmula no pasó la prueba No.1 (inyectabilidad)
26.11	3	82.2	22.1	B	Recorrió 4,7 cm sobre una superficie de toba humectada.
26.11	3.1	67.8	23.4	A	Recorrió 21 cm sobre una superficie de toba humectada.
26.11	4	58.9	24.5	A	Recorrió 13 cm sobre una superficie de toba humectada.
27.11	5	52.3	30.6	M	Recorrió 5.5 cm en superficie de toba humectada, los últimos 2 ml fluyeron aplicando mayor presión en la jeringa
27.11	6	47.7	30.4	B	Recorrió 2.9cm
27.11	7	50.4	31.6	B	Recorrió 4.3 cm

Clasificación

Bajo (B): si el mortero fluye a una distancia inferior a 5 cm. Medio (M): si el mortero es fluye una distancia mayor a 5 cm, pero menor a 10 cm. Alto(A): Si el mortero fluye a una distancia mayor a 10cm

• Prueba #3 Contracción al secado

Ficha de consignación de contracción al secado							
Fecha	#	HR	T	Medida fisura perimetral (mm)	Medida de mayor tamaño de fisura al interior de la muestra mm	Clasificación	Observaciones

25.11	1	51.2	28.8	0.2mm	25mm	CM	Tiene una contracción media, acompañada de una grieta que se extiende al borde del mortero de muy pequeño grosor. Se puede evidenciar que en general el mortero tiene una superficie homogénea, sin figuras céntricas,
26.11	2	60.3	23.1	N/A	N/A	N/A	N/A
26.11	3	57.1	25.3	0.2mm	23mm	CM	Presenta una contracción media, con comportamiento similar al mortero 1, en donde la fisura se evidencia de forma perimetral.
26.11	3.1	77.0	23.9	0	0	SC	Tiene una leve contracción, menor a 0.5mm y una superficie homogénea sin fisuras.
26.11	4	65.4	23.8	0	0	SC	Presenta una contracción leve, sin fisuras internas ni perimetrales. Se observa que su consistencia permanece aireada.
27.11	5	59.5	29.1	0.1mm	0	CM	Contracción media, la cual es más evidente que en los morteros anteriores. En cuanto a su color refleja la variedad cromática de las tierras utilizadas en la mezcla.
27.11	6	56.8	30.9	0.1mm	0	CM	Esta presenta una textura superficial irregular, en donde, la contracción es notoria, sin embargo, no presenta fisuras internas o perimetrales. La cromaticidad de la mezcla presenta características similares a la mezcla no.5.
27.11	7	55.9	28.6	0.1mm	0	CM	Esta presenta una textura superficial irregular con grano visible, en donde, la contracción no es muy notoria pero visible, aun así, no presenta fisuras internas o perimetrales que puedan señalar una mala funcionalidad del mortero.

Clasificación

SC : Sin contracción: por secado si no hay separación visible entre el mortero de inyección y de la cavidad de la maqueta y sin fisuración visible al interior de la muestra.

CM: Contracción de secado media- una separación de menos de 0.5mm entre el mortero de inyección y la cavidad de la maqueta y/o fisuras de un tamaño 0.5mm al interior de la muestra.

CA: Contracción de secado alta- si hay una separación de más de 0.5mm entre el mortero de inyección y de la cavidad de la maqueta y/o un tamaño de grietas de más de 0.5mm en el interior de la muestra

• Prueba # 4 adhesión inicial y final

Ficha de calificación de la adhesión inicial				
Fecha	Fórmula No.	HR%	T °C	Clasificación
25.11.25	1	51.2	28.8	Difícil separación
26.11.25	2	N/A	N/A	El mortero fue descartado en la prueba No.1
26.11.25	3	51.7	29.1	Difícil separación

26.11.25	3.1	67.8	21.3	Difícil separación
26.11.25	4	56.8	25.6	Difícil separación
27.11.25	5	49.9	30.3	Difícil, no se separa con facilidad y se puede sujetar una de las partes sin desprender la otra.
27.11.25	6	48.8	30.5	Difícil separación
27.11.25	7	47.6	31.6	Difícil, se puede sujetar de una de las partes realizando prueba de gravedad y se mantiene adherido.

Ficha de clasificación adhesión final			
Fecha	Fórmula No.	Clasificación	Observaciones
26.11.25	1	Media	Requirió de una fuerza significativa para separar los fragmentos, sin embargo, no fue necesario emplear la misma fuerza que para el mortero No3 y No.5. Al separar las dos caras se observó que el mortero se fragmentó y se separó de las superficies casi en su totalidad.
—----	2	N/A	No se realizó la prueba debido a que fue descartado desde la prueba No.1
27.11.25	3	Difícil	Si bien fue clasificada como difícil, es importante señalar que se requirió la aplicación de una gran cantidad de fuerza para poder separar las partes, hasta el punto de poder clasificarse como muy difícil. Una vez separada se evidencio que el mortero se mantuvo intacto en uno de los fragmentos de toba empleados.
27.11.25	3.1	Media	Los dos fragmentos se separaron al ejercer una fuerza media.
27.11.25	4	Media	Se ejerció una fuerza moderada para separar las dos superficies.
28.11.25	5	Difícil	La separación requirió de una fuerza significativa para separar las dos superficies, a un nivel similar a la fórmula No3. Al separar se pudo evidenciar que el mortero se distribuye de forma similar en cada cara del sandwich.
28.11.25	6	Fácil	Fácil: el elemento se separó en cuanto se levantó de la superficie
28.11.25	7	Difícil	Fue necesario hacer fuerza alta para poder separar los fragmentos

Clasificación

Difícil: Separación con fuerza moderada: si requiere de una cierta fuerza para separar los dos fragmentos

Media: Separación con poca fuerza

Fácil: Separación de las dos caras con fuerza nula, es decir no hay adherencia entre las caras.

Tabulación de datos

F	Inyectabilidad	Fluidez	Contracción	Adhesión inicial	Adhesión final	Rezumo
1	Posible	Bajo	Media	Difícil	Media	Sin rezumo
2	Imposible	N/A	N/A	Difícil	N/A	Sin rezumo
3	Fácil	Bajo	Media	Difícil	Difícil	Sin rezumo
3.1	Fácil	Alto	sin contracción	Difícil	Fácil	Sin rezumo
4	Difícil	Alto	sin contracción	Difícil	Media	Sin rezumo
5	Posible	Medio	Media	Difícil	Difícil	Sin rezumo
6	Posible	Bajo	Media	Difícil	Fácil	Sin rezumo
7	Posible	Baja	Media	Difícil	Difícil	Sin rezumo

Tabla 22. Resultados obtenidos para la inyectabilidad, fluidez, contracción, adhesión y rezuma de fórmulas de morteros evaluados

Conclusiones

El análisis comparativo de las siete formulaciones de morteros de inyección evidencia que las propiedades de fluidez, inyectabilidad, contracción y adhesión están directamente condicionadas por la granulometría y densidad de las tierras utilizadas. Las mezclas con mayor fluidez (F3.1 y F4), asociadas a mayores contenidos de agua, mostraron una reducción en la adhesión final, lo que sugiere que el incremento del flujo compromete la capacidad de anclaje del mortero en el sustrato. Este comportamiento se hizo evidente en la tabla, donde las formulaciones más fluidas presentaron adhesiones iniciales difíciles y adhesiones finales solo medias o bajas.

La combinación de tierras Segovia (75 μm) + San Andrés, empleada en las formulaciones F3 - F3.1 y F7, demostró un desempeño particularmente favorable. Estas mezclas lograron el mejor equilibrio entre inyectabilidad, baja contracción y estabilidad durante el secado, sin presentar rezumo. Las tobas de Segovia, caracterizadas por su menor densidad en seco y húmedo, contribuyeron significativamente a mejorar la inyectabilidad y el comportamiento general de las formulaciones.

Asimismo, las tierras más gruesas (250 μm) tendieron a producir morteros más compactos y con mayor dificultad de inyección, tal como se observa en formulaciones con inyectabilidad “difícil” o “imposible”. Esto confirma la influencia directa de la granulometría en el desempeño reológico y en la capacidad del mortero para penetrar microfisuras.

En conjunto, los resultados permiten definir parámetros clave para el desarrollo de una formulación óptima: un flujo suficiente para garantizar la inyectabilidad sin comprometer la adhesión final, una contracción mínima durante el secado y la ausencia de rezumo. Este balance es especialmente relevante para aplicaciones en zonas con pintura mural, donde la estabilidad y compatibilidad del mortero son determinantes para un tratamiento de conservación eficaz.

Criterios técnicos para la selección de un mortero.

La selección de una fórmula sobre otra está determinada por la necesidad de la zona a intervenir, es decir si se requiere mayor penetrabilidad se debe emplear un mortero con una alta fluidez que haya superado las pruebas de adherencia inicial y final, por ejemplo la aplicación del mortero F3 o F3.1; si por el contrario lo que se busca es tener una muy alta adherencia y ocupación de volumen se deberá acudir a morteros como el F7 que dada su composición está destinado a llenar vacíos sin recorrer grandes distancias, en esta medida dicho mortero también se presenta como una excelente opción para grietas o diaclasas.

La fuerza de la gravedad también es un factor clave para elección del mortero, por ejemplo, para las bóvedas se busca un mortero que no adicione peso de forma significativa, tenga buena adherencia y una fluidez media para evitar derramamientos. En estos casos el mortero F3 resulta la mejor elección.

Recomendaciones para la preparación del mortero y aplicación

Control de la espumación del tensoactivo

Se recomienda incorporar el Genapol únicamente después de que la mezcla haya sido humectada y completamente homogeneizada. Este procedimiento minimiza la formación de espuma y reduce la presencia de aire atrapado, favoreciendo un comportamiento más estable del mortero durante la inyección.

Conservación y trabajabilidad del mortero

Para prolongar la trabajabilidad de la mezcla durante la intervención, se sugiere mantener el recipiente cerrado y cubrir la superficie del mortero con una lámina plástica ligeramente humectada mediante aspersión. Esta medida evita la pérdida prematura de humedad y mantiene la consistencia adecuada por más tiempo.

9.2 MORTEROS DE RESANES

Introducción

Para poder hacer el cierre de galerías, grietas y fracturas era necesario contar con una formulación de mortero de resane. El siguiente documento presenta los resultados de las pruebas de mortero de resane, en cuanto a diferentes mezclas preparadas y sus diferentes características.

El objetivo de las pruebas es evaluar el comportamiento de las diferentes mezclas en cuanto a adherencia, color, contracción y pulverulencia, para su aplicación en las zonas que requieren estabilización del soporte pétreo en áreas de fracturas y grietas de dilatación amplia y de mayor profundidad.

Se prepararon once mezclas, los componentes principales de estos once morteros estudiados corresponden a tobas volcánicas extraídas de los cuatro altos del Parque Arqueológico de Tierradentro - PAT: Alto de Segovia, Alto del Aguacate, Alto de San Andrés y Alto del Duende. Las tobas de estos dos últimos altos resultan ser tierras más arcillosas, por lo que fueron utilizadas como componentes aglomerantes en las diferentes recetas. En todos los casos se agregó agua a las mezclas.

Estas pruebas fueron adaptadas para el caso, de aquellas desarrolladas por la restauradora Clemencia Vernaza para la Iglesia de Kuñotambo, Perú y que aparecen referenciadas en el Protocolo para la evaluación de acabados (Vernaza, 2021).

Metodología

Con el fin de evaluar la apariencia, la durabilidad y la capacidad de adherencia de diferentes mezclas, se realizaron once fórmulas con las tierras de los cuatro altos cernidas a 250µm, haciendo tres variaciones en cuanto a proporción, así: árido: aglomerante: 1:1, 2:1 y 3:1. De esta forma, se analizaron las características sobre pequeñas probetas de aproximadamente 1,5x1,5x0,5 cm, así como en aplicaciones de prueba en una pieza de toba y en zonas puntuales en los hipogeos S10, S11 y S12.



Ilustración 50. Once probetas de mortero, M1 - M11, en orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. A la derecha, el trozo de toba con las diferentes aplicaciones.

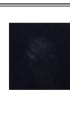
Para evaluar la pulverulencia-cohesión de las fórmulas se llevaron a cabo sobre las probetas las pruebas de la cinta adhesiva (scotch tape test) y de la cinta de tela; para aplicar la primera de estas pruebas, se utilizó una cinta de enmascarar que se adhirió a cuatro caras de cada probeta y se procedió a calcular la diferencia del peso entre la cinta antes y después de su adherencia a la muestra. Para la prueba de la cinta de tela se realizó el frotado alrededor de las seis caras de la probeta.

Para evaluar la adherencia, color y contracción se hizo la inspección visual y de tacto tanto en las probetas como en las aplicaciones. Tanto la selección de tierras como la preparación de mezclas, probetas y evaluación de características fue desarrollada por la restauradora Laura del Pino y Camilo Betancur con asesoría de Clemencia Vernaza.

Resultados

En la tabla anexa se exponen los resultados que relacionan el tipo de mezcla con características como color, contracción, cohesión y adherencia.

COMPORTAMIENTO PRUEBA DE MORTERO DE RESANE														
FÓRMULA						CARACTERÍSTICAS								
No. mortero	Árido - Toba 250μ		Aglomerante - Tierra arcillosa 250μ		Relación	Color/tonalidad	Contracción (presencia de craqueladuras)				Cohesión		Adherencia	Conclusiones
	Segovia	Aguacate	Duende	San Andrés	Partes		Prueba aplicada en trozo de toba		Probeta		Prueba cinta adhesiva - Diferencia en g	Prueba frontado de cinta de tela	Prueba aplicada en trozo de toba	
M1	X		X		1:1	Marrón-rojizo		Alta		Baja	0,00		Buena	Contracción alta en la aplicación. Alta cohesión. Buena adherencia.
M2		X		X	1:1	Grisáceo claro		Media		Baja	0,01		Buena	Contracción en la aplicación. Cohesión media-alta Buena adherencia.
M3	X	X	X	X	1:1:1:1	Beige-rojizo		Media		Baja	0,00		Buena	Contracción en la aplicación. Alta cohesión. Buena adherencia.

M4	X		X	2:1	Marrón-rojizo		Media		Baja	0,00		Buena	Contracción en la aplicación. Alta cohesión. Buena adherencia.
M5	X		X	3:1	Beige - rojizo		Media		Ninguna	0,00		Buena	Contracción en la aplicación. Alta cohesión. Buena adherencia.
M6		X		X	Grisáceo claro		Baja		Ninguna	0,00		Buena	Contracción baja en la aplicación. Cohesión media-alta Buena adherencia.

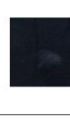
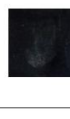
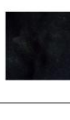
COMPORTAMIENTO PRUEBA DE MORTERO DE RESANE														
FÓRMULA						CARACTERÍSTICAS								
No. mortero	Árido - Toba 250μ		Aglomerante - Tierra arcillosa 250μ		Relación	Color/tonalidad	Contracción (presencia de craqueladuras)			Cohesión		Adherencia	Conclusiones	
	Segovia	Aguate	Duende	San Andrés	Partes		Prueba aplicada en trozo de toba		Probeta	Prueba cinta adhesiva - Diferencia en g	Prueba frontado de cinta de tela	Prueba aplicada en trozo de toba		
M7		X		X	3:1	Grisáceo claro		Baja		Baja	0,01		Buena	Contracción baja en la aplicación. Cohesión media-alta. Buena adherencia.
M8	X			X	2:1	Beige-grisáceo claro		Alta		Baja	0,00		Buena	Contracción alta en la aplicación. Alta cohesión. Buena adherencia.
M9	X			X	3:1	Beige-grisáceo		Alta		Baja	0,03		Buena	Contracción alta en la aplicación. Cohesión media - alta. Buena adherencia.
M10		X	X		2:1	Marrón		Baja		Se fragmentó. Superficie sin craqueladuras	0,01		Buena	Contracción baja en la aplicación. Cohesión alta. Buena adherencia.
M11		X	X		3:1	Marrón claro		No presenta		Ninguna	0,01		Buena	Sin contracción en la aplicación. Cohesión media-alta. Buena adherencia.

Ilustración 51. Caracterización de 12 mezclas de mortero, sobre su color, contracción, cohesión y adherencia.

Aportes sobre las aplicaciones puntuales en los hipogeos del Alto de Segovia

Como se mencionó, se realizaron pequeñas pruebas de aplicación directamente en los hipogeos S10, S11, y S12. A continuación se describe su localización dentro de los tres hipogeos, las fórmulas aplicadas y las observaciones para cada caso.

Fórmula M1:

- Hipogeo S10 - Bo3



Ilustración 52. Hipogeo S10 – Bo3

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

- Hipogeo S11 - PL5



Ilustración 53. Hipogeo S11 – PL5

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad muy oscura y rojiza para su integración cromática óptima en la zona. Sin anomalías en superficie.

- Hipogeo S12 - PL6



Ilustración 54. Hipogeo S12 – PL6

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad oscura y rojiza para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M2:

- Hipogeo S12 - PL6

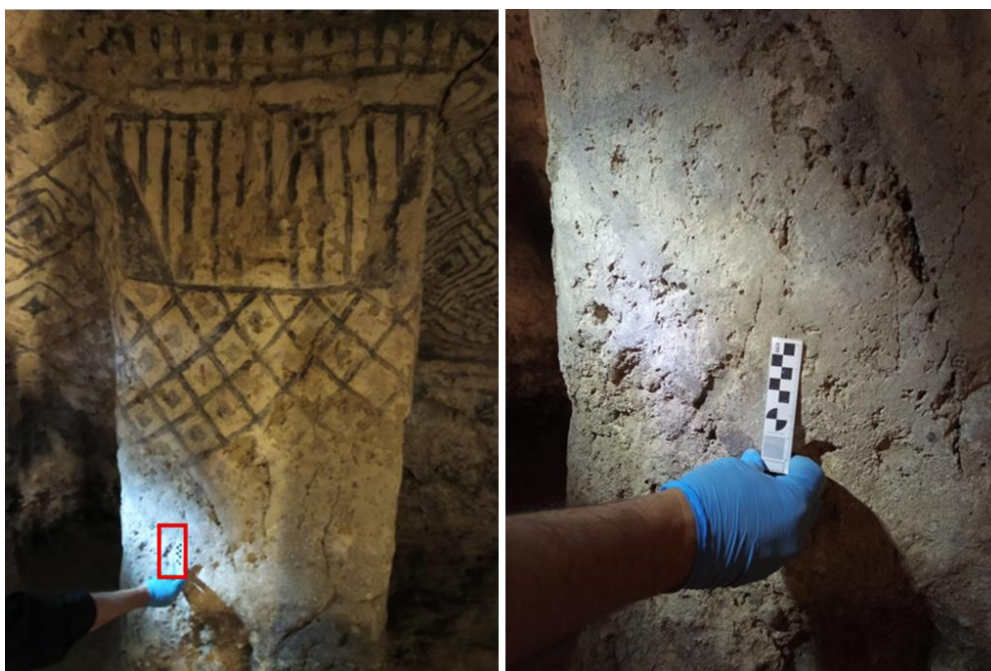


Ilustración 55. Hipogeo S12 – PL6

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M3:

- Hipogeo S11 - PL5



Ilustración 56. Hipogeo S11 – PL5

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

- Hipogeo S11 - P2C

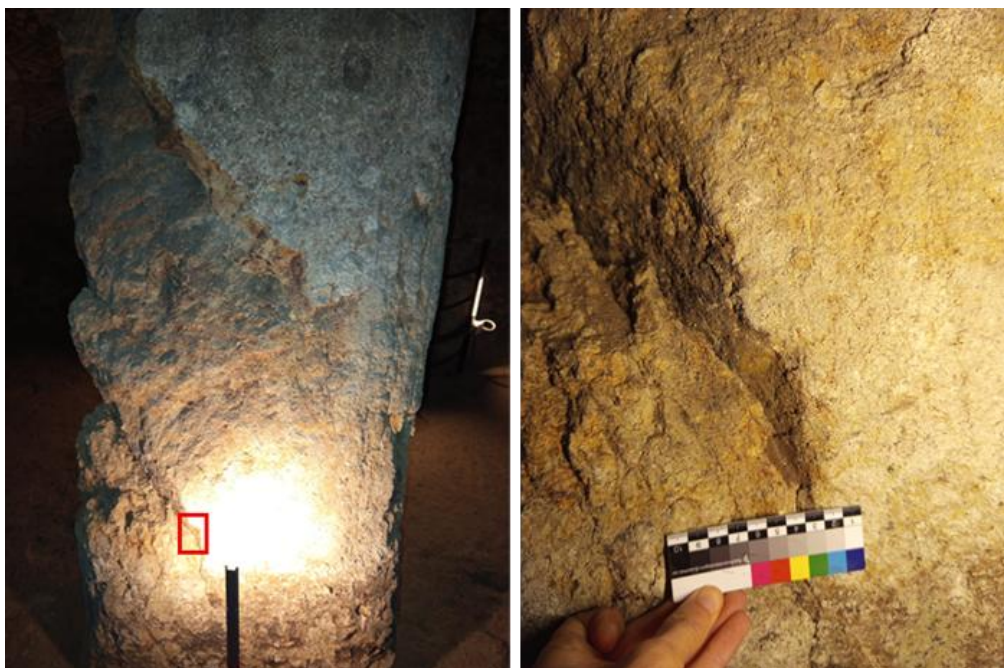


Ilustración 57. Hipogeo S11 – P2C

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad oscura y muy rojiza para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M4:

- Hipogeo S11 - P2C



Ilustración 58. Hipogeo S11 – P2C

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad oscura y muy rojiza para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M5:

- Hipogeo S10 - P2C

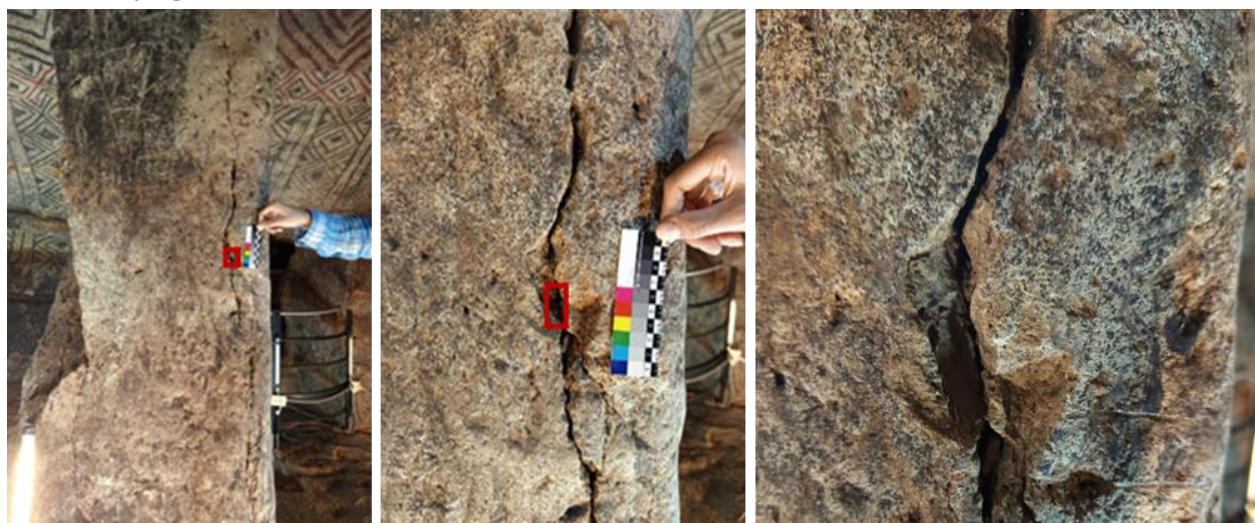


Ilustración 59. Hipogeo S10 – P2C

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M6:

- Hipogeo S12 - PL5

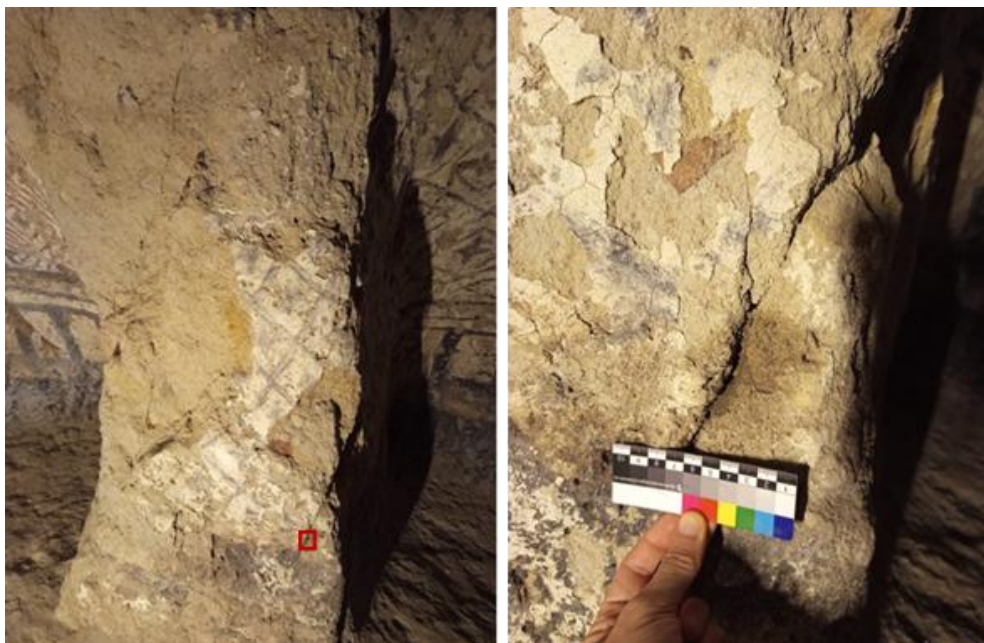


Ilustración 60. Hipogeo S12 – PL5

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad muy oscura para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M7:

- Hipogeo S12 - N6A



Ilustración 61. Hipogeo S12 – N6A

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

Fórmulas M8 (recuadro rojo superior) y M9 (recuadro rojo inferior):

- Hipogeo S10 - P2C



Ilustración 62. Hipogeo S10 – P2C (Recuadro rojo superior Fórmula M8 y recuadro rojo inferior Fórmula M9)

Observaciones: Buena adherencia. Buena integración cromática. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M10:

- Hipogeo S11 - P1B

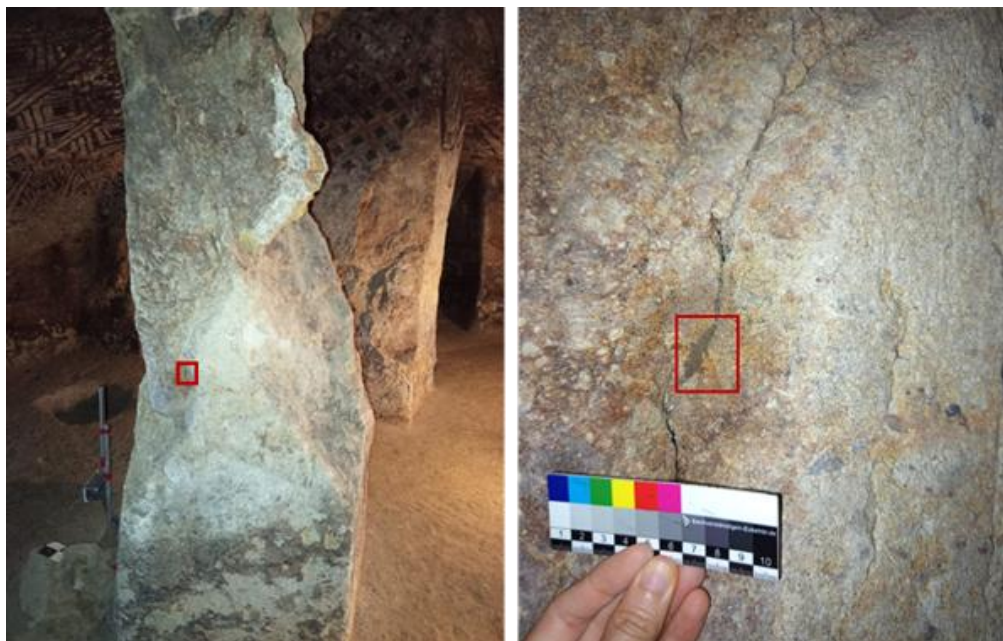


Ilustración 63. Hipogeos S11 – P1B

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad muy oscura para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Fórmula M11:

- Hipogeo S11 - P1B

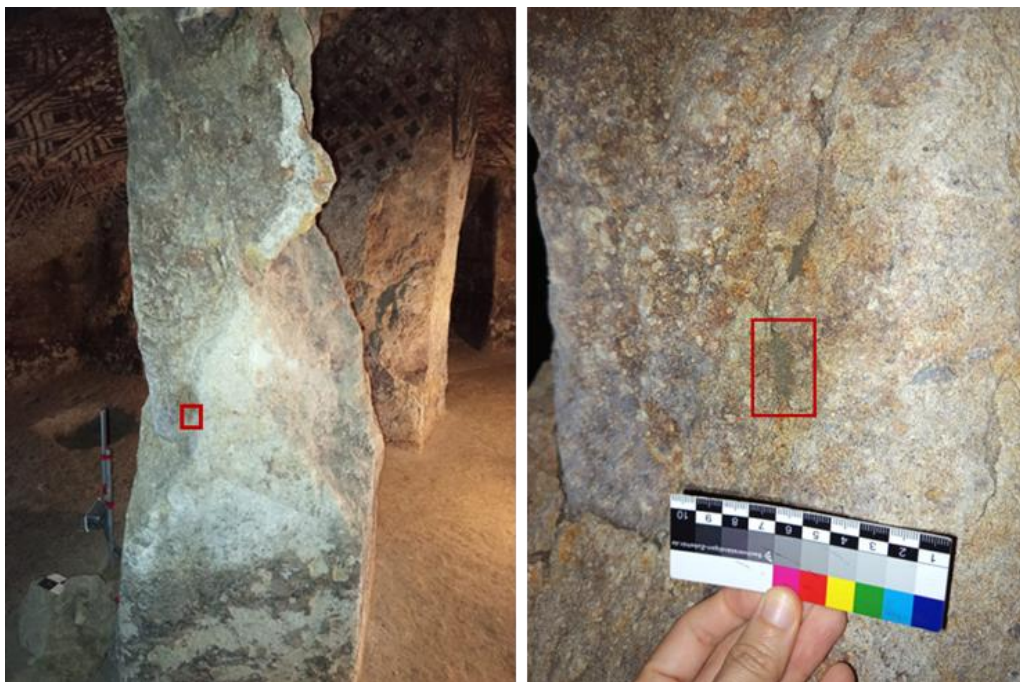


Ilustración 64. Hipogeos S11 – P1B

Observaciones: Buena adherencia. Tonalidad muy oscura para su integración cromática óptima. Sin anomalías en superficie.

Conclusiones

- Las tierras que presentan una tonalidad más pálida son las del Alto del Aguacate y el Alto de San Andrés; la mezcla resultante entre estas dos produce un gris claro, y la variación en la cantidad de partes genera diferentes matices dentro de este espectro cromático.
- Las tierras que presentan tonalidades más coloradas son las del Alto de Segovia y el Alto del Duende; la mezcla de estas dos tierras resulta en tonos marrón rojizo, y la diferencia en las proporciones deriva en tonalidades más claras u oscuras dentro de esta gama.
- La adherencia de los once morteros fue buena, tanto en la aplicación sobre la pieza de toba como en los hipogeos.
- La cohesión fue buena en todos los morteros; mediante la aplicación de cinta adhesiva sobre las probetas se observó que el cambio de peso fue muy pequeño. De igual forma, en las pruebas con cinta de tela negra se evidenció poca pérdida de material y, en todos los casos, los resultados corresponden a la imagen No. 8 de esta prueba.
- La evaluación de la contracción, realizada tanto en las probetas como en las aplicaciones puntuales en los hipogeos, resultó disímil en ambos escenarios. Las aplicaciones en la pieza de toba presentaron craqueladuras de diferente intensidad, a excepción del mortero M11. Sin embargo, en las aplicaciones dentro de los hipogeos el comportamiento mostró homogeneidad en la superficie. Es posible que la aplicación en el trozo de toba tuviera un contenido superior de agua, al haber sido preparada recientemente.

- Teniendo en cuenta que el comportamiento de las diferentes fórmulas fue bueno, se discutieron las posibles mejoras a implementar durante la intervención, y se concluyó que se emplearían las mezclas con menor cantidad de aglomerante (3:1) para disminuir levemente el poder adherente de las fórmulas sobre la roca, conservando, sin embargo, esta característica. Esto se definió considerando que algunas zonas de los hipogeos pueden presentar mayor fragilidad por descamación y disgregación.
- El acabado logrado con las tierras cernidas a 250 µm es liso. Es probable que puedan utilizarse las fórmulas sin necesidad de cernir, o mezcladas con trozos de toba, en las zonas que requieran mayor relleno o un acabado rugoso.

Recomendaciones para aplicación de morteros para resanes perimetrales

1. Examinar al tacto la zona a resanar. Se deben analizar los siguientes aspectos:

- Si existe disgregación o descamación, se debe proceder a la consolidación con Wacker OH aplicado mediante spray y esperar su secado.
- Si se encuentra húmeda, una vez preparada la pasta de resane, aplicarla directamente.
- Si se encuentra seca y sin disgregación, una vez preparada la pasta de resane y previo a su aplicación, aplicar agua-alcohol mediante el uso de un aspersor.

2. Revisar el tono cromático de la zona a resanar para seleccionar la fórmula que se integrará mejor.

- Para los hipogeos cuya roca es más oscura y marrón se recomienda utilizar como árido toba proveniente del Alto de Segovia. Para aquellos con la tonalidad más pálida o clara se recomienda utilizar la toba proveniente del Alto del Aguacate.

3. Seleccionar la proporción de partes de toba y tierra arcillosa a utilizar en la pasta.

- Si la zona a resanar no presenta disgregación o descamación, puede prepararse una pasta de toba y tierra arcillosa en proporción 2:1.
- Si se trata de una zona que ha sido consolidada y se encuentra más frágil, se recomienda utilizar una proporción 3:1 para disminuir la adherencia, evitando así la posible remoción de partículas en caso de pérdida del resane.

4. Evaluar la apariencia que se quiere lograr.

- Si la zona a intervenir con la pasta de resane es grande o profunda o la superficie colindante es rugosa, se recomienda utilizar las fórmulas sin cernir las tierras.

5. Preparación de la pasta de resane

- Una vez se han realizado los pasos previos, se recomienda preparar la pasta en el hipogeo, para controlar de mejor manera la cantidad de agua que requerirá la mezcla.

9.3 MORTERO ESTRUCTURAL

Introducción

El presente capítulo consolida los resultados obtenidos en la formulación y evaluación de materiales de intervención estructural destinados a la conservación de los hipogeos en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro. A través de un riguroso proceso experimental en laboratorio, se llevaron a cabo los ensayos de caracterización mecánica de la toba volcánica y el análisis de compatibilidad química con el sustrato original. Estos estudios permitieron el desarrollo técnico de morteros estructurales para la reconstrucción de columnas, así como de lechadas de inyección diseñadas para el tratamiento de diaclasas y discontinuidades. Finalmente, el proceso culminó con la definición de metodologías precisas para la aplicación de dichos materiales, garantizando una intervención respetuosa y técnicamente viable para la correcta intervención. El estudio fue desarrollado por los ingenieros especialistas en concreto German Hermida y Lina Méndez.

Formulación del mortero estructural para reconstrucción de columnas

La formulación del mortero estructural se fundamentó en criterios de compatibilidad física, mecánica y estética con la toba volcánica original de construcción de los hipogeos. Para garantizar la integración visual, se utilizó arena obtenida de la trituration de toba del cerro Segovia, ajustando su granulometría para igualar la textura y el color del sustrato. En términos de manejabilidad, y dadas las restricciones de acceso al sitio, se diseñó una mezcla con una fluidez mínima de 65 mm (según norma ASTM C780), permitiendo su aplicación mediante tuberías y compactación manual en espacios reducidos.

En cuanto a sus propiedades físicas y estructurales, el diseño priorizó la estabilidad volumétrica mediante el uso de aditivos expansores que compensan el asentamiento plástico, asegurando un contacto permanente entre las columnas y la bóveda. Asimismo, se incorporaron aditivos para ajustar la densidad del mortero al rango de la toba (1.40 a 1.85 T/m^3) y se calibró su resistencia mecánica para situarse entre 0.7 y 5 MPa . Este equilibrio técnico permite que el nuevo material contribuya al sistema estructural del hipogeo sin generar esfuerzos excesivos o incompatibilidades con la piedra volcánica original.



Ilustración 65. Izq. Fragmentos de toba (Cerro Segovia), Der. Arenas empleadas en el mortero estructural de reparación. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

Ensayos de laboratorio del mortero estructural

La evaluación del comportamiento del mortero estructural incluyó una serie de ensayos en estado fresco y endurecido, centrados en la medición de su consistencia, densidad y contenido de aire. Los resultados experimentales demostraron un desempeño óptimo de las mezclas formuladas, alcanzando una fluidez de entre 65 y 67 mm mediante el ensayo de Vicat modificado, y un contenido de aire del 24% al 25%. Estos parámetros, sumados a una densidad final de aproximadamente 1.80 t/m³, confirman que el material desarrollado posee una compatibilidad física excepcional con la toba volcánica original, garantizando una integración técnica segura dentro de los hipogeos.

Para la evaluación en estado endurecido, se fabricaron cubos de 5 cm de arista ensayados a compresión bajo la norma ASTM C109, comparando el desempeño de dos tipos de conglomerantes. Los resultados revelaron que el mortero con cemento Cemex alcanzó resistencias significativamente elevadas (hasta 173 kg/cm² a los 28 días), mientras que la mezcla con cemento Argos presentó valores más moderados y técnicamente cercanos a los rangos de compatibilidad requeridos para la toba (147 kg/cm² en el mismo periodo). Ante esta evidencia, se recomendó el uso de cemento Argos y un ajuste al alza en la relación agua-cemento, con el fin de atenuar la resistencia final y asegurar un comportamiento estructural armónico con el material original de los hipogeos.

Días	Cemento Cemex	Cemento Argos
1 día	31.9 kg/cm ²	23.2 kg/cm ²
3 días	74.4 kg/cm ²	42.7 kg/cm ²
7 días	140.2 kg/cm ²	101 kg/cm ²
28 días	173 kg/cm ²	147 kg/cm ²

Tabla 22. Comparación de resultados de desempeño Cemento cemex, cemento Argos. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026-Informe mes de octubre, LINA MARÍA MÉNDEZ ARIAS.

Desarrollo de la lechada de inyección para diaclasas

Para el tratamiento de discontinuidades con aperturas de entre 2 mm y 8 mm, donde el uso de mortero convencional resulta inviable, se desarrolló una lechada de inyección específica orientada a la consolidación del macizo rocoso. Los criterios de diseño priorizaron una alta fluidez para garantizar la penetración en fisuras estrechas, un tiempo de fraguado inferior a 15 horas y una compatibilidad cromática rigurosa con la toba original. Tras diversas pruebas, la formulación que presentó el mejor desempeño consistió en una mezcla de 100 g de cemento, 250 g de polvo de toba y 140 g de agua.

La efectividad de esta mezcla se validó mediante ensayos de fluidez en un embudo con salida de 8 mm, registrando un tiempo de descarga de 3.2 segundos para una muestra de 200 g, valor que asegura una capacidad de penetración adecuada en el sistema de diaclasas. No obstante, se detectó una ligera segregación del material tras 25 minutos de reposo; ante este hallazgo, se recomendó la incorporación de un agente estabilizante, como la bentonita, con el fin de optimizar la suspensión de las partículas y garantizar la homogeneidad de la mezcla durante su aplicación en campo.



Ilustración 66. Ensayos para el desarrollo de la lechada de inyección para diaclasas, Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026-Informe mes de noviembre, LINA MARÍA MÉNDEZ ARIAS.

Componente	Cantidad	Función
Cemento	100 g	Aglomerante estructural
Polvo de toba	250 g	Carga de compatibilidad estética y física
Agua	140 g	Vehículo de fluidez (\$a/c \approx 1.4\$)
Bentonita (Propuesta)	A determinar	Agente anti-segregación

Tabla 23. Fórmula con mejor desempeño. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026-Informe mes de noviembre, LINA MARÍA MÉNDEZ ARIAS.

Caracterización mecánica de la toba volcánica

Con el objetivo de calibrar las propiedades del mortero estructural en función de las características del sitio, se llevó a cabo un programa de caracterización mecánica de la toba volcánica. Para ello, se seleccionaron fragmentos provenientes directamente del parque arqueológico a partir de los cuales se prepararon siete especímenes mediante técnicas de corte y tallado manual. Este proceso buscó garantizar superficies de contacto con un paralelismo óptimo, requisito indispensable para asegurar la validez de los ensayos de compresión realizados posteriormente en la prensa hidráulica del laboratorio especializado Concrereservicios.



Ilustración 67. Proceso de caracterización de la toba volcánica, Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026-Informe mes de noviembre, LINA MARÍA MÉNDEZ ARIAS.

Los resultados de los ensayos mecánicos arrojaron una resistencia promedio total de 8.6 kg/cm², la cual se ajustó a un valor de 11.4 kg/cm² tras un proceso de depuración estadística de las muestras. Estos datos confirman la baja resistencia característica de la toba volcánica y representan el parámetro técnico fundamental para el ajuste final del mortero. Esta información fue crucial para evitar el uso de materiales de intervención excesivamente rígidos, asegurando que el refuerzo estructural trabajara de manera armónica y no invasiva con el soporte original de los hipogeos.

Además de ajustar la formulación para que tuviera una resistencia similar a la roca original se buscó que el mortero estructural también presentara una semejanza en color y apariencia, lo que se ilustra con la ilustración 68. Una vez in situ y para mejorar su trabajabilidad se le añadió pedazos de 1m de largo de cabuya.



Ilustración 68. Se aprecia la semejanza entre el mortero fraguado y la toba volcánica de Tierradentro, También el mortero en proceso de ser aplicado mezclado con trozos de cabuya. Fotografías Lina María Méndez Arias y María Paula Alvarez

Metodología de aplicación de las lechadas de inyección

Para la consolidación de las discontinuidades en los hipogeos, se llevó a cabo una evaluación técnica de diversos métodos de aplicación de lechadas estructurales comúnmente empleados en la ingeniería civil. Entre las alternativas analizadas se consideraron la inyección mediante bombas de alta presión, el uso de ollas de presión y la inyección por gravedad o cabeza hidráulica. Tras el análisis de las condiciones específicas del sitio, se determinó que el método de inyección por gravedad es el más adecuado, dada la escala de las intervenciones y las dimensiones de las fisuras identificadas en la toba volcánica.

La implementación de este sistema se basa en el uso de boquillas instaladas directamente en las diaclasas, las cuales deben ser previamente selladas para asegurar la correcta penetración del material. La elección de la cabeza hidráulica sobre los métodos de presión mecánica responde a la necesidad de una aplicación controlada y de bajo impacto; esto evita someter a la estructura original a presiones excesivas que podrían comprometer la integridad del hipogeo. De esta manera, se garantiza una distribución uniforme de la lechada, priorizando siempre la conservación del material arqueológico frente a las cargas hidrostáticas de la intervención.

Conclusiones

Finalmente, el proceso de investigación permitió el desarrollo de una formulación de mortero estructural que cumple con los requerimientos de densidad, estabilidad volumétrica y apariencia estética necesarios para la intervención de los hipogeos. Los ensayos de laboratorio confirmaron que el material cuenta con propiedades óptimas en estado fresco para su colocación en espacios de acceso restringido, aunque los resultados de resistencia sugieren la necesidad de ajustar la relación agua-cemento para garantizar una compatibilidad mecánica más estrecha con la toba volcánica original.

Así mismo, se validó una lechada de inyección de alta fluidez, diseñada específicamente para la consolidación de diaclasas finas y la recuperación de la integridad del macizo rocoso. Para su puesta en obra, se determinó que el método de inyección por cabeza hidráulica representa la alternativa más segura y eficaz en el contexto de Tierradentro, ya que permite un control preciso de las presiones de llenado. Este conjunto de materiales y metodologías proporciona una base técnica sólida y respetuosa para las futuras labores de conservación estructural en el Parque Arqueológico Nacional.

9.4 ADHESIVOS

Introducción

En la primera visita al parque arqueológico de Tierradentro, se hizo un reconocimiento del estado actual de los hipogeos, detectando la necesidad de hacer uso de un material adhesivo para asegurar la readhesión de la pintura mural. De hecho, hay zonas donde el enlucido se encuentra levantado y la interfaz entre la roca y el enlucido es muy estrecha lo que hace que allí no pueda usarse un mortero de inyección. Se hace una revisión teórica de los adhesivos que podrían utilizarse y se escoge la Tilosa por ser un producto económico, de fácil acceso y cuyo uso se encuentra respaldado por bibliografía relacionada con conservación de pintura mural.

Descripción del producto

El ligante Tilosa (Tylose MH 300 P), es un éster de celulosa a base de metil hidroxietil celulosa, esencial para la conservación de bienes muebles, que funciona como espesante, estabilizador que regula la capacidad de retención del agua, por lo que mejora el proceso de secado y formación de película; reduce la sedimentación de cargas y pigmentos, evitando la separación de fases; tiene buena consistencia y trabajabilidad en morteros; es resistente a los microorganismos y en baja proporción, no deja brillos en la superficie.

Ha sido ampliamente utilizado en procesos de restauración.

De acuerdo con el Grupo Español IIC y con CTS Conservation, se observan los siguientes determinantes:

- Aspecto: polvo blanco que al disolverse se vuelve transparente.
- Solubilidad: soluble en agua fría e insoluble en agua caliente o disolventes orgánicos.
- pH: neutro (pH 7.0), lo que garantiza que no acidificará el soporte de la obra.
- Preparación: para la pintura mural de Tierradentro, se utiliza la Tilosa en un porcentaje promedio del 1% al 2%. Para su preparación, se recomienda espolvorear el producto en agua fría mientras se agita, para evitar grumos antes de añadir el resto del agua. De preferencia, se prepara el producto de un día para otro, para que hinche completamente y se consiga una mezcla homogénea.

Recomendaciones de uso en los hipogeos

El ligante Tilosa se utiliza para fijar las capas de enlucido sueltas o desprendidas en el hipogeo se hace una prueba detectando que tiene una buena performance y permite además reforzar las áreas con fisuras. Se aplica mediante el método de inyección en concentraciones del 1 al 2 % en agua, según las necesidades de la zona a tratar, previa aplicación de alcohol etílico al 70 %, con el fin de romper la tensión superficial del área afectada y favorecer la penetración profunda del producto.

Considerando que se trata de un producto de naturaleza orgánica y que al interior de los hipogeos hay el riesgo del crecimiento microbiano, se identificó la necesidad de incorporar un biocida al momento de su preparación. Dados los resultados obtenidos en el marco de este proyecto con biocidas como el ácido piroleñoso al 6 % para evitar la proliferación de hongos.

La inyección debe mantenerse hasta que la zona ralentice o detenga la absorción, teniendo en cuenta que cada área absorbe únicamente la cantidad necesaria.

Mientras se aplica el producto, es importante ejercer presión sobre el área suelta mediante papel encerado y algodón, con el fin de asegurar la unión de los estratos y restituir el plano.

Debe evitarse una presión excesiva que pueda ocasionar la ruptura o deformación del estrato.

9.5 CONSOLIDANTES

Introducción

La toba volcánica presente en los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro se encuentra afectada por procesos de disgregación granular, resultado de la pérdida de cohesión interna provocada por los ciclos de humedad y condiciones ambientales saturadas. Este deterioro compromete la estabilidad del soporte pétreo y, en consecuencia, la conservación del soporte, enlucido y capa pictórica asociadas.

Ante esta problemática, la consolidación se plantea como un tratamiento que permite restituir la cohesión del material pétreo sin alterar su permeabilidad ni su apariencia superficial. La selección de los consolidantes se realizó considerando criterios/principios de compatibilidad química, baja viscosidad y capacidad de penetración en materiales altamente porosos.

A continuación, se describe la evaluación de tres consolidante (Nano Estel, Nanorestore y Wacker OH) en superficies de toba volcánica que presentan disgregación en los hipogeos SA8 ubicado en el Alto de San Andrés y A36 ubicado en el Alto del Aguacate del Parque Arqueológico de Tierradentro. Las pruebas tuvieron como objetivo determinar la eficacia, compatibilidad y comportamiento de los productos en condiciones de alta humedad relativa. Los resultados preliminares muestran un desempeño positivo de Nanorestore y Wacker OH, mientras que la evaluación de Nano Estel requiere un periodo más prolongado de observación.

Metodología

Se eligieron tres productos para hacer las pruebas de consolidación: Nano Estel (nano silicato de sílice acuoso), Nanorestore (nanolime en suspensión alcohólica) y Wacker OH (silicato modificado comercial). Esta diversidad permite comparar mecanismos de acción distintos: formación de gel de sílice, carbonatación progresiva y redes silíceas híbridas; y así evaluar cuál ofrece mayor eficacia frente a la disgregación de la toba volcánica en condiciones reales de aplicación.

Las pruebas fueron realizadas en los hipogeos SA8 y A36, el registro de los resultados se presenta en las siguientes líneas orientando la intervención futura. De manera práctica, se busca que este documento sirva como guía de campo para la aplicación y evaluación de los consolidantes seleccionados.

Consolidantes seleccionados y justificación

Nano Estel (nano silicato de sílice acuoso)

- **Qué es:** Es un producto a base de nanopartículas de sílice suspendidas en agua.
- **Cómo funciona:** Cuando se aplica sobre la piedra, estas partículas penetran en los poros y con el tiempo se unen formando un gel de sílice. Este gel actúa reforzando la cohesión interna de la roca.
- **Por qué se eligió:** La toba volcánica tiene componentes silíceos y una porosidad muy alta, lo que hace que este consolidante sea químicamente compatible y capaz de penetrar profundamente.
- **Nota importante:** El proceso es lento; los resultados reales se observan después de tres semanas aproximadamente, cuando el gel esté estabilizado.



Nanorestore (nanolime en suspensión alcohólica)

- **Qué es:** Es una suspensión de nanopartículas de hidróxido de calcio en alcohol.
- **Cómo funciona:** Las partículas penetran en la piedra y, al reaccionar con el dióxido de carbono del aire, se transforman en carbonato de calcio. Este carbonato devuelve cohesión a los gr anos sueltos.
- **Por qué se eligió:** Es muy compatible con materiales carbonatados y porosos como la toba volcánica, y mantiene la permeabilidad al vapor. Además, su



aplicación es rápida y los resultados se pueden evaluar en 24 horas.

- **Nota importante:** Si se aplica en exceso, puede dejar un velo blanquecino en la superficie.

Wacker OH (silicato modificado comercial)

- **Qué es:** Es un consolidante comercial basado en silicato de etilo, modificado con componentes orgánicos para mejorar su flexibilidad y penetración.
- **Cómo funciona:** Al aplicarse, el silicato se transforma en una red de sílice dentro de los poros de la piedra, reforzando su estructura interna. Los modificadores orgánicos ayudan a que el producto se adapte mejor a materiales muy porosos y evitan que se vuelva demasiado rígido.
- **Por qué se eligió:** Al ser un consolidante comercial, funciona como comparación con los demás consolidantes. Además, su aplicación es rápida y los resultados se pueden evaluar en 24 horas.
- **Nota importante:** Debe aplicarse en condiciones secas y ventiladas, evitando saturación para no bloquear los poros de la piedra.



Consideraciones a la hora de realizar las pruebas

Preparación de superficies

- Limpieza superficial en seco con brocha para eliminar partículas sueltas.
- Selección de tres zonas representativas con disgregación visible.

Aplicación de consolidantes

- **Nano Estel:** aplicado por aspersión en 3 o 4 capas finas; evaluación inicial a los 3-4 días, pero se observan los resultados completos después de 3 semanas debido a su mecanismo de formación de gel de sílice.
- **Nanorestore:** aplicado por aspersión en 3 o 4 capas finas; se evalúa a las 24 horas.
- **Wacker OH:** aplicado por aspersión en 3 o 4 capas finas; se evalúa a las 24 horas.

Condiciones de ensayo

- No humedecer la superficie previo a la aplicación de los consolidantes ya que puede perjudicar e interferir con la penetración del consolidante. Esto es especialmente importante en la toba volcánica debido a que su comportamiento es muy sensible a la humedad y sus poros pueden saturarse rápidamente.
- Evitar saturación de consolidante para impedir la formación de películas superficiales, velos blancos, brillos o endurecimientos diferenciales. Además, esto puede impedir que el material respire, bloqueando la permeabilidad al vapor causando acumulación de humedad interna.
- Documentación fotográfica antes, durante y después de la aplicación.

Parámetros de evaluación

- Cohesión superficial (prueba táctil suave).

- Se consideró que el consolidante mostró un comportamiento adecuado cuando no se registró desprendimiento de partículas de la superficie. Por otro lado, la presencia de material disgregado adherido a los dedos se interpretó como una ausencia o insuficiencia de consolidación.
- Variación cromática perceptible.
- Comportamiento frente a humedad (absorción y secado).

Pruebas aplicadas en los hipogeos SA8 Y AL A36

Pruebas realizadas en el SA8:

- **Ubicación:** Zona lateral izquierda, cercana a la cavidad.
- **Orden:** Nanorestore, Nano Estel, Wacker OH.



Pruebas aplicadas en el A36:

- **Ubicación:** Zona lateral derecha, ingreso del hipogeo.
- **Orden:** Nano Estel, Wacker OH, Nanorestore



Resultados

Producto	Cohesión superficial	Alteración visual	Compatibilidad	Resultado general
Nano Estel	Baja / insuficiente	No significativa	Limitada en condiciones evaluadas	No satisfactorio
Nanorestore	Alta	No significativa	Alta	Mejor desempeño
Wacker OH	Alta	No significativa	Media / buena	Desempeño favorable

Principales observaciones:

- **Nano Estel** no evidenció consolidación efectiva en los sectores evaluados, incluso después del tiempo de espera y seguimiento posterior.
- **Nanorestore** presentó la respuesta más favorable, mejorando la cohesión superficial sin generar cambios visuales perceptibles.
- **Wacker OH** mostró resultados positivos similares al Nanorestore; sin embargo, debido a su naturaleza orgánica, se consideró menos favorable.

Conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones:

La evaluación comparativa de consolidantes en los hipogeos permitió establecer que el nanorestore presentó el mejor desempeño general sobre superficies de toba volcánica con procesos de disgregación, seguido de Wacker OH con resultados favorables. Ambos productos presentan una buena compatibilidad con la toba volcánica y ausencia de alteraciones cromáticas. Nano Estel no evidenció eficacia suficiente en las condiciones evaluadas, lo cual es coincidente con el comportamiento del silicato de etilo en condiciones de humedad.

Discusión técnica:

Las pruebas realizadas permitieron confirmar que la consolidación puede ser útil como medida puntual de estabilización, pero no debe asumirse como solución integral frente a los procesos de deterioro presentes en los hipogeos.

En el caso particular de los hipogeos estudiados, la extensión de las áreas disgregadas evidencia que una consolidación generalizada implicaría intervenir una proporción significativa de la superficie interna, lo que podría modificar el comportamiento higroscópico natural del soporte y generar consecuencias no deseadas a mediano o largo plazo.

En ese sentido como la problemática observada no responde únicamente la pérdida de cohesión superficial, sino una interacción compleja entre el material pétreo, o medio ambiental y condiciones microclimáticas internas. Es por esto, qué se debe contemplar no solo los tratamientos de

consolidación localizada, sino también monitoreo ambiental, seguimiento periódico y comprensión más profunda de las dinámicas de humedad del soporte.

Recomendaciones generales:

- Durante la aplicación del consolidante es importante evitar su saturación sobre la piedra y mantener fichas de seguridad a mano.
- Priorizar intervenciones mínimas y selectivas en sectores críticamente inestables.
- Considerar Nanorestore como primera opción para futuras pruebas o tratamientos localizados.
- Documentar la intervención mediante registro fotográfico y técnico
- Evitar consolidaciones extensivas sin estudios previos.
- Mantener programas de monitoreo ambiental y seguimientos.

10. PRINCIPIOS Y CRITERIOS PARA LA DOCUMENTACIÓN, CONSERVACIÓN E INTERVENCIÓN DE LOS HIPOGEOS

Lineamientos de intervención para hipogeos en estado crítico

El presente apartado establece los principios, criterios y directrices de intervención para los hipogeos en estado crítico del Parque Arqueológico de Tierradentro, planteados en el marco del proyecto FIAN 2025-2026. Proponen desde lo teórico, una metodología unificada y aplicable a todo el sitio arqueológico, pero buscan orientar también futuras intervenciones que se realicen en los hipogeos.

Se fundamenta en los principios contemporáneos de conservación-restauración —propuestos por las diferentes Cartas Internacionales y detallados en Medina-González et al (2009) así como adoptados para los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro y referidos por Preciado en (1996), el Instituto Colombiano de Antropología e Historia [ICANH], 2019; y el Plan de Conservación desarrollado en 2024 (Alvarez et al, 2024).

El objetivo de estos lineamientos es orientar las decisiones de intervención desde un enfoque técnico, coherente y respetuoso con la materialidad, el contexto y los valores culturales de los hipogeos, garantizando su estabilidad estructural —eje rector de la intervención— y su conservación a largo plazo.

Aparecen referidos en los Expedientes de documentación de los hipogeos en estudio anexos a este informe y particularmente desglosados en el caso de los hipogeos SA1, S10, S11, S12, S21 y S5.

Como expone la siguiente imagen y las líneas que le siguen, la intervención de los hipogeos se rige por los siguientes principios generales: la mínima intervención, entendida como las acciones estrictamente necesarias para lograr la estabilidad física; la precaución y planificación preventiva, que prioriza la prevención y el monitoreo continuo para reducir la necesidad de intervenciones correctivas; la unidad e integridad, que busca una coherencia metodológica total entre los procesos de diagnóstico, documentación e intervención; la estabilidad; la legibilidad de las intervenciones; la legitimidad, que permite una justificación técnica y documental verificable, fundamentada en la trazabilidad del conocimiento y la memoria técnica del sitio. A partir de este marco ético y teórico, se construyen los criterios específicos para los procesos de intervención del conjunto arqueológico.

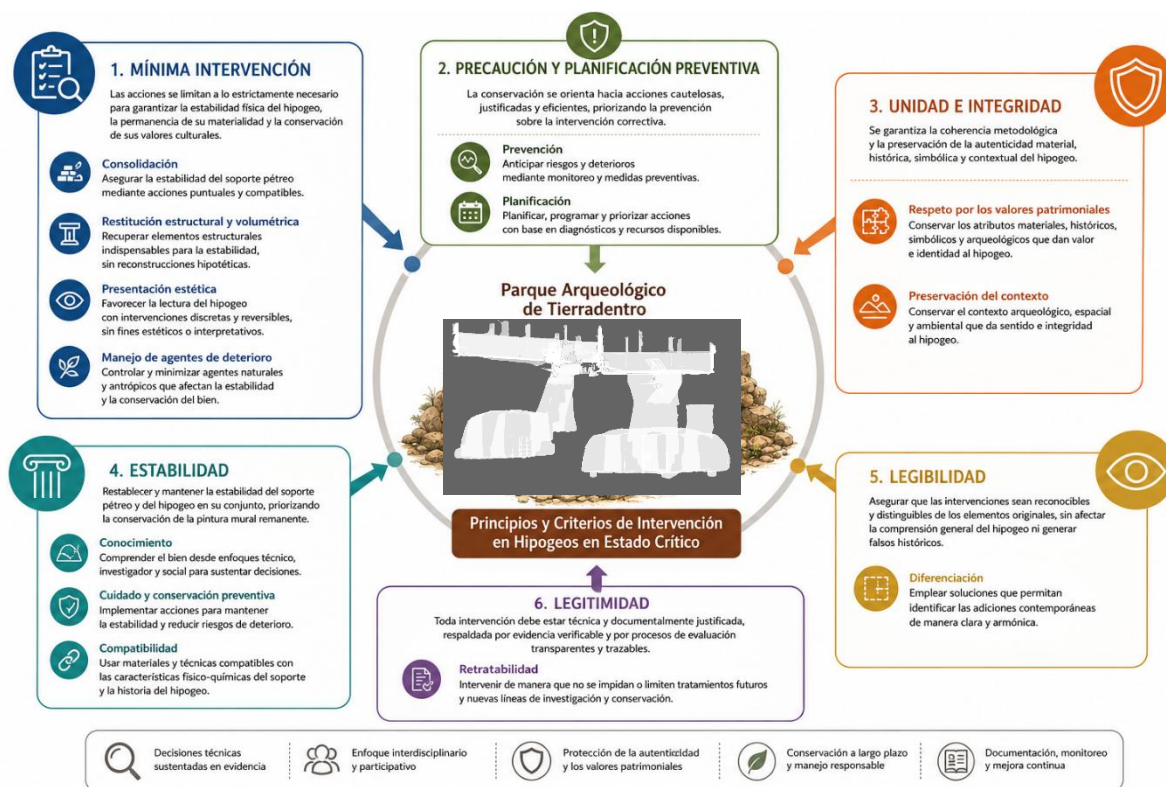


Ilustración 68. Gráfico ilustrativo de principios y criterios aplicados al proyecto de intervención. Imagen generada con IA.

PRINCIPIOS GENERALES DE INTERVENCIÓN

Principio de mínima intervención

La intervención en los hipogeos en estado crítico de Tierradentro se rige por el principio de mínima intervención, entendido como la limitación de las acciones a lo estrictamente necesario para garantizar la estabilidad física del bien, la permanencia de su materialidad y la conservación de sus valores culturales. En este sentido, se priorizan tratamientos puntuales, cautelosos y técnicamente justificados, evitando actuaciones invasivas, reconstrucciones hipotéticas o procedimientos que alteren la autenticidad material e histórica de los hipogeos.

Este principio reconoce que las transformaciones, pérdidas materiales, huellas de uso, deterioros y evidencias de intervenciones anteriores forman parte de la historia de vida del bien y, por tanto, no deben entenderse necesariamente como elementos a corregir o eliminar, sino como testigos materiales de sus procesos históricos. En este sentido, las intervenciones previas serán conservadas siempre que no representen un riesgo activo para la estabilidad del hipogeo o comprometan la conservación de sus valores. En consecuencia, las acciones de consolidación, restitución y estabilización se restringen a aquellos casos donde exista una necesidad estructural demostrada, privilegiando la conservación del estado actual del bien y evitando reconstrucciones con fines estéticos o interpretativos.

Principio de precaución y planificación preventiva

La conservación se orienta hacia acciones cautelosas, justificadas, seguras y eficientes, priorizando la prevención sobre la intervención correctiva. Este principio se materializa en la planificación anticipada, el monitoreo continuo y la implementación de medidas que reduzcan la necesidad de intervenciones invasivas.

Principio de unidad e integridad

La documentación y las intervenciones desarrolladas en los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro se orientan bajo un principio de unidad e integridad, garantizando coherencia metodológica para que las decisiones técnicas respondan a un mismo enfoque conceptual, metodológico y operativo, al tiempo que procuran la preservación de la autenticidad material, histórica y simbólica de los bienes intervenidos.

Este principio busca asegurar coherencia entre los procesos de diagnóstico, documentación, formulación e intervención, permitiendo que las acciones desarrolladas mantengan criterios homogéneos frente a la conservación del conjunto, independientemente del grado de complejidad o estado de conservación de cada hipogeo. Así, parámetros como la mínima intervención, la compatibilidad material, la estabilidad estructural y la documentación exhaustiva se aplican de manera consistente, favoreciendo la comparabilidad de resultados y la coherencia técnica del proyecto.

De igual forma, las intervenciones deben procurar la permanencia de aquellos atributos materiales, históricos y contextuales que constituyen la integridad del hipogeo, evitando actuaciones que fragmenten su comprensión, alteren su significado cultural o comprometan los valores que representan. En este sentido, se busca preservar la unidad del hipogeo como conjunto arqueológico, cultural y espacial, procurando que las acciones necesarias para garantizar su estabilidad se integren de manera coherente con su historia material y configuración.

Principio de estabilidad

La estabilidad se entiende como el estado óptimo necesario para garantizar la permanencia material del patrimonio a largo plazo, dicho estado está determinado por las características fisicoquímicas, estructurales y morfológicas de los hipogeos, las cuales han sido modificadas a lo largo del tiempo por la acción de agentes de deterioro naturales y antrópicos. En este contexto, la intervención busca restablecer la estabilidad del soporte pétreo y de los hipogeos en su conjunto, priorizando la conservación de la pintura mural remanente.

Bajo este principio, se establece también que las intervenciones se fundamentan en el uso de materiales y técnicas compatibles, discernibles y, en la medida de lo posible, retratables, procurando que las acciones actuales no comprometan futuras decisiones de conservación ni limiten la comprensión histórica y material del hipogeo.

Principio de legibilidad

Las intervenciones de conservación deben favorecer una lectura clara de las acciones realizadas, permitiendo distinguir los elementos originales de las intervenciones posteriores sin afectar la comprensión general del hipogeo ni generar falsos históricos. Este principio busca garantizar que las decisiones de intervención sean reconocibles e interpretables dentro del conjunto, promoviendo soluciones que permitan identificar los aportes contemporáneos de manera armónica y técnicamente justificada, sin competir visualmente con la materialidad original ni alterar los valores patrimoniales del bien.

Principio de legitimidad

La legitimidad de la intervención se fundamenta en la justificación técnica, documental y material de las decisiones adoptadas, garantizando que toda acción propuesta responda a evidencia verificable y a criterios de intervención claramente sustentados. En este sentido, las decisiones de conservación deben estar respaldadas por diagnósticos técnicos, evidencia material y procesos de evaluación que permitan justificar la pertinencia, alcance y necesidad de las acciones implementadas.

Este principio reconoce la importancia de la memoria técnica y documental como base para la toma de decisiones, articulando los aportes de investigaciones previas, registros históricos, documentación contemporánea y resultados de intervención como parte de un proceso acumulativo de trazabilidad del conocimiento. Así mismo, busca garantizar que las decisiones de conservación sean técnicamente justificadas, transparentes y coherentes con los objetivos de estabilidad, permanencia material y conservación patrimonial del conjunto.

CRITERIOS GENERALES DE INTERVENCIÓN:

a) Criterios operativos asociados al principio de mínima intervención:

Para la consolidación:

Previo a cualquier intervención se evaluará la resistencia mecánica del soporte para identificar material competente que permita la consolidación, minimizando la remoción del material original y priorizando su conservación siempre que no represente un riesgo activo para la estabilidad del conjunto. La consolidación de la roca se aplicará de manera localizada y únicamente en aquellas zonas críticas que requieran estabilización estructural o que deban recibir proceso de inyección de mortero, evitando tratamientos extensivos que puedan resultar invasivos o afectar la efectividad de otros procedimientos de conservación. Así mismo, se priorizará la conservación del material inestable, procurando que la consolidación permita preservar la mayor cantidad posible de material original, aun en condición de fragilidad o susceptibilidad.

Frente a procesos de disgregación de la toba volcánica, se priorizará la gestión de las condiciones ambientales del hipogeo como estrategia principal de conservación, reconociendo que la recuperación de la humedad de equilibrio de la roca puede incidir favorablemente en la reducción de estos procesos de deterioro. En este sentido, se privilegian acciones orientadas al manejo de la

humedad relativa y temperatura del entorno inmediato del hipogeo antes que procesos generalizados de consolidación sobre la totalidad de las superficies afectadas.

Para los hipogeos del Alto de Segovia (S10, S11 y S12), estas acciones podrán incluir la modificación de la geomembrana existente o su reemplazo por materiales permeables, como geotextiles que favorezcan la absorción y regulación de la humedad en la roca, contribuyendo a la estabilidad del soporte.

Para la restitución estructural:

Las restituciones estructurales se limitarán a aquellos casos donde exista una necesidad de estabilización del hipogeo, orientándose exclusivamente a recuperar condiciones de resistencia mecánica y continuidad estructural del soporte pétreo. En este sentido, no se considerará la incorporación de columnas, pilastras u otros elementos de soporte adicional en aquellos hipogeos que presenten estabilidad estructural suficiente, contemplándose estas medidas únicamente cuando su implementación resulte absolutamente necesaria para garantizar la permanencia material del conjunto.

Los procesos de restitución e integración material deben orientarse a garantizar la estabilidad estructural del hipogeo, procurando una adecuada redistribución de cargas y evitando la generación de tensiones que comprometan el comportamiento mecánico del soporte pétreo. Por lo tanto, los faltantes de soporte se restituirán mediante soluciones que garanticen la compatibilidad entre los materiales nuevos y la toba volcánica.

La incorporación de morteros estructurales estará condicionada a la evaluación de su comportamiento mecánico, densidad y peso, procurando que no introduzcan cargas adicionales que puedan comprometer la estabilidad de bóvedas u otros elementos del soporte pétreo, así como, la permanencia material del conjunto.

Para la presentación estética:

Las decisiones relacionadas con la presentación estética de los hipogeos deben orientarse a favorecer una lectura coherente del conjunto, respetando la autenticidad material del bien y evitando actuaciones que generen falsos históricos o reconstrucciones interpretativas no ajustadas técnicamente.

En este sentido, las restituciones volumétricas se limitarán a aquellos casos donde resulten necesarias para garantizar la estabilidad estructural o favorecer la comprensión material del soporte evitando reconstrucciones completas de elementos perdidos o restituciones con fines exclusivamente estéticos. Los acabados de las áreas intervenidas deberán permitir la identificación de las adiciones contemporáneas, procurando una integración visual armónica que no compita con la materialidad original ni afecte la lectura histórica y material del hipogeo.

De igual forma, no se contempla la reintegración cromática de pintura mural ni la reconstrucción de motivos decorativos desaparecidos, privilegiando la conservación de los vestigios originales y el

respeto por la historia material del bien. Las decisiones de presentación estética deberán favorecer la comprensión del conjunto sin distorsionar la evidencia arqueológica ni los valores asociados al hipogeo.

Finalmente, la limpieza se hará solo en muy pocos casos y solo cuando deterioros como concreciones salinas, depósitos blancos, microorganismos, deyecciones y rastros de animales, aparezcan en las superficies murales y constituyan un riesgo para la conservación de las pinturas. Específicamente las manchas de ahumado (producto de quemaduras o iluminación antigua) no se eliminarán en tanto pueden ser evidencia arqueológica

Para el manejo de otros agentes de deterioro:

Las acciones orientadas al manejo de agentes de deterioro deberán priorizar estrategias controladas que minimizan afectaciones sobre la materialidad original y reduzcan riesgos para la estabilidad del hipogeo. Dado que la eliminación total de raíces puede generar afectaciones sobre la estructura interna de la roca y favorecer pérdidas innecesarias de material, los tratamientos deberán orientarse a reducir su incidencia sin comprometer la integridad del soporte pétreo ni generar alteraciones adicionales. De igual forma, frente a factores de deterioro asociados a las condiciones ambientales del entorno, se priorizan medidas preventivas y de manejo contextual que reduzcan la necesidad de intervenciones invasivas sobre la materialidad original.

b) Criterios asociados al principio de precaución y planificación:

Prevención:

El mantenimiento y la conservación preventiva se consolidan como las acciones prioritarias del proyecto, al constituir la estrategia más costo-efectiva y menos invasiva para garantizar la estabilidad del patrimonio cultural arqueológico. En el contexto de los hipogeos de Tierradentro, este enfoque se materializa en el diseño y la implementación de protocolos de monitoreo sistemático y rutinas de mantenimiento programado, orientados a mitigar de manera continua las vulnerabilidades identificadas.

Entre estas acciones se incluyen mejoras en los cobertizos, re-diseño de barandas de acceso, y revisión de sistemas de drenaje, bajantes, canales, efectivos sistemas de desagüe e intervención de pendientes del terreno del contexto de cada hipogeo, con el fin de mantener la estabilidad mecánica y química de las estructuras en el tiempo.

Planificación:

Se priorizan las acciones planificadas y preventivas sobre las intervenciones reactivas o emergentes. Para ello, el proyecto incorpora el análisis de intervenciones anteriores evaluando tanto sus resultados en el tiempo como sus condiciones de ejecución, con el fin de ajustar las estrategias a las condiciones actuales del terreno y contexto. Asimismo, se fortalece la documentación gráfica, escrita y fotográfica de las intervenciones, con el objetivo de facilitar su seguimiento y evaluación futura.

Diseño previo de estrategias técnicas de intervención: El proyecto contempla el desarrollo de pruebas de materiales y técnica de intervención, evaluadas en términos de compatibilidad, accesibilidad y viabilidad logística. Este proceso es desarrollado por un equipo interdisciplinario que integra profesionales de la ingeniería, restauración, microbiología, geología y artes, abordando aspectos como selección de materiales, transporte, aplicación, disposición de residuos y evaluación de impacto ambiental.

c) Criterios asociados al principio de unidad e integridad:

Respeto por los valores patrimoniales:

Las decisiones de intervención deben orientarse al respeto y preservación de los valores materiales, históricos, informativos y culturales de los hipogeos, reconociendo que su materialidad constituye el principal soporte de memoria, significación y conocimiento histórico. En este sentido, se prioriza la conservación de las características físicas y formales que permiten comprender la naturaleza del bien, su técnica constructiva, su historia de vida y las transformaciones derivadas de su uso, deterioro e intervención a través del tiempo.

Este criterio implica privilegiar la conservación de la materialidad original, incluyendo huellas de uso, rasgos constructivos, alteraciones superficiales, vestigios de transformación y demás evidencias materiales que aportan información relevante sobre el bien, siempre que no representen un deterioro activo o un riesgo para su estabilidad e integridad. Así mismo, las acciones de conservación e intervenciones deben procurar la permanencia de aquellos atributos materiales que permitan reconocer los procesos históricos, técnicos y culturales asociados al hipogeo.

De igual forma, se reconoce al hipogeo como un espacio de memoria y significado cultural, por lo que las intervenciones deben respetar sus valores simbólicos, históricos, estéticos y arqueológicos, favoreciendo la permanencia de elementos que permitan comprender su configuración, iconografía y sentido patrimonial. En consecuencia, las acciones estructurales necesarias, como consolidaciones o refuerzos, deben fundamentarse en diagnósticos técnicos y realizarse mediante materiales compatibles, procurando que los cambios introducidos respeten la autenticidad del hipogeo, favorezcan su comprensión y no comprometan los valores patrimoniales que representa.

Preservación del contexto:

La integridad de los hipogeos es inseparable de su condición de arquitectura excavada, por lo que su conservación incluye la protección del entorno natural que los contiene. Esto implica gestionar las filtraciones de agua, así como preservar la relación del hipogeo con el paisaje, evitando intervenciones superficiales que alteren su lectura arqueológica y ambiental.

d) Criterios asociados al principio de estabilidad:

Conocimiento:

Toda intervención debe sustentarse en una comprensión profunda y documentada del bien patrimonial incluyendo sus materiales constitutivos, técnicas constructivas, estado de conservación,

intervenciones anteriores y contexto geológico, ambiental y cultural. Este conocimiento constituye la base para el diagnóstico, la selección crítica de tratamientos adecuados y la definición de prioridades de intervención, permitiendo diferenciar deterioros activos e inactivos y comprender los procesos de transformación del hipogeo a lo largo del tiempo.

En este marco, el proyecto incorpora una documentación exhaustiva del bien, incluyendo registros gráficos y fotográficos de técnica y estado de conservación, fotografías ortonormadas, fotogrametría, modelos 3D y herramientas de mapeo digital como Metigo Map, las cuales permiten cuantificar afectaciones, analizar la espacialidad de los hipogeos y realizar seguimiento a futuro. Así mismo, se integran al análisis crítico de intervenciones anteriores, los registros históricos, investigaciones previas y la documentación existente como insumos para la toma de decisiones, asegurando que las acciones de intervención mantengan coherencia con la memoria técnica y documental del sitio y se fundamenten en la trazabilidad del conocimiento acumulado. Estos procesos contribuyen a la consolidación de conocimiento técnico e investigado sobre el comportamiento material y los procesos de conservación de los hipogeos.

De igual forma, este criterio reconoce que el conocimiento generado en el proceso de intervención constituye un insumo para la interpretación y apropiación social del patrimonio, favoreciendo estrategias de socialización y divulgación que permitan fortalecer la comprensión integral del conjunto arqueológico, reconociendo tanto los hipogeos con pintura mural como aquellos que no la presentan. La legitimidad de la intervención se completa cuando los resultados se difunden y publican, permitiendo que el conocimiento generado contribuya al avance de la disciplina y a la apropiación social del patrimonio.

Cuidado

Conservación preventiva: La conservación preventiva se establece como un eje metodológico fundamental, orientado a mitigar el deterioro mediante la gestión e intervención del entorno inmediato de los hipogeos. Este enfoque incluye el monitoreo de las condiciones ambientales y la articulación con el equipo operativo del parque, reconociendo que la estabilidad del bien depende tanto de sus condiciones internas como de su contexto.

Compatibilidad: Los tratamientos correctivos deben emplear materiales y técnicas compatibles con la materialidad de los hipogeos, garantizando una interacción adecuada con el soporte pétreo y evitando alteraciones fisicoquímicas adversas. Este criterio se manifiesta en acciones tales como el uso de morteros compatibles con la materialidad del hipogeo para las intervenciones desarrollados exclusivamente con características físicas similares a las de la toba volcánica lo que asegura que se cumpla con la compatibilidad, o el tipo de biocidas usados en los procesos de saneamiento y control de agentes biológicos. El saneamiento ambiental se atendió mediante el uso de compuestos biocidas de origen natural que garantizan la estabilidad fisicoquímica del soporte y operan con estrategias mas compatibles con el ecosistema, en lugar de usar biocidas químicos convencionales utilizados en el pasado.

Aplicación de morteros:

Los morteros formulados y propuestos para la estabilización del soporte pétreo y pintura mural a base de tierras de la zona y toba triturada responden a criterios de compatibilidad física y mecánica con los elementos constitutivos del hipogeo. Su diseño considera propiedades como baja densidad, adecuada adherencia, estabilidad dimensional, permeabilidad al vapor de agua y homogeneidad, garantizando un comportamiento compatible con el soporte original y evitando tensiones o barreras al intercambio de humedad.

Intervenciones de restitución/refuerzo volumétrico estructural:

En casos donde la estabilidad estructural se encuentra comprometida, se plantean restituciones volumétricas mediante el uso de morteros estructurales y bloques de toba, buscando reproducir propiedades mecánicas similares al soporte original.

Si bien el uso de componentes como cemento blanco y cal presentes en el mortero estructural implica riesgos potenciales a largo plazo debido a su alcalinidad, la intervención contempla estrategias de mitigación, como la limitación de su volumen y el uso de puentes de adherencia que reducen la interacción directa con la toba, favoreciendo la estabilidad del conjunto.

En esa misma línea se privilegia el uso de mortero de inyección a base de tierra y toba para el cierre de diaclasas frente a la lechada estructural.

e) Criterios asociados al principio de legibilidad

Diferenciación:

Las intervenciones deben ser reconocibles frente a la materialidad original, evitando la generación de falsos históricos, pero integrándose de manera armónica al conjunto. Para ello, las adiciones se realizan con materiales compatibles, diferenciándose mediante acabados superficiales, texturas o ligeras variaciones tonales que permitan su identificación en una observación cercana, sin afectar la lectura general del hipogeo.

Este criterio se aplica tanto en la restitución de elementos estructurales como en intervenciones previas que forman parte de la historia del bien, reconociendo su valor funcional dentro del proceso de conservación.

f) Criterios asociados al principio de legitimidad:

Re-tratabilidad:

Dado que algunos procedimientos de conservación aplicados sobre soporte pétreo y pintura mural – como la consolidación, fijación o limpieza – no son estrictamente reversibles, las intervenciones deben orientarse hacia la re-tratabilidad del bien y los procedimientos realizados sobre el mismo, procurando que las acciones realizadas no limiten futuras decisiones de conservación ni impidan nuevos tratamientos sobre las superficies intervenidas.

En este sentido, se prioriza el uso de materiales y procedimientos técnicamente compatibles que favorezcan la estabilidad del conjunto y permitan, en la medida de lo posible, realizar tratamientos posteriores a las intervenciones realizadas sin generar alteraciones irreversibles sobre la materialidad original. Así mismo, se implementan estrategias que reduzcan interferencias entre tratamientos, promoviendo la permanencia de condiciones adecuadas para el seguimiento, monitoreo y eventual reintervención del hipogeo.

11. INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL Y ESTABILIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS HIPOGEOS EN ESTADO CRÍTICO.

El presente capítulo presenta una síntesis de los procesos de documentación e intervención realizados en los hipogeos de Tierradentro en las temporadas de septiembre y octubre de 2025 y febrero y marzo de 2026 por parte del equipo de conservadores e ingenieros del proyecto FIAN 2025-2026 y con el apoyo de los trabajadores del Parque.

Además de las actividades de documentación que se deben hacer antes y después de las intervenciones las acciones de conservación desarrolladas en los hipogeos pueden dividirse en las siguientes categorías:

1. Saneamiento ambiental y control biológico: implicar la aplicación de biocidas, la remoción de cuerpos fúngicos y el tratamiento y eliminación de raíces.
2. Limpieza de deterioros que afectan la conservación de la toba y la pintura mural: remoción de sales superficiales y eliminación de sedimentos y depósitos arcillosos.
3. Estabilización del soporte pétreo y la pintura mural: implica la consolidación de zonas con disgregación y descamación, la readhesión de pintura mural, la inyección de morteros en zonas frágiles con desprendimientos, el relleno de diaclasas (grietas) y fracturas mediante la inyección de morteros, resanes perimetrales y relleno de diaclasas, reintegración cromática de morteros de intervención.
4. Intervención estructural: Readhesión de fragmentos grandes desprendidos, restitución volumétrica y refuerzo estructural de pilares, reintegración cromática de morteros de intervención.

Mientras que las propuestas de intervención fueron planteadas para todos los hipogeos en estudio, al igual que el saneamiento ambiental y control biológico, como fue descrito en el capítulo 7, el resto de intervenciones solo se desarrollaron en los hipogeos S10, S11, S12, S21 y SA1, que fueron considerados los hipogeos con mas necesidades.

A continuación, se describen en detalle los procesos de conservación realizados y los deterioros a los que buscan atender:

INTERVENCIONES REALIZADAS EN EL PROYECTO FIAN (S10, S11, S12, S21 y SA1)		
NOMBRE DEL PROCEDIMIENTO	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	HIPOGEO EN EL QUE SE REALIZÓ EL PROCEDIMIENTO
Evaluación, documentación y mapeo de las áreas de intervención	Inspección visual y táctil del soporte para determinar la profundidad, amplitud, movilidad y nivel de riesgo de grietas, fisuras, fracturas, diaclasas, desprendimientos y oquedades. Las áreas tratadas fueron documentadas mediante registros fotográficos, gráficos de deterioro y herramientas digitales de mapeo, (Metigo Map).	S5, S10, S11, S12, S21 y SA1, SA8, A36, A41.

Aplicación de biocidas	Aplicación preventiva y correctiva de productos biocidas de origen natural para disminuir la carga microbiana, controlar insectos y reducir la biocolonización. Se emplearon principalmente ácido piroleñoso, ácido pelargónico y Alisín, aplicados mediante aspersión o nebulización controlada.	Esta intervención se hace inicialmente en todos los hipogeos abiertos y se reitera en S10, S11, S12, S21 y SA1.
Remoción de cuerpos fúngicos	Eliminación controlada de micelios y cuerpos fúngicos mediante hisopos o algodones humectados con alcohol etílico al 70 %, realizando movimientos de arrastre y evitando afectar el soporte, el enlucido o la pintura mural.	S10 y S12.
Tratamiento y eliminación de raíces	Aplicación localizada de ácido piroleñoso y ácido pelargónico para debilitar o desecar raíces, seguida de su retiro manual o mecánico mediante tijeras, bisturíes o cepillos. La metodología se ajustó al diámetro, profundidad y nivel de adherencia de las raíces para evitar desprendimientos del soporte pétreo.	S11, S21 y SA1. En SA1 se intervinieron sectores de los nichos y la cámara; en S21 se retiraron raíces principalmente en pilastras y bóveda.
Remoción de sales superficiales	Limpieza controlada de eflorescencias y depósitos salinos mediante el uso alcohol etílico, hisopos, esponjas de melamina y procedimientos mecánicos suaves, seleccionados de acuerdo con la resistencia de las superficies rocosas y la presencia de pintura mural.	S12 y SA1.
Eliminación de sedimentos y depósitos arcillosos	Remoción mecánica en seco o por vía húmeda de acumulaciones de tierra y sedimentos compactados. Se emplearon pinceles, brochas, espátulas, bisturíes y soluciones de agua-alcohol, previa verificación de que no existieran estratos pictóricos vulnerables bajo los depósitos.	SA1.
Consolidación de zonas con disgregación y descamación	Aplicación localizada de consolidantes para recuperar la cohesión superficial de la toba en zonas con disgregación o descamación avanzada y que van a ser estabilizadas. En el hipogeo SA1 se realizaron pruebas y aplicaciones puntuales con silicato de etilo Wacker OH 100; en el hipogeo S12 se utilizó el mismo consolidante para reforzar las superficies antes de hacer la inyección de morteros de áreas críticas.	S12 y SA1.
Readhesión de pintura mural	Estabilización de estratos de enlucido muy finos en la pintura mural separados del soporte pétreo (desprendimientos) mediante adhesivos (Tylosa) o micromorteros aplicados por inyección. Incluyó humectación previa, aplicación controlada del adhesivo o micromortero y fijación localizada de bordes y estratos levantados.	S10, S12 y SA1.
Estabilización de zonas frágiles del soporte pétreo mediante la inyección de morteros	Este proceso implica varios pasos: Aplicación o inyección de alcohol etílico al 70 % antes de inyectar morteros con el propósito de disminuir la tensión superficial y mejorar la penetración del mortero. Introducción de morteros de baja densidad y granulometrías diferenciadas mediante jeringas, agujas o sondas. Se utilizó para estabilizar grietas (diaclasas), fisuras, fracturas, delaminaciones, disyunciones en lajas, red de	S10, S11, S12, S21 y SA1. En S12 se priorizaron las intersecciones de diaclasas de la bóveda; en S21, los sectores con riesgo

	galerías, desprendimientos de soporte y de enlucido, generando puentes internos de unión, readhiriendo la pintura mural desprendida y recuperando la estabilidad del macizo rocoso.	de desprendimiento; y en SA1, grietas, galerías y oquedades profundas.
Relleno de diaclasas (grietas) mediante la inyección de morteros y fragmentos de toba	En sectores donde las grietas eran muy profundas se incorporaron fragmentos de toba para disminuir el volumen de mortero a inyectar, se humectaron las zonas a inyectar y mediante sondas o jeringas de gran tamaño se asegura el ingreso de mortero de inyección que permite el relleno de diaclasas.	SA1
Resanes perimetrales y relleno de diaclasas (grietas)	Relleno de bordes inestables y grietas mediante morteros compatibles y de colores similares a la roca, aplicados manualmente, con espátula o por inyección.	S10, S11 y SA1.
Readhesión de fragmentos grandes desprendidos	Reubicación y pegue de fragmentos grandes desprendidos. Dicho procedimiento implicó primero la limpieza y estabilización previa de las superficie rocosa que recibe el fragmento, luego la colocación temporal de éste que permite ubicar los puntos donde se instalan los espigos de fibra de vidrio con resina de anclaje (Anchorfix). El montaje temporal del fragmento requiere de la construcción de estructuras auxiliares de madera y protecciones con materiales amortiguadores que sirven como sistemas de apoyo para sostener los fragmentos mientras se instalan los espigos o se logra su adhesión, controlando su posición y reduciendo el riesgo de desplazamiento o caída. Una vez instalados los espigos contribuyen a sostener los fragmentos y evitar su desplazamiento. Para la adhesión de los fragmentos al soporte rocoso se utiliza mortero estructural. Es necesario primero humedecer bien, aplicar puente de adherencia (Sikalatex) en las superficie de contacto de la roca y el fragmento, y luego aplicar el mortero estructural humedeciendo hasta que completa su fraguado y asegura el pegue del fragmento. Al aplicar del mortero estructural se completa la volumetría de las zonas aledañas al fragmento y a la última capa de mortero se le da un acabado para que se integre con las superficies vecinas. La protección del mortero mientras fragua se hace con plástico, humectación periódica y revisión del secado para obtener un fraguado lento, reducir la contracción y evitar nuevas fisuras. También se contempló la revisión periódica de los sistemas de apuntalamiento.	S10, S11 y SA1. En S10 se adhirió un fragmento en la parte superior del pilar P2; en S11 se integró un fragmento en la zona media del pilar P1; en SA1 se desmontaron, trataron y readhirieron fragmentos del pilar P2.
Restitución volumétrica y refuerzo estructural de pilares	Recuperación parcial de secciones perdidas en pilares mediante la aplicación de mortero estructural, limitada a los volúmenes necesarios para recuperar capacidad portante y estabilidad. Incluyó preparación y limpieza del soporte, saturación hídrica, aplicación de puente de adherencia, y colocación del mortero por capas con acabado de apariencia terrosa. La protección del mortero mientras fragua se hace con plástico, humectación	S10, S11 y SA1. En S10 se reforzó el pilar P2 completando volúmenes bajo el fragmento readherido. En S11 se recuperaron

	periódica y revisión del secado para obtener un fraguado lento, reducir la contracción y evitar nuevas fisuras.	sectores debilitados del pilar P1; en SA1 se reforzó estructuralmente el pilar P2.
Reintegración cromática de morteros de intervención	Buscó garantizar la lectura estética como unidad y mitigar el impacto visual de la intervención para el visitante lo que implicó el ajuste de la tonalidad de los morteros de inyección, resane o restitución estructural que presentaban un color muy distinto respecto de la toba y la pintura mural. Se utilizaron tierras de los mismos hipogeos humedecidas para dar la tonalidad adecuada a las zonas intervenidas sin tocar las superficies originales.	S10 y S11.

Tabla 24. Intervenciones realizadas en el Proyecto FIAN (S10, S11, S12, S21 y SA1). Las fichas técnicas de los materiales utilizados en las intervenciones antes descritas se encuentran en el anexo 4 de este informe

En cada hipogeo se definió una metodología de intervención específica que se expone brevemente más adelante y que aparece descrita con más detalle en el capítulo de reporte de intervención de los Expedientes de documentación de los hipogeos intervenidos.

Hipogeo S10

- En términos generales, las intervenciones en este hipogeo se centraron en la estabilización de grietas, desprendimientos y zonas de pérdida de estabilidad mediante la inyección y aplicación de morteros, la readhesión de la pintura mural y del fragmento de la columna P2, y, finalmente, para garantizar la uniformidad de la lectura estética, la reintegración cromática de zonas intervenidas. Procesos de saneamiento y control ambiental fueron desarrollados al aplicar biocidas antes y durante la intervención.
- La estabilización de zonas inestables implicó los siguientes pasos. Revisión de la profundidad y el grado de afectación de las alteraciones presentes, mediante la observación detallada de cada zona, con el fin de determinar las áreas de intervención y el nivel de aplicación requerido de mortero de inyección. Posteriormente, se procedió a la humectación del soporte mediante la inyección de alcohol etílico al 70 %, favoreciendo la adecuada penetración del mortero. Por último, la inyección del mortero empleando aguja o sonda de diferentes calibres, de acuerdo con las necesidades específicas de cada área intervenida.



Ilustración 69. Imagen 1 Humectación del soporte con alcohol etílico al 70%. 2 Aplicación del mortero de inyección mediante sonda y agujas.

La aplicación del mortero se realizó en diferentes puntos de los pilares, bóveda y en las pilastras, con excepción de las Nos. 3 y 7, las cuales no requerían intervención con mortero de inyección; de igual manera, los nichos N2C, N3A, N3C, N6A y el nicho No. 7 (A, B y C) no presentaron áreas que justificaran la aplicación de este tratamiento.

El mortero utilizado fue el recomendado por las pruebas y cuya formulación se detalla en el capítulo 9. Una vez éste fraguó, donde el mortero de inyección se observó con una tonalidad más clara, fue reintegrado usando tierras de la zona humectadas y aplicadas directamente sobre los morteros.

- Luego en las zonas de grietas y disyunción en lajas se aplicó mortero de resane cerrando estas discontinuidades, acá también la formulación fue la recomendada por las pruebas buscando la tonalidad más próxima a la roca y las tonalidades oscuras de este hipogeo.



Ilustración 70. Izquierda aplicación de resane estructural y derecha, pilar 2 donde se aprecia en la parte alta, el fragmento adherido.

- Para hacer el reforzamiento estructural del pilar 2 se estableció primero con la asesoría del ingeniero estructural el área en la cual debía añadirse mortero estructural, en concordancia con el principio de mínima intervención el área seleccionada se acotó bastante y ésta fue cubierta con mortero estructural. El proceso implicó primero humectación de la roca, aplicación de puente de adherencia y posterior aplicación de mortero estructural al que se le añadió a la formulación generada en laboratorio, pedazos de fique de 1cm de largo que buscaron disminuir el riesgo de que éste se agrietara, para finalizar sobre el mortero se lanzó tierra que se colectó del piso próximo al pilar lo que permitió dar un acabado de apariencia muy similar a la roca en proximidad.
- Además, se verificó que de los fragmentos de este pilar que se encontraban en el piso sólo el de mayor tamaño podía ponerse en pie. Para poderlo instalar fue necesario aplicar la técnica de pie de amigo que permitió sostener el fragmento en posición mientras los materiales

utilizados para la adhesión fraguaron. Para sostener el fragmento se pusieron dos espigos de fibra de vidrio bajo éste, adheridos con resina epóxica (Anchorfix) y previo al mortero estructural fue humectada la roca y se aplicó una resina acrílica (Sikalatex) que sirvió como puente de adherencia. El mortero estructural fue entonces aplicado buscando llenar todos los espacios en torno al fragmento y entre éste y la roca de tal suerte que se aseguró la adecuada adhesión.

- En la segunda temporada, después de que las intervenciones realizadas para estabilizar la pintura mural y reforzar el pilar estuvieron prácticamente finalizadas, se evidenció crecimiento microbiológico detallado que fue removido con la ayuda de hisopo embebido en alcohol al 70%.

Hipogeo S11

- En términos generales, la intervención estructural del hipogeo S11 consistió principalmente en la recuperación de área volumétrica perdida del pilar 1 respecto a sus secciones transversales, la recuperación de capacidad de carga en pilares y pilastras gracias a la estabilización realizada con mortero de inyección y la estabilización de diaclasas y fracturas. Adicionalmente la estabilización de la pintura mural mediante aplicación de mortero de inyección y el saneamiento ambiental realizado con biocidas antes y durante la intervención.
- El análisis visual de la pilastra 1 permitió establecer una afectación estructural (falta de soporte en la parte media). Así las cosas, se aplicó mortero en zonas débiles, se estabilizaron grietas inyectando micromortero, y se usó mortero estructural para recuperar sección y aportar resistencia siguiendo los mismos lineamientos y uso de materiales que los del hipogeo S10.



Ilustración 71. Secuencia: Imágenes 1 y 2, Condición inicial de la columna 1 (P1). Imagen 3. Resultado final de la intervención estructural en P1; imagen 4, proceso de intervención.

- Unión de fragmentos. Al respecto, se procedió con la saturación hídrica del fragmento y a la instalación de una formaleta para ubicar el fragmento y sostener la unión entre la pieza

faltante a la columna 1, durante el fraguado del mortero estructural, éste fue luego aplicado a su alrededor.

- En este hipogeo también se estabilizaron las zonas más frágiles con mortero de inyección y se aplicaron en zonas de grietas y fracturas mortero de resane.

Hipogeo S12

- La intervención del hipogeo S12 consideró la estabilización del soporte pétreo mediante la inyección de micromortero, resanes perimetrales y consolidación localizada. También en la readhesión de zonas craqueladas o desprendidas del enlucido, y saneamiento ambiental y la reintegración cromática de zonas intervenidas. Procesos de saneamiento y control ambiental fueron desarrollados.



Ilustración 72. Condición inicial a nivel de bóveda.



Ilustración 73. Intervenciones de inyección de micromortero a nivel de bóveda.

- La intervención se enfocó en la estabilización del soporte pétreo, mediante la inyección de micromortero. Al respecto, se realizaron inyecciones de micromortero en el sector izquierdo de la bóveda, priorizando las zonas de intersección de diaclasas y en las pilastras que

requirieron ser estabilizadas por presentar disyunción en lajas, desprendimientos. En las zonas donde se inyectaron los morteros que presentaban disgregación y descamación fue necesario aplicar previamente consolidante (Wacker OH).

- La intervención contempló también la estabilización mediante mortero de inyección de micromortero en zonas de galerías y readhesión de la pintura mural mediante aplicación de tylosa en zonas donde la interfase entre enlucido y soporte pétreo era muy estrecha.



Ilustración 74. Intervenciones de readhesión de pintura mural con tylosa

- Al respecto es importante mencionar que debido a la cantidad de zonas afectadas en la pintura mural el trabajo en este hipogeo requirió mayor compromiso en tiempo y número de personas. Lo anterior llevó a que se dieran las condiciones favorables para el crecimiento desmedido de hongos, algunos de los cuales fueron eliminados puntualmente con hisopo y alcohol, otros persistieron por más de tres meses al cabo de los cuáles se regularon hasta localizarse en zonas muy puntuales.

Hipogeo S21

- En el hipogeo S21 se empleó mortero de inyección para tratar las diaclasas, las grietas, las fracturas y las oquedades más profundas, con el fin de dar estructura y solidez al soporte. En cada caso se revisó la profundidad y afectación de estos deterioros, de acuerdo con lo observado en cada zona (si se mueve al tacto, si se observa debilidad por la extensión, amplitud y en general, por el grado de afectación de cada una de estas situaciones), priorizando sectores con pérdida de adherencia entre capas de roca e inminente riesgo de desprendimiento-
- Adicionalmente se hicieron labores de control y saneamiento ambiental desarrolladas implicaron la aplicación de biocidas y el tratamiento y la eliminación de raíces. Este procedimiento se efectuó manualmente., aprovechando el efecto del biocida que las secó.



Ilustración 75. Tratamiento de diaclasas, grietas, fracturas y oquedades

Hipogeo Sa1

- En términos generales, la intervención estuvo enfocada hacia la estabilización del soporte pétreo, y el refuerzo estructural con especial énfasis en la recuperación de la unidad del pilar P2 y la estabilización de diaclasas en nichos, cámaras y pilastras. De manera complementaria, se realizó la estabilización y readhesión de la pintura mural en zonas desprendidas, la remoción manual controlada de raíces y eflorescencias salinas y depósitos de tierra, proceso que resultó determinante para identificar con precisión las zonas con disgregación del soporte y afectaciones en los estratos pictóricos que, de otro modo, permanecían ocultas. La intervención contempló también el saneamiento ambiental con aplicación de biocida y remoción puntual de cuerpos fúngicos.



Ilustración 76. Imagen 1 antes de la intervención, 2 en rojo zonas intervenidas y 3. Parte posterior de la columna donde se le la cantidad de mortero estructural aplicado.

- Con el fin de incrementar el volumen del pilar P2 para reforzarlo estructuralmente se hicieron primero aplicaciones puntuales de mortero de inyección en zonas inestables, luego si de mortero estructural previa humectación de la roca y aplicación de puente de adherencia.

- Para recuperar la unidad de esta columna, se desmontaron los fragmentos que se encontraban allí ubicados y sostenidos por cuerdas para adherirlos, lo anterior implicó el desmonte de los fragmentos, la estabilización de las superficies en el pilar, su humectación, aplicación de puente de adherencia y uso del mortero estructural para asegurar los fragmentos.



Ilustración 77. Detalle donde se aprecia el fragmento inferior antes y después de unirlo

- En este hipogeo se precisó que la intervención de refuerzo estructural debía hacerse desde dentro, empleando los morteros de inyección y estructural que incrementen la resistencia del macizo rocoso. Considerar un refuerzo desde la superficie, puede resultar en un desacierto, por la escasa cobertura que tiene. Siendo así las zonas de grietas, fracturas y galerías se trabajaron con mortero de inyección en muchos casos usando no solo mortero de inyección sino también pequeños fragmentos de toba que permitieron llenar discontinuidades.
- En este hipogeo se establece que los puntales metálicos que se encuentran en su interior se deben conservar. Al respecto, es importante que los colaboradores del Parque Arqueológico de Tierradentro continúen con el monitoreo (puede ser quincenal), verificando que el elemento de soporte no presente pérdida de tensión

Las intervenciones antes descritas evidencian que la aplicación de metodologías particulares para cada uno de los hipogeos permitió priorizar y solventar los deterioros asociados a la estabilidad estructural y con riesgo de pérdida de material y configurar una base procedimental para el abordaje de estas problemáticas fundamentales. Estas intervenciones fueron debidamente documentadas y por tanto su seguimiento futuro es posible, y constituyen una guía para intervenciones que deban realizarse en otros hipogeos.

12. MONITOREO BIOLÓGICO Y DE LAS INTERVENCIONES

12.1 ANTECEDENTES

Como fue descrito en el capítulo 7, en el segundo semestre de 2025 se dio inicio al Proyecto FIAN - Documentación, estudios e intervenciones de los hipogeos en estado de conservación crítico en el Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro y durante las dos primeras salidas realizadas en septiembre y octubre de 2025 se evidenció la presencia de biocolonización en los hipogeos en estudio (A13, A14, A36, A41, SA1, SA8, S5, S10, S11, S12 y S21) particularmente la presencia localizada de raíces, algas y manchas blancas y de otros colores que podían asociarse a hongos, además de insectos y otros animales. Debido a los reportes de años anteriores donde se evidencia que la carga ambiental microbiana es importante en estos hipogeos, lo que no es apto para la salud, fue considerada la necesidad de realizar un control ambiental antes y durante las temporadas de trabajo del 2026 realizadas en febrero y marzo de 2026.

Las labores adelantadas en estas dos temporadas implicaron la documentación e intervención de los hipogeos antes referidos, lo que implicó que en hipogeos como el SA1, S10, S11 y S12 permanecieran por varios días varias personas del equipo FIAN y el Parque lo que llevó a que especialmente en hipogeos como el S12 y el SA1 se registrara un alza en las condiciones de humedad relativa y temperatura. Lo anterior generó un entorno propicio para la biocolonización microbiana, con características algodonosas, crecimiento irregular, que varía en color desde negros, café, rojos, blancos y verdes, especialmente los pisos de dichos hipogeos y las zonas próximas a los puntos donde se aplicó tilosa, morteros de inyección (Ilustración 76) y estructurales (Ilustración 77).



Ilustración 78. Crecimiento micelar evidenciado en los Hipogeos S10, S11 y S12. Este crecimiento se ve asociado a las zonas circundantes a los puntos de inyección de mortero. Luz UV negativo. Las flechas señalan el crecimiento alrededor de los puntos de inyección. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.



Ilustración 79. Fragmento adherido en la parte superior de la columna derecha del hipogeo S11. Donde se logra observar el crecimiento de indicadores algodonosos sobre la pieza y en el borde. No se evidencia crecimiento sobre el mortero. Fotografías tomadas por Personal del PAT.

Dado que el crecimiento continuó después de finalizada la temporada de marzo se emprendió el seguimiento de los hipogeos lo que llevó a formular el Protocolo de seguimiento a control biológico que se encuentra en el anexo 5 de este informe y a tomar, en abril muestras de dicho crecimiento microbiano para ser analizadas en Laboratorio de Microbiología Agrícola y Ambiental de la Universidad Jorge Tadeo Lozano como se describe en la siguiente tabla:

Alto	Hipogeo	Actividad Realizada
Segovia	S10	Toma de impronta en zona de Pilastra 4.
	S11	Toma de impronta en zona de Columna 2 Cara D
	S12	Toma de impronta en zona de Nicho 4
		Toma de impronta y aplicación de biocida Cloruro de Benzalconio 1% en zona de Escaleras del foso
		Aplicación biocida Cloruro de Benzalconio 1% en zona del suelo en el nicho 7 de la derecha, junto al umbral
	S21	Toma de impronta en columna 2.
San Andrés	SA1	Toma de impronta en zona de Columna 1 Cara D
		Toma de impronta en zona superior de la Columna 2 Cara B y aplicación de biocida Ácido Piroleñoso 6% en la parte inferior de la Columna.
		Toma de impronta en zona de Columna 2 Cara D
		Toma de impronta en zona de Pilastra 1
		Aplicación de biocida Ácido Piroleñoso 6% en zona del suelo del nicho 1 sector izquierdo junto a la pilastra del umbral.

Ilustración 80. Zonas de pruebas y toma de improntas realizada en abril de 2026.

Este capítulo presenta las causas que explican el crecimiento fúngico antes relacionado, los resultados obtenidos con el análisis de las muestras tomadas sobre la biocolonización, la aplicación y evaluación de pruebas biocidas, el monitoreo biológico y de las intervenciones realizadas, y las conclusiones y recomendaciones a las que se llega.

12.2 CAUSAS ATRIBUIBLES AL CRECIMIENTO FÚNGICO EN MARZO DE 2026

Los hipogeos de Tierradentro se caracterizan por presentar condiciones microclimáticas relativamente estables, pero altamente frágiles. Dichas condiciones se caracterizan por una alta humedad relativa entre rangos de 99 % a periodos de saturación llegando a un posible punto de rocío, baja ventilación, escasa o nula radiación solar y temperaturas constantes que fluctúan entre la 18º - 22ºC. Lo anterior, como fue ya descrito genera condiciones adecuadas para el crecimiento biológico. La presencia de microorganismos en las paredes y pisos de los hipogeos, según refieren los trabajadores del Parque, ocurre especialmente en épocas de mucha lluvia, de alza de la temperatura ambiente, asociada a filtraciones de agua que arrastran sustratos minerales y orgánicos al interior de los hipogeos, o a épocas en las que se han recibido muchos visitantes.

A partir de estas observaciones y dando una posible respuesta a las novedades e incidencias de estos indicadores asociados a crecimiento microbiano se plantean los anteriores descritos y otras posibles fuentes que favorecen la biocolonización.

1. *Fuente extra de humedad:* Se establece una estrecha relación entre las zonas de biocolonización por hongos con zonas intervenidas. Permitiendo evaluar los componentes de cada una de las intervenciones realizadas donde la inyección de morteros, aplicación mortero estructural y estabilización con tilosa, así como el saneamiento pueden ser fuente de humedad que favorece el crecimiento microbiano.
2. *Aplicación de biocidas:* Como parte de las intervenciones realizadas en este proyecto en 2026 en los hipogeos se emplearon productos biocidas diferentes a los usados previamente (ácido piroleñoso), lo cual pudo generar un cambio en la comunidad microbiana presente, alterando su equilibrio natural. En ese proceso, además de reducir algunos microorganismos sensibles, también pudieron verse afectados organismos que limitaban de forma natural el desarrollo de otros lo que favoreció su crecimiento desmedido.
3. *Materiales:* Componentes como los suelos provenientes de zonas transcurridas por personas de a pie o animales, permite la acumulación de microorganismos que pueden verse favorecidos al entrar en ambientes como los proporcionados para ese momento en el hipogeo.
4. *Presencia prolongada del personal al interior del hipogeo:* Así como la humedad es un factor determinante en el crecimiento microbiano la temperatura y vapores corporales pueden desencadenar la activación de esporas microbianas latentes en el ambiente de hipogeo. El personal al requerir un acercamiento a la zona de trabajo puede transferir parte de su temperatura corporal al hipogeo por medio de radiación (ondas electromagnéticas), que permiten el flujo de energía sin contacto físico.
5. *Temporada climática:* El clima del Cauca se encuentra descrito como un régimen bimodal, siendo los meses de marzo – abril y octubre – noviembre y siendo temporadas secas en los meses intermedio de estas temporadas de lluvia. Por lo cual puede ser un factor determinante

en el desarrollo de estos microorganismos, debido a la precipitación se presenta saturación de humedad en los suelos (Boletín 072. Informe Técnico diario: 13 de marzo de 2026 proporcionado por el IDEAM). De la misma manera, estas condiciones favorecen la pudrición de materiales como la madera (Ilustración 79) presente en la infraestructura de protección de los hipogeos y que afectan la estabilidad de los hipogeos.

Cabe recalcar que los parámetros ambientales son un factor clave en el desarrollo y vitalidad de los organismos y microorganismos que habitan o se encuentran en latencia al interior del hipogeo. Si bien los productos aplicados son efectivos frente a los grupos biológicos objetivo su residualidad o periodo de acción puede verse afectado por el ambiente, siendo los periodos de lluvia, periodos de temperatura elevados.

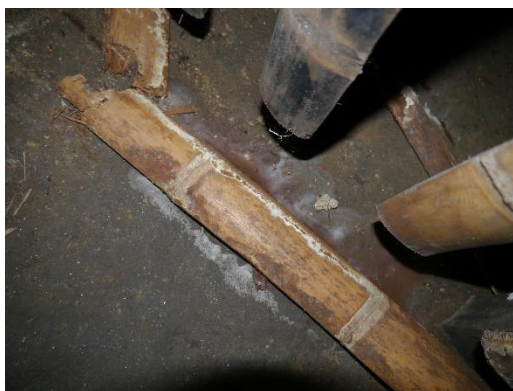


Ilustración 81. Cerca de madera deteriorada, la cual puede ser fuente de nutrientes para organismos y hongos xilófagos. SA8. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

A su vez se recomienda no dejar al interior del hipogeo cintas adhesivas o materiales reactivos como papel que pueden favorecer la recepción de esporas fúngicas, que logran degradar la celulosa de la cual se componen (Ilustración 80).



Ilustración 82. Materiales ajenos a los hipogeos que favorecen el desarrollo de colonias fúngicas dada dados sus componentes como la celulosa o adhesivos. Cintas de papel en S12 y S30 y hoja de papel. Fotografías tomadas por Antonio Guarnizo-Pérez.

La humedad aportada por los materiales de intervención y por la presencia de las personas al interior del hipogeo, el alza de las temperaturas, sumado al CO₂ producido que quizás modificó el pH de las

superficies porosas favoreciendo su bioreceptividad, y la reacción adversa de algunos microorganismos frente a la aplicación de biocidas, pudo generar estrés y esporulación.

12.3 IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN ZONAS DE CRECIMIENTO BIOLÓGICO DESMEDIDO

Con el fin de hacer la identificación de microorganismos presentes en las superficies de los hipogeos donde se reportó el crecimiento biológico desmedido, se tomaron una serie de improntas de las cuales el compendio de resultados se encuentra en el documento de *Lectura de Improntas Comisión Abril* (Guarnizo-Pérez, 2026)

El empleo de improntas facilitó la identificación precisa de los morfotipos fúngicos responsables de la biocolonización sobre las superficies del hipogeo. Mediante este método se registraron las siguientes observaciones:

- **SA1:** Colonización generalizada con diversidad cromática, dominada por *Aspergillus* spp. Además de la presencia de indicadores puntiformes resinosos, relacionados con el afloramiento de resinas vegetales referenciados por las conservadoras en el informe generado por el proyecto FIAN (Jaimes, 2026)
- **S10:** Presencia de colonias algodonosas correspondientes a géneros *Penicillium*, *Curvularia*, *Cunninghamella*, *Aspergillus* y *Trichoderma*.
- **S11:** Identificación de crecimientos oscuros atribuidos al género *Curvularia*.
- **S12:** Alta incidencia de estructuras asociadas predominantemente a *Trichoderma* spp. y posibles Oomycetos.
- **S21:** Colonización leve y localizada por *Curvularia* spp. y *Penicillium* spp.

En términos generales, los géneros fúngicos más reportados en los hipogeos fueron *Aspergillus* y *Curvularia*, seguidos por *Penicillium*, *Trichoderma* y *Cunninghamella*. Cada uno de ellos exhibe características ecológicas distintivas, tales como resistencia a biocidas, tolerancia a ambientes xerofíticos y una notable capacidad de colonización y competencia.

Es importante destacar que algunos de estos hongos, como *Aspergillus* spp. y *Cunninghamella* spp., pueden representar riesgos potenciales para la salud pública (Gorai, Barman, Gond, & Mandal, 2020; Lima-Neto, La Pape, & Neves, 2019)

La presencia de colonización fúngica, actualmente observada como manifestaciones de micelio algodonoso, corresponde con los microorganismos previamente identificados en el ambiente del hipogeo tanto en proyectos anteriores como en el presente, descritos en el capítulo 7. Por lo tanto, se infiere que la carga microbiana permanece latente en el interior de los hipogeos.

Morfotipo	Descripción	Estructura microscópica
<i>Aspergillus</i> spp.	Hongo filamentoso ubicuo, se encuentra comúnmente en suelo y material orgánica en descomposición, además de ser movilizado por el aire.	

	Se condiciona a temperaturas entre 15°C y 30°C y una actividad de agua moderada a baja (se considera un hongo Xerofítico) Su gran producción de conidios facilita su dispersión, en condiciones de ventilación reducida y crecimiento exponencial puede causar afecciones a la salud, como aspergilosis broncopulmonar, reacciones alérgicas e intoxicación por micotoxinas, es un patógeno oportunista en personas inmunocomprometidas (Cepero De Garcia, 2012; St-Germain & Summerbell, 2011). Se reporta resistencia ante productos con principios activos como el Azoles (Lima-Neto, La Pape, & Neves, 2019)	
Curvularia spp.	Habitante del suelo y de material orgánico en descomposición. Termotolerante por lo cual, se adapta a cambios drásticos de temperatura, asociado a humedades relativas de >80%, además de ser un fitopatógeno para cultivos como gramíneas, pastos y algunos frutales. Son hongos con capacidad de producción de melanina (Pigmento que funciona como estrategia de resistencia a radiación solar y productos biocidas). Es causal de infecciones cutáneas o alergias poco comunes en pacientes con sistemas inmunes comprometidos (Cepero De Garcia, 2012).	
Trichoderma spp.	Fundamentalmente como componente del suelo, asociado a raíces de plantas y madera en descomposición. Crece en condiciones óptimas de alta humedad relativa (>80%) y temperaturas 18° C y 30°C. Actúa como un competidor, formado biopelículas blancas y verdes densas que pueden cubrir grandes áreas de superficie. Generalmente no se encuentra asociado a riesgos a salud pública (Cepero De Garcia, 2012; Gorai, Barman, Gond, & Mandal, 2020).	
Penicillium spp.	Componente recurrente en suelos y corrientes de aire, hongo ubicuo y cosmopolita de áreas abiertas y de baja ventilación. Su capacidad de crecimiento se encuentra en rangos óptimos de 15°C y 25°C de temperatura y humedades variadas. Su presencia suele estar asociada a la disponibilidad de fuentes de carbono que puede metabolizar para su nutrición. Puede causar afecciones a la salud dada la capacidad de producir masas de esporas, además de alergias y neumonías por hipersensibilidad (St-Germain & Summerbell, 2011) (Cepero De Garcia, 2012).	

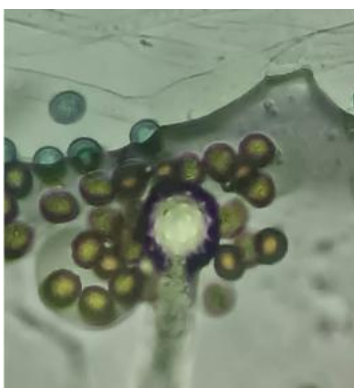
Cunninghamella spp.	Hongo filamentoso recurrente en suelos con disponibilidad de materia orgánica, asociado a climas cálidos. Presenta condiciones de crecimiento extremadamente rápido, evidenciado por la aparición de micelio algodonoso denso. Los ejemplares de este género son termotolerantes logrando sobrevivir a temperaturas de 45°C. Su presencia suele estar asociada a la acumulación de detritos o materia orgánica movilizada por infiltración de agua. Dado su crecimiento rápido es un hongo competidor que abarca grandes superficies en condiciones de saturación hídrica. Es responsable de afecciones a la salud, causando mucormicosis que afecta a pacientes con sistemas inmunes debilitados o que presentan enfermedades de base que comprometen su sistema inmune (St-Germain & Summerbell, 2011; Cepero De Garcia, 2012; El-Seadawy, El-Shabasy, & Zayed, 2024).	
-----------------------------------	--	---

Tabla 25. Géneros de hongos filamentosos reportados en las improntas tomadas de las superficies con biocolonización microbiana al interior de los hipogeos.

El análisis superficial posterior al proceso de limpieza en la pilastra 1 del Hipogeo SA1, evidenció el afloramiento de indicadores puntiformes con coloraciones oscuras. Estas manifestaciones, de acuerdo con las observaciones realizadas en la impronta, sugieren la posible presencia de resinas vegetales. Este fenómeno podría estar asociado a una respuesta del material tras el procedimiento de limpieza. No obstante, debido a la naturaleza de estos indicadores y su potencial significado para la conservación de la superficie, se recomienda establecer un monitoreo continuo en la zona para evaluar su evolución y determinar si se requiere alguna intervención adicional.

12.4 APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE PRUEBAS DE BIOCIDAS

Las acciones de aplicación de biocida se desarrollaron conforme al *Protocolo de seguimiento al control biológico - Tierradentro 2026* (Alvarez y Guarnizo-Pérez, 2026) que corresponde con el anexo 5 de este documento en zonas localizadas de los hipogeos S12 y SA1 respectivamente (Ver tabla 1). Esta prueba permitió observar directamente la actividad de los biocidas en el sitio intervenido, empleando dos metodologías principales para su aplicación: el uso de brocha en superficies verticales y la aplicación mediante chorro en los suelos.

En las primeras etapas tras la aplicación de los biocidas, se observa que tanto el cloruro de benzalconio al 1% como el ácido piroleñoso al 6% presentan una cobertura inicial significativa y logran remover el micelio fúngico presente en las superficies y pisos tratados (Tabla 26).

Al evaluar la evolución posterior, se evidencia que el cloruro de benzalconio al 1% presenta una recolonización leve del hongo a partir del segundo día después de la aplicación. Esta biocolonización se mantiene en niveles bajos y no se detectan conglomerados densos de micelio. Específicamente, en el suelo del nicho S12, la manifestación fúngica disminuye de manera notable y permanece estable, sin signos de recolonización hasta el quinto día. A partir de este momento, sólo se aprecia un crecimiento leve de micelio.

Por otro lado, el comportamiento del ácido piroleñoso al 6% difiere del biocida químico. Tras su aplicación, se extiende el efecto inhibitorio durante los tres primeros días. Posteriormente, se detecta un crecimiento fúngico leve y lento, que con el paso del tiempo se intensifica, generando formaciones algodonosas aisladas no homogéneas, particularmente visibles en la superficie vertical de la columna 2, cara B. En cuanto al suelo, el ácido piroleñoso mantiene una eficacia aceptable hasta el día cinco.

Alto/Hipogeo /Zona aplicada	Día 0	Día 5	Día 12
Segovia / S12 / Superficie vertical			
Segovia / S12 / Suelo			
San Andrés / SA1 / Suelo			
San Andrés / SA1 / Superficie Vertical			

Tabla 26. Monitoreo Pruebas Biocidas Cloruro de Benzalconio 1% y Ácido Piroleñoso 6%

Es importante destacar que la eficacia de los biocidas aplicados depende de diversos parámetros ambientales, la presencia de biocolonización activa y las características específicas de las superficies tratadas. La duración del efecto puede verse influida por la alta porosidad de la superficie, permitiendo que el biocida se desplace a través del sistema hasta quedar retenido en áreas de baja porosidad, como el suelo. Asimismo, la recolonización temprana de las superficies intervenidas puede estar

asociada a la presencia e influencia de micelios y esporas activas que facilitan una nueva colonización de las zonas tratadas.

Además del monitoreo de las pruebas específicas, se realizaron observaciones adicionales en otros puntos de los hipogeos, especialmente en los hipogeos S10, S11, y S21. Los trabajadores identificaron estas áreas como sitios donde los crecimientos microbianos persisten de manera constante y no se interrumpen, lo que indica una tendencia de proliferación continua. Es relevante subrayar que la presencia generalizada de estos organismos no sólo puede provocar modificaciones en la estructura y estabilidad física de la roca en el hipogeo, sino que también representa un riesgo potencial para la salud tanto de los trabajadores como de los visitantes que transitan por el lugar. Por esta razón, el fenómeno de la biocolonización no sólo revela la vulnerabilidad inherente de los hipogeos frente a estos agentes, sino que también plantea la necesidad de abrir nuevas líneas de investigación.

Dichas investigaciones deben estar orientadas a la formulación de estrategias de mitigación adecuadas, capaces de abordar tanto los eventos actuales como los posibles futuros episodios de biocolonización. Además de dar un enfoque donde la ecología microbiana y el entorno natural puedan establecer un equilibrio que busque la coexistencia y conservación patrimonial (Oriol, Boust, François, Pallot-Frossard, & Warscheid, 2021)

12.5 EVALUACIÓN Y MONITOREO REALIZADO EN JUNIO DE 2026

Con el fin de hacer seguimiento a las intervenciones realizadas entre febrero y marzo de 2026, comprender la evolución del crecimiento fúngico desmedido en hipogeos intervenidos y proponer un plan para su abordaje se llevaron a cabo las siguientes acciones. Estas consideran las condiciones ambientales, los materiales afectados y el equilibrio del ecosistema subterráneo, así como la afectación al ser humano, garantizando la estabilidad de los hipogeos y condiciones de seguridad para la visita.

- **Hipogeo SA1**

En el **hipogeo SA1** se evidencia que el crecimiento biológico reportado para abril de 2026 ha disminuido, en el piso éste ya no sobresale con su coloración blanca, en cambio en la pilastra 2 se observa un crecimiento de un hongo de puntos negros, en la pilastra 3 se observa crecimiento puntual de hongo blanco y en el pilar 1 y pilar 2 se observa una gran cantidad de hongos de colores negro, blanco, rosado y amarillo. El pilar 2 por ser aquel donde se aplicó mayor humedad en las intervenciones es aquel que presenta más biocolonización sobre cada una de sus caras. Se toman las respectivas improntas sobre la pilastra 2 cara A, el pilar 1 cara D y el pilar 2 cara B para traer a Bogotá y que éstas puedan cultivarse en laboratorio. Además, en estos mismos puntos se hacen pruebas para la eliminación de la biocolonización evidenciando que el retiro puntual con pequeños fragmentos de esponja mágica humedecida en alcohol resulta el método más adecuado en la medida en que éste permite retirar los micelios sin levantar esporas. Cada fragmento de esponja es usado solo una vez por cada de sus caras y luego desechado.



Ilustración 83. Biocolonización, zonas donde se realizaron pruebas de limpieza en el hipogeo SA1



Ilustración 84. Raíces, zona donde se tomaron improntas en el pilar2 en la cámara del hipogeo SA1

En el hipogeo SA1 se observa el recrecimiento de las raíces que habían sido cortadas en los nichos 1 y 2 y en la pilastra 3 cara A, muchas de ellas atravesando los morteros de inyección sin generar en estos mayores deterioros. Se evalúa la intervención realizada en marzo de 2026 encontrando que la estabilización fue efectiva y los morteros de inyección no presentan biocolonización excepto en el pilar 1 donde hay que estabilizar algunos puntos y en el pilar 2 donde se aplicó mortero de inyección sin biocida y se evidencia crecimiento biológico. Tanto la estabilización de la bóveda como la adhesión del fragmento grande en el pilar 2 están aún pendientes.

- **Hipogeo S5**

En el hipogeo S5 no hay evidencia de biocolonización después de la aplicación de biocida en marzo de 2026. Sin embargo, se evidencia la necesidad de estabilizar algunos puntos de las pilastras 1, 2 y 3 con mortero de inyección.



Ilustración 85. Zonas de pilastras donde se debe hacer la estabilización en hipogeo S5

- **Hipogeo S9**

Se aprovecha la visita al Alto de Segovia para verificar el estado de conservación del **hipogeo S9**. Este hipogeo no fue intervenido por no presentar problemas importantes estructurales, de desprendimientos o disgregación. De todas maneras, fue visitado de nuevo con el fin de confirmar esta información evidenciando que mientras el soporte pétreo se encuentra bastante firme y estable, las principales afectaciones son de tipo estético, y están relacionadas con grafitis numerosos en los pilares 1 y 2 que han generado rayones al enlucido y resanes de fisuras, especialmente presentes en estos mismos pilares realizados con materiales que hoy no muestran un buen comportamiento pues se están desprendiendo parcialmente. Adicionalmente que hay pequeñas áreas desprendidas en la Pilastra 1, el Nicho 1, la Pilastra 3, el Nicho 4 y la Pilastra 7.



Ilustración 86. Intervenciones anteriores, grafitis y perforaciones en el hipogeo S9

- **Hipogeo S10**

En el **hipogeo S10** se evidencia aún la presencia de biocolonización por hongos detectada para marzo de 2026. Particularmente en el piso próximo al costado izquierdo del hipogeo y sobre la pilastra 2 se observan colonias de hongos algodonosos de color blanco. También en el pilar 2, sobre los morteros de resane que fueron aplicados en la cara A del pilar y no fueron preparados con biocidas se observan colonial de hongos amarillos y negros. Adicionalmente se observa que la intervención realizada solucionó los problemas de fragilidad de la roca y que hay solo un par de puntos en la pilastra 7 y el nicho 7 donde la pintura mural debe ser readherida haciendo uso del mortero de inyección.



*Ilustración 87. Zonas donde aún se evidencian los hongos y sobre las cuales se hicieron las pruebas de remoción directa
Hipogeo S10*

- **Hipogeo S11**

En el **hipogeo S11** la inspección permite evidenciar que la intervención cumplió adecuadamente con lo requerido y tanto el soporte pétreo como la pintura mural hoy se encuentran estabilizados. Además, que no se observa biocolonización sobre las superficies con lo cual la reacción que tuvieron los microorganismos después de las intervenciones de 2026 parece apaciguada y el estado de conservación al interior del hipogeo ya no muestra proliferación de microorganismos. Por lo cual se recomienda que puede de nuevo recibir visita.



Ilustración 88. Inspección en el hipogeo S11

- **Hipogeo S12**

En el **hipogeo S12** se evidencia aun la presencia de puntos localizados con proliferación de hongos, particularmente en la pilastra 3 y el nicho 7. Sobre estas dos zonas se toman improntas para su análisis en laboratorio. Sobre las superficies pétreas del pozo se evidencia también la presencia de hongos blancos, sobre la zona donde se realizó la prueba biocida en abril de 2026 con cloruro de benzalconio se toma una impronta para ser analizada en laboratorio. El pozo aun presenta un olor a tierra que los trabajadores han relacionado con la proliferación del hongo dada entre marzo y junio de 2026. Se deja listo un frasco pequeño con aceite esencial de canela que tiene efectos biocidas para que sea ubicado en las escaleras y contribuya a mejorar el olor.



Ilustración 89. Biocolonización, zonas donde se tomaron las improntas y se realizaron pruebas de limpieza en el hipogeo S12

En cuanto al monitoreo de las intervenciones realizadas en este hipogeo S12 se evidencia que en algunos de los puntos donde se aplicaron morteros, éstos se encuentran agrietados, ello pudo suceder porque, buscando minimizar la aplicación de humedad que favoreciera el crecimiento biológico en la intervención de marzo no se aplicó la cantidad de humedad requerida para que no se agrietaran. El agrietamiento de los morteros también puede estar relacionado con las características de la roca en este hipogeo, que se encuentra bastante seca, ávida de humedad, lo que pudo incidir negativamente en el fraguado del mortero de inyección al tomar humedad de ellos.

- **Hipogeo S18**

En el **hipogeo S18** se evidencia el recrecimiento del hongo blanco de gran tamaño sobre la pared suroriental de la cámara y de raíces especialmente en el costado nororiental de la cámara. De igual manera se aprecia la aparición de algas en el acceso y el piso de la cámara. Se evidencia la necesidad de estabilizar algunos puntos en el umbral, donde la roca está muy debilitada, lo anterior asociado a la existencia de una cerca de guadua que por estos días fue retirada. Lo que es un acierto pues este material de guadua favorece la presencia de biocolonización al interior del hipogeo.



Ilustración 90. Raíces y Hongo que crece de nuevo cubriendo la pared de la cámara en el hipogeo S18

- **Hipogeo S21**

En el **hipogeo S21** no se evidencia aparición de biocolonización después de la aplicación del biocida en marzo de 2026, sin embargo, si la presencia de raíces que quedaron aun sin retirar, con lo cual se procede a realizar su eliminación.

Se evalúa la intervención realizada en marzo de 2026 encontrando que la estabilización fue efectiva y los morteros de inyección no presentan biocolonización, sin embargo, en el pilar 1 y algunos puntos de las paredes de la cámara es necesario realizar aplicaciones muy puntuales de mortero de inyección lo que deberá considerarse en una próxima intervención



Ilustración 91. Zonas por estabilizar y eliminación de raíces que crecen de nuevo cubriendo la pared de la cámara en el hipogeo S21

De la visita realizada se ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

1. La intervención realizada por el equipo del proyecto FIAN resultó efectiva y permitió de hecho la estabilización de zonas frágiles del soporte pétreo y la pintura mural.
2. La aplicación de biocida en los morteros de inyección resultó acertada pues evitó que sobre estos apareciera biocolonización
3. En la mayoría de los hipogeos la aplicación de biocidas favoreció el control biológico y permitió que las raíces se debilitaran.
4. En los hipogeos S10, S11, S12 y SA1, pasados tres meses los hipogeos han ido encontrando un equilibrio en el cual la presencia de hongos que había sido detectada en marzo de 2026 y a la que se le ha hecho seguimiento, ha disminuido observándose aun de manera localizada en los hipogeos S10 y S12 y de manera más pronunciada en el hipogeo SA1.
5. Se realizaron pruebas para la eliminación puntual de la biocolonización de hongos encontrando un método eficiente para poderlos retirar.
6. Dado que el hipogeo S11 ya no presenta biocolonización, se deja abierto de nuevo al público. Para los hipogeos S10 y S12 se recomienda que se espere un mes mas antes de permitir de nuevo el acceso al público.

12.6 PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Propuesta de saneamiento y control biológico a corto plazo

Los hipogeos que presentan zonas puntuales donde aún hay colonización de microorganismos son el S10, S11, S12 y SA1, hipogeos que tuvieron mayor impacto (en términos de tratamientos y permanencia de personal) durante la intervención realizada en febrero y marzo de 2026. A

diferencia de los hipogeos S5, SA8, A36 y A41 en los cuales las incidencias por rebiocolonización se reportan mínimas a ausentes, en los hipogeos S21 y S18 se evidencia recrecimiento de raíces.

Considerando los resultados de las pruebas con biocidas arriba mencionados, lo visto durante el monitoreo realizado en junio y la evaluación de las improntas que evidencian la presencia de organismos que afectan la salud y cuyo crecimiento se encuentra activo, se plantea necesario el desarrollo del siguiente tratamiento:

Alto	Hipogeo	Propuesta de saneamiento y control biológico a corto plazo
Segovia	S10	Hacer el retiro puntual de microorganismos con esponja humedecida en etanol y por último aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo)
	S11	Hacer el retiro puntual de microorganismos con esponja humedecida en etanol y por último aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo)
	S12	Hacer el retiro puntual de microorganismos con esponja humedecida en etanol y por último aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo)
	S18	Dado que en este hipogeo se evidencia recolonización del hongo y crecimiento de raíces se recomienda primero aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo) y luego hacer el retiro puntual manual de raíces.
	S21	Dado que en este hipogeo se evidencia crecimiento de raíces se recomienda primero aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo) y luego hacer el retiro puntual manual de éstas
San Andrés	SA1	Dado que en este hipogeo hay mayor cantidad de zonas donde aun se evidencia la biocolonización se recomienda primero aplicar biocida generador de humo (Sanivlr Fumigineo) y luego hacer el retiro puntual de microorganismos con esponja humedecida en etanol.

Tabla 27. Propuesta de saneamiento y control biológico a corto plazo de los hipogeos de los Altos de Segovia (S10, S11, S12, S18 y S21) y San Andrés (SA1).

La aplicación de los biocidas será realizada por conservadores con el apoyo del personal del parque que se encargará luego de continuar el monitoreo y de ser necesario reportará mediante registro fotográfico la aparición de crecimiento biológico.

Recomendaciones la sostenibilidad de las intervenciones

- **Hipogeo SA1**

Es de vital importancia que el **hipogeo SA1** sea lo más pronto posible tratado con el fin de:

1. Estabilizar con mortero de inyección las zonas aun inestables en el pilar 1 y en la bóveda

2. Adherir el fragmento de gran tamaño en el pilar 2 realizando además el refuerzo de los fragmentos adheridos con espigo de fibra de vidrio.
3. Cortar puntualmente las raíces que se observen en la superficie del hipogeo una vez se hayan debilitado con biocida. Verificar si es posible podar los árboles aledaños que las están generando.



Ilustración 92.. Vista exterior del hipogeo SA1 donde se aprecia la proximidad de los árboles cuyas raíces afectan al interior.

- **Hipogeo S12**

En el **hipogeo S12** se verifica que las distintas zonas intervenidas fueron correctamente estabilizadas entre febrero y marzo de 2026, sin embargo, en algunos puntos donde se aplicaron morteros de inyección, particularmente en la zona de la bóveda arriba de pilastra 6, el nicho 7 y la pilastra 7, es recomendable reintegrar cromáticamente dicha intervención de tal suerte que no sean tan notoria la presencia de los morteros aplicados. Deberá también evaluarse si algunos de los morteros que se observan agrietados deben reemplazarse.



Ilustración 93. Zonas donde se recomienda evaluar la reintegración de los morteros de inyección o su reemplazo por estar agrietados. Hipogeo S12

Dado que en el marco del proyecto FIAN se adelantó una parte de la documentación del **hipogeo S9** se recomienda que para 2027 y por parte del equipo de conservación del ICANH se lleve a cabo una intervención que ayude a recuperar los valores estéticos que han sido afectados por factores antrópicos (reintegración de grafitis en columna 1 y 2), que aborde las intervenciones anteriores y establezca los puntos desprendidos y antes referidos.

Intervenciones pendientes en otros hipogeos

1. En los hipogeos S5, S21 y S10 deben estabilizarse en zonas muy específicas mediante inyección de mortero.
2. Con el fin de estabilizar los puntos identificados con mortero de inyección, adherir el fragmento grande en el hipogeo SA1 y hacer el retiro manual de biocolonización en los hipogeos S10, S12 y SA1 es necesario realizar una siguiente salida de campo con un equipo conformado por 4 restauradores y 1 biólogo y contar con el apoyo de 4 trabajadores del Parque. Dicha salida deberá tener una duración de 7 días.
3. En los hipogeos más profundos se confirma la necesidad de contar con un mecanismo que mejore las condiciones de seguridad para el acceso por el pozo puesto que las escaleras por tener escalones muy grandes resultan difíciles de recorrer y se corre con el riesgo de caídas o golpes. Se considera que en estos hipogeos se puede instalar un lazo de escalada que se amarre del cobertizo y sirva al respecto

13. EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TOBA VOLCÁNICA FRENTE A LA HUMEDAD EN LOS HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN.

13.1 INTRODUCCIÓN

El siguiente capítulo busca sintetizar el estudio realizado para comprender el fenómeno de la disgregación realizado en los altos de Segovia, San Andrés y el Aguacate, ubicados en el Parque Arqueológico de Tierradentro. Este análisis se enmarca en la necesidad de comprender los procesos de deterioro que más afectan el soporte de toba volcánica en los hipogeos y que fueron identificados por el diagnóstico realizado en el Plan de Conservación desarrollado entre 2023 y 2024 (Alvarez et al).

La disgregación compromete la cohesión de la roca y favorece la pérdida progresiva del soporte pétreo en los hipogeos. Su presencia se relaciona tanto con las características intrínsecas de la toba como con factores ambientales, entre ellos las fluctuaciones de humedad y temperatura, así como la acción de las corrientes de aire que ingresan al hipogeo y agua que proviene de precipitación o infiltraciones.

A partir de observaciones in situ, mediciones de contenido de humedad en los muros y absorción de humedad y pruebas in situ para establecer el nivel de disgregación, este estudio buscó identificar la localización, intensidad y características de la disgregación presente en los hipogeos accesibles de los tres altos mencionados, con el fin de aportar criterios diagnósticos útiles para futuros estudios y estrategias de conservación.

13.2 METODOLOGÍA

El análisis de disgregación en los altos se desarrolló a partir de la observación directa de los hipogeos accesibles, complementada con la revisión de información técnica proveniente de estudios previos de cada sitio. Se evaluaron las manifestaciones de la disgregación y descamación en términos de su localización, intensidad y características superficiales, con especial atención a zonas como escaleras umbrales y cámaras.

Para la identificación de la disgregación, se empleó una aproximación cualitativa basada en la inspección organoléptica y en la aplicación de pruebas de adhesión superficial mediante cinta adhesiva (*scotch tape test*) (Svanh, 2026), lo que permitió verificar la presencia de desprendimiento granular. A partir de esta prueba, se pudo estimar de manera aproximada la granulometría del material disgregado, diferenciando entre desprendimiento de grano fino y grueso.

De igual manera, se registraron variables asociadas al entorno y a las condiciones constructivas de los hipogeos, tales como la presencia de humedad, escurrimientos, intervenciones previas como recubrimientos en cemento y características superficiales del soporte, con el fin de establecer posibles relaciones entre estos factores y los procesos de disgregación observados. La información recogida fue consignada en el anexo 6 de este informe.

Evaluación del comportamiento de la toba volcánica frente a la humedad en los hipogeos con disgregación

Para el desarrollo de este componente, se estableció el seguimiento del contenido de humedad directamente en campo dentro de los hipogeos. Cabe precisar que, tras un análisis metodológico, se decidió prescindir de las pruebas de laboratorio, debido a que estas requerirían la extracción de muestras de gran magnitud que podrían comprometer la integridad estructural y de conservación del hipogeo. En su lugar, la evaluación se realizó mediante dos métodos técnicos complementarios: el uso de esponjas de absorción y la medición a través de un psicrómetro.

Esta metodología de absorción se aplicó de manera sistemática en tres puntos estratégicos de cada estructura: la entrada, el fondo de la cámara y el área del pozo. Este procedimiento permite obtener una lectura detallada de la dinámica de humedad en las zonas de mayor vulnerabilidad, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos en informes previos de referencia. La información recogida en los hipogeos estudiados, A13, A14, SA8, S10 y S12 fue consignada en los anexos de los Expedientes de documentación de dichos hipogeos anexos a este informe.



Ilustración 94. Mediciones de contenido de humedad realizados con el psicrómetro en cada lado de cada nicho y pilastra, hipogeos S11, S12. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

Monitoreo ambiental de los hipogeos SA8, A36 y A41:

El monitoreo ambiental se centró en el seguimiento continuo de las variables de humedad relativa y temperatura al interior y al exterior de los hipogeos. Para garantizar la recolección constante de datos, se utilizaron dispositivos data logger, los cuales permiten registrar las oscilaciones climáticas internas de manera autónoma.

Complementario a este registro, se realizaron análisis puntuales durante las visitas técnicas a los hipogeos, lo que permite contrastar la información recolectada por los sensores con las condiciones observadas en tiempo real. Este esquema de monitoreo facilita la identificación de patrones ambientales que podrían incidir en el estado de conservación de las estructuras subterráneas y sus

elementos asociados. La información recogida en los hipogeos estudiados, A13, A14, SA8, S10 y S12 fue consignada en los anexos de los Expedientes de documentación de dichos hipogeos anexos a este informe.



Ilustración 95: Instalación de dataloggers al exterior de los cobertizos. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026

13.3 RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN DE LA ROCA, CONTENIDO DE HUMEDAD, CONDICIONES AMBIENTALES, DISGREGACIÓN Y DESCAMACIÓN

Con el propósito de sustentar conceptualmente el presente estudio, es necesario definir los principales términos asociados al material constitutivo de los hipogeos y a los procesos de alteración identificados durante el análisis. A continuación, se desarrollan nociones relativas a la composición de la toba volcánica, la disgregación, la descamación y la influencia de las variables ambientales, así como los criterios de medición utilizados para la evaluación del deterioro.

Composición de la toba:

Como ha sido ya mencionado en capítulos anteriores, el soporte pétreo de los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro corresponde a una toba volcánica, también descrita como ceniza volcánica endurecida, sobre la cual fueron excavadas las tumbas. Sobre éste, en algunos casos, fueron aplicadas capas pictóricas o de preparación. Esta doble condición permite entender la toba no solo como un soporte geológico, sino como parte integral de la materialidad arqueológica del sitio.

Desde el punto de vista geológico, la toba de Tierradentro se relaciona con depósitos volcanoclásticos asociados al Miembro San Andrés de la Formación Popayán. Estos materiales se originaron por procesos volcánicos explosivos y por la acumulación de cenizas, fragmentos de pómez, vidrio volcánico, minerales y fragmentos de roca, posteriormente movilizados o retrabajados por procesos sedimentarios. Por esta razón, el soporte no debe entenderse como una roca homogénea, sino como un material compuesto por partículas de distinto origen, tamaño y grado de alteración.

Los análisis realizados en el marco de este proyecto y referidos en los antecedentes de estudio de los hipogeos estudiados permiten establecer que la toba se clasifica principalmente como toba cristalina-lítica. Esta denominación indica que su composición incluye tanto cristales minerales como fragmentos líticos, es decir, pequeños fragmentos de otras rocas volcánicas. De manera recurrente se

identifican feldespatos como componente dominante, acompañados por cuarzo hialino, hornblenda, biotita y fragmentos líticos subordinados. Esta composición mineralógica evidencia el carácter volcanoclástico del soporte y explica su apariencia granular, en la que se reconocen partículas claras y oscuras empaquetadas en una matriz de baja consolidación.

Como fue referido en el capítulo 5, la composición de la toba tiene una relación directa con su comportamiento frente a la disgregación. Al tratarse de una roca no soldada o débilmente litificada, con baja cohesión natural, porosidad importante (cercana al 30%) y presencia de vidrio volcánico susceptible a alteración, el soporte presenta una tendencia natural a la friabilidad. La hidratación del vidrio volcánico y su transformación parcial en minerales de arcilla modifican la matriz interna de la roca, favoreciendo la retención de humedad, la circulación de soluciones y la formación de porosidad secundaria. Estas condiciones hacen que el material pueda perder cohesión superficialmente y desprender partículas, especialmente cuando se combina con fluctuaciones de humedad, secado, infiltración o exposición ambiental.

Disgregación, descamación y granulometría:

La disgregación o desintegración granular se refiere a la pérdida de cohesión entre los granos minerales de un material pétreo, lo que genera desprendimiento progresivo de partículas, friabilidad superficial y pulverización de la superficie. Este deterioro puede manifestarse como pérdida de granos finos o gruesos dependiendo del estado del soporte y del tamaño de las partículas desprendidas.

La descamación, por su parte, corresponde al levantamiento o separación de capas superficiales en forma de escamas o láminas. Ambos procesos pueden presentarse de manera asociada cuando el debilitamiento interno del soporte favorece desprendimientos mayores.

La toba volcánica de los hipogeos puede entenderse como un material de composición heterogénea, formado por cristales minerales, fragmentos líticos, pómez, vidrio volcánico y una matriz parcialmente arcillosa. Su valor como soporte arqueológico se relaciona precisamente con esa composición: por un lado, su baja dureza y débil consolidación facilitaron la excavación y moldeado de las tumbas y su forma estructural interna; por otro, esas mismas características la hacen vulnerable a procesos de disgregación, descamación y pérdida volumétrica. Por ello, la composición de la toba no constituye un dato aislado dentro del estudio, sino un factor fundamental para explicar la fragilidad del soporte y la forma en que este responde a las condiciones ambientales del Alto del Aguacate y de los demás altos de Tierradentro.

La granulometría de la toba en los hipogeos de Tierradentro evidencia una predominancia de partículas correspondientes a ceniza gruesa, con rangos frecuentes entre 0,125 y 0,49 mm, equivalentes, desde una lectura sedimentológica, a fracciones de arena muy fina a fina. Esta doble lectura es importante porque permite entender el material tanto desde su origen volcánico como desde su comportamiento físico frente al deterioro: aunque se trata de depósitos piroclásticos, su tamaño de grano y su disposición generan una textura semejante a la de un material arenoso poco consolidado. En varias muestras también se registran variaciones hacia tamaños más finos, entre 0,06 y 0,24 mm, así como la presencia ocasional de fragmentos mayores que pueden alcanzar rangos entre 0,5 y 1,99 mm. Esta distribución indica que la toba no es completamente uniforme, sino que presenta

una mezcla de partículas finas, medias y algunos fragmentos más gruesos, lo que contribuye a su aspecto granular marcado.

La relación entre granulometría y disgregación resulta fundamental para comprender el comportamiento del soporte. En el presente documento de disgregación se mostrará que mediante la prueba de cinta adhesiva o scotch tape test, fue posible estimar de forma aproximada el tamaño del material desprendido, diferenciando entre pérdida de grano fino y grueso. Esta observación es coherente con la caracterización petrográfica de la muestra SA-1, donde se identifican partículas claras y oscuras empaquetadas en un rango amplio de 0,06 a 2 mm, con tamaño promedio de 0,56 mm, selección moderada y contactos predominantemente puntuales entre fragmentos. La presencia de granos con tamaños variables, sumada a la ausencia de una cementación fuerte, favorece que las partículas se desprendan con facilidad cuando el soporte pierde humedad, recibe agua o experimenta cambios microambientales. Por ello, la granulometría no solo describe el tamaño de los componentes de la toba, sino que también ayuda a explicar por qué la superficie puede presentar pulverización, arenización o pérdida de fragmentos más visibles según el grado de cohesión local.

Condiciones ambientales y su relación con la disgregación:

La humedad y la temperatura son condiciones que no pueden ser eliminadas del entorno de un bien, por lo que para asegurar su conservación se requiere que estas condiciones se presenten sin fluctuaciones y que posibiliten así mantener la estabilidad de la materialidad de este. Esta situación se complejiza al abordar bienes ubicados en espacios abiertos como lo es el caso de los hipogeos del Parque Arqueológico Tierradentro.

En Tierradentro se destaca que las fluctuaciones en las condiciones de humedad y temperatura del soporte y del ambiente son un aspecto riesgoso para la estabilidad del soporte, situación que se evidenció en el Alto del Aguacate donde los hipogeos presentan una menor profundidad y la incidencia de las condiciones ambientales del exterior se da de manera más directa, situación que se evidenció en otros hipogeos en diferentes altos donde la profundidad de estos también es baja.

Condiciones ambientales cambiantes generan que tanto las arcillas presentes en algunos puntos de la toba como los minerales que la componen puedan presentar cambios volumétricos. El aumento y descenso de la humedad, junto con la temperatura, generan que se presenten micro dilataciones y posteriores contracciones que derivan en el debilitamiento del soporte pétreo.

Además, regularmente los hipogeos presentan humedades altas pero si hay filtraciones, la humedad a la que está expuesta la roca es aún mayor y frente a un mayor contenido de humedad, los poros se saturan, aumenta el tamaño de las arcillas expansivas y se genera la alteración de la matriz vítrea de la toba. En cambio, frente a intervenciones como la impermeabilización, que evita que las aguas lluvias mojen el terreno, la roca pierde humedad lo que ocasiona la retracción de las arcillas y el debilitamiento de la roca, al perder la humedad que llenaba los poros.

De lo anteriormente mencionado, se señala que las variaciones volumétricas propician la aparición de microfisuras, las cuales progresivamente generan la falta de cohesión de las partículas que componen el soporte y, consiguiente, se da la aparición de deterioros como la disgregación y la descamación.

Esta condición es importante dentro del Parque Arqueológico debido a que se ha evidenciado gracias a estudios previos (Giraldo, A., 2020 y Barón, J.,2026) que la toba presente en los diferentes altos presenta una baja cohesión derivada de su naturaleza y su génesis. Está condición del soporte genera que en zonas como el Alto de San Andrés, la disgregación esté mas relacionada con causas intrínsecas y no necesariamente deriva de causas extrínsecas relacionadas a condiciones inadecuadas.

En cambio, este deterioro del soporte pétreo en el Alto del Aguacate y de Segovia puede relacionarse más a causas extrínsecas como la impermeabilización de varios de los hipogeos de Segovia llevada a cabo en 2001, la construcción de los cobertizos en 2013 en algunos de los hipogeos del Aguacate y con ello la eliminación de la vegetación que cubría la roca en los accesos y seguramente propiciaba que ésta permaneciera más húmeda. Ambas situaciones se relacionan con la considerable pérdida de la humedad natural del soporte, y se han visto acentuadas seguramente por condiciones ambientales más extremas en tiempos de cambio climático.

Escala de medida:

Con el fin de generar una escala de medida para la disgregación de los hipogeos en el Parque Arqueológico Tierradentro, se aplicó la prueba Scotch Tape (Svanh, H.,2006).

Como se ilustra en la siguiente imagen se identificaron las superficies en las que se presentaba una menor disgregación y aquellas en las que esta era mucho más evidente; pues allí había un mayor desprendimiento de partículas de la superficie o un mayor tamaño en el grano desprendido.

 Peso:0.125g Imagen de referencia tomada de: Inferior - Lateral - Derecha. A41. Imagen: Luis Vergara	 Peso:0.372g Imagen de referencia tomada de: Boca - Lateral - Derecha. A41. Imagen: Luis Vergara	 Peso:0.733g Imagen de referencia tomada de: Ingreso - Zona Superior - Bóveda centro. A41. Imagen: Luis Vergara
Desprendimiento bajo de grano	Desprendimiento medio de grano	Desprendimiento alto de grano

Tabla 28. Escala para la medición de disgregación

A partir de los resultados se generó esta escala, donde se analizó la superficie de la cinta que se presentaba con rastros de partículas y el tamaño del grano que se desprendió y, asimismo, se consideró el peso de las partículas obtenidas a partir de la prueba, esto con el fin de tener un dato del desprendimiento de soporte más exacto. Buscando que los resultados fueran más fácilmente contrastables y comparables se implementó el mismo tipo y marca de cinta. Junto con lo anterior, se utilizaron fragmentos de esta de una misma longitud.

13.4 RESULTADOS GENERALES Y CONCLUSIONES

En los tres altos estudiados se evidenció presencia de disgregación, aunque con variaciones en intensidad, distribución y formas de manifestación según las condiciones particulares de cada hipogeo. En términos generales, la disgregación se evidenció como pérdida de cohesión superficial de la toba volcánica, expresada mediante desprendimiento granular, friabilidad de la superficie, pérdida volumétrica localizada y, en algunos casos, asociada a procesos de descamación.

A continuación, se presentan los resultados generales de cada Alto analizado:

Alto de San Andrés

El estudio de disgregación realizado en el Alto de San Andrés permitió identificar que este proceso de deterioro se encuentra presente en la totalidad del hipogeos analizados (ver anexo , aunque con diferentes niveles de intensidad, distribución y manifestación según las condiciones particulares de cada hipogeo.

Uno de los principales hallazgos corresponde a la distribución espacial del deterioro. Las mayores afectaciones se concentraron en zonas de transición entre el exterior y el interior de los hipogeos, especialmente en escaleras, bocas de acceso y umbrales, donde se combina tránsito, exposición ambiental y cambios microclimáticos. En contraste, las cámaras internas tendieron a presentar condiciones de mayor estabilidad, con manifestaciones puntuales de disgregación.

De igual manera, se identificó que la humedad no actúa como un factor aislado, sino que su incidencia depende del comportamiento que presente. Los hipogeos con condiciones de humedad relativamente constantes mostraron menores niveles de disgregación, mientras que los que se encuentran expuestos a fluctuaciones entre humedad y sequedad (contenidos de humedad bajos) presentaron una mayor pérdida de cohesión superficial. De hecho, las pruebas realizadas sugieren que el contenido de humedad de la roca y la humedad ambiental están directamente relacionadas. Donde los dataloggers mostraban humedades más estables también coincidía con mayores niveles de humedad superficial. Esto sugiere que la inestabilidad hídrica tanto en la roca como en el ambiente constituye uno de los principales factores asociados al deterioro del soporte pétreo en este sector.

Otro hallazgo relevante fue la aparente función protectora de ciertas capas superficiales, como depósitos arcillosos o antiguos enlucidos, las cuales se asociaron con una menor evidencia de disgregación en sectores donde se presentan. Por el contrario, en áreas donde estas capas habían desaparecido, la toba presentó mayor fragilidad y disgregación.

Finalmente, los resultados evidencian que la presencia de la disgregación en los hipogeos del Alto de San Andrés y Segovia responde a la interacción de múltiples factores: condiciones ambientales, características de la toba, estabilidad estructural de los hipogeos e intervenciones anteriores como recubrimientos en cemento.

Alto de Segovia

Si bien el estudio de la disgregación en el Alto de Segovia no estaba incluido en el alcance inicial del proyecto, durante las visitas hechas por los restauradores del ICANH en los meses de octubre y noviembre de 2025, previas a las intervenciones de mortero estructural y reforzamiento se encontró que los hipogeos S12, S11 y S10 están también siendo afectados por el fenómeno de la disgregación por lo que se determinó que era de gran aporte para el proyecto incluirlos y complementar el análisis de los demás altos. Sin embargo, dado que fue una decisión tomada durante el desarrollo del proyecto, se cuenta con menor información que la recolectada para este mismo análisis en los altos del Aguacate y San Andrés.

Se evidenció también que el hipogeo S21 presenta una condición especial adicional y es el ingreso de agua subterránea al interior de la cámara por lo que la roca muestra un alto contenido de humedad reduciendo la resistencia de la matriz.

A diferencia de otros sectores como San Andrés, el Alto de Segovia se encuentra en una etapa avanzada de pedogénesis (formación de suelo), correspondiente al Horizonte C. El material original (vidrio volcánico) ha sido reemplazado progresivamente por arcillas secundarias organizadas en "clay cutans" producto de la infiltración de fluidos (iluviación) desde el suelo superior.

El principal motor de la disgregación son los ciclos de humectación y secado. Las arcillas presentes (como la caolinita e illita-biotita) son higroscópicas y expandibles; al ganar o perder agua, generan tensiones internas de expansión y contracción que fracturan el material ligante y liberan los granos de la matriz.

Aunque los hipogeos mantienen una humedad relativa alta (promedio 99%), las intervenciones previas de drenaje e impermeabilización han generado en algunos casos (como el S12) un resecamiento excesivo del soporte. Se ha comprobado que las zonas más secas presentan una mayor pulverulencia y pérdida de cohesión superficial.

En estos hipogeos la prueba de cinta (Scotch tape): Confirmó que las zonas de mayor tránsito (umbrales) y las áreas más secas pierden material de forma crítica (registrando aumentos de peso en la cinta de hasta 1.655 g en el S21).

La prueba de absorción de humedad con la esponja: Reveló una alta capacidad de captación hídrica en sectores disgregados (hasta 8.728 ml en el S12), lo que indica una porosidad abierta y una aidez del material por la humedad que acelera los cambios volumétricos

Alto del Aguacate

Del estudio de la disgregación realizado de manera general en los hipogeos abiertos en el Alto del Aguacate se pudo identificar las siguientes características:

La presencia de irregularidades en las bóvedas y mayor presencia de disgregación se da de manera general en todos los hipogeos del Alto del Aguacate. Estas irregularidades en la superficie de la bóveda de los hipogeos permiten intuir que allí se han perdido volúmenes en todos los hipogeos. De manera general se identificó que las bóvedas son los puntos con mayor presencia de disgregación en los hipogeos y se da la concentración de descamaciones en aquellos que presentan mayor inestabilidad

en la toba. A partir de los estudios petrográficos realizados dentro del alto del Aguacate por Giraldo A (2020) y la relación con lo identificado en otros altos por Barón J (2026) se pudo concluir que la inestabilidad de estos puntos está relacionada con la naturaleza de la roca.

Los puntos más afectados por la disgregación y con mayor pérdida volumétrica son aquellos en los que la incidencia de las condiciones ambientales exteriores presenta mayor inferencia y causan mayores cambios en las condiciones de humedad y temperatura.

También se identificó que la Boca/escaleras de los hipogeos son puntos considerablemente deteriorados, esto se genera debido a su relación directa con las fluctuaciones de las condiciones ambientales debido a su exposición e incidencia directa de las condiciones del exterior, propiciando la disgregación y erosión generada por el viento del lugar. Se pudo identificar que las fluctuaciones en las condiciones ambientales están relacionadas directamente con la presencia de disgregación en los hipogeos pues los puntos donde se presentan condiciones ambientales menos estables presentan superficies más inestables y deterioradas

En cuanto a los umbrales de los hipogeos, se pudo identificar deterioros presentes en esta zona están relacionados con la inestabilidad de las condiciones ambientales al ser esta una zona de transición entre el ambiente exterior y el ambiente interior, evidenciando menos indicadores de deterioro en la zona de la boca/escaleras del hipogeo, pero evidenciando mayores deterioros que las superficies al interior de la cámara. Esto se concluyó al evidenciar un patrón repetitivo en los hipogeos donde se ve mayor inestabilidad de los umbrales en la zona superior de estos a medida que se aproxima a la bóveda. Por otro lado, se evidencian los volúmenes originales mejor conservados en las zonas inferiores del umbral, puntos con mayor presencia de humedad.

De los estudios en relación con la disgregación realizados en los hipogeos A36 y A41 se pudo identificar que la disgregación y la descamación de las superficies se presenta de manera más evidente y con mayor incidencia en puntos donde se presentan superficies con menor humedad y junto con esto, se pudo reconocer que las cubiertas de los hipogeos aunque propician el control del ingreso de la humedad al interior de las cámaras, evitando eficientemente la inundación de los hipogeos, propician la sequedad de la roca en estos pues por la pendiente del alto el agua superficial no moja el suelo y la roca del hipogeos y al no tener acceso a esa humedad que se obtenía desde la superficie se han alterado las condiciones naturales de humedad de la roca. Los cobertizos además tampoco regulan la incidencia de los vientos, la luz solar. Se identificó que el ingreso directo de luz solar, la incidencia de los vientos y la circulación de aguas lluvia desde el exterior hacia las superficies de los hipogeos; están directamente relacionadas con la presencia de disgregación y/o pérdida volumétrica progresiva de los hipogeos.

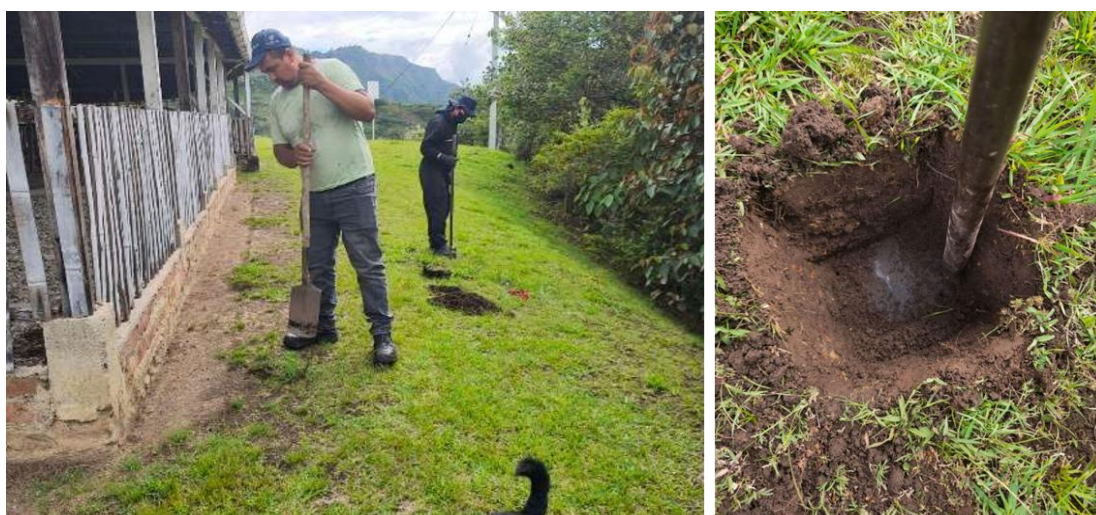
Tendencias observadas:

- Incidencia de la profundidad en la disgregación: Con menor profundidad se presenta una mayor incidencia de las condiciones ambientales del exterior y se tiende a presentar mayor presencia de superficies con disgregación en hipogeos de baja profundidad

- Mayor incidencia del deterioro en zonas de acceso, escaleras y umbrales (zonas de transición) relacionado a las condiciones ambientales.
- Variabilidad del comportamiento según condiciones microambientales particulares de cada hipogeo.
- Particularidades en el Alto del Aguacate: Bóveda con disgregación y descamaciones en relación con la naturaleza de la toba. Bocas y zonas de umbrales con mayor presencia de disgregación, allí el deterioro se relaciona mas con factores extrínsecos.
- Particularidades en el Alto de San Andrés: Filtraciones activas
- Particularidades en el Alto de Segovia: Presencia de membrana impermeabilizante en los hipogeos que presentan mas disgregación

13.5 REALIZACIÓN DE PILOTOS PARA ELIMINACIÓN DE GEOTEXTIL EN HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN

En el marco de las estrategias de conservación preventiva para mitigar la disgregación del soporte pétreo, partiendo del precepto que las barreras artificiales influyen en la estabilización de las condiciones microclimáticas internas, se implementaron acciones piloto orientadas a la eliminación de coberturas (geotextiles y geomembranas). Si bien la actividad inicial pretendía la eliminación total de estas coberturas, se decidió inicialmente realizar una modificación controlada a la geomembrana plástica ubicada en el costado occidental del terreno circundante del Hipogeo S12 (Alto de Segovia). Esta actividad, supervisada por el equipo de estabilización, consistió en la generación de orificios de desagüe estratégicos para permitir el paso limitado de humedad hacia la toba volcánica, con el fin de contrarrestar la sequedad excesiva que acelera el desprendimiento de material.



*Ilustración 96. Orificios realizados a la geomembrana de plástico buscando la humectación de la roca en el Hipogeo S12.
Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.*

Para el caso de los hipogeos del Aguacate, particularmente A36 y A41 se identificó que allí no se usaron capas impermeabilizantes. Buscando generar alguna medida para mitigar el efecto de la disgregación, se decidió actuar sobre el cobertizo, realizando perforaciones con navaja en la teja del cobertizo del hipogeo A36 en el mes de noviembre del año 2025. En la visita realizada en el mes de marzo de 2026

al Alto del Aguacate se pudo evidenciar el crecimiento incipiente de vegetación en la boca del hipogeo A36, lo que demuestra que fue efectiva la prueba realizada puesto que implica la humectación de la roca en el acceso y disminución de la resequedad; se recomienda continuar con el seguimiento mediante pruebas con cinta para validar la disminución del fenómeno de la disgregación en este hipogeo.

Para validar la efectividad de estos pilotos, se propone una metodología de seguimiento que incluye mediciones de absorción y el monitoreo de la pulverulencia mediante la técnica de cinta adhesiva (Scotch Test). Estas evaluaciones, complementadas con registros de humedad relativa y temperatura, como fue antes descrito, proporcionan la base técnica necesaria para decidir sobre la eliminación o mantenimiento de los geotextiles e intervención de cobertizos.

Dicha metodología deberá implementarse hasta tener datos sobre la efectividad de las intervenciones realizadas en cobertura y cobertizo.

Para el caso de las perforaciones hechas en la cobertura de las inmediaciones del hipogeo S12, éstas parecen haberse rellenado por lo que se recomienda realizarlas de un mayor diámetro y rellenar la perforación con material granular drenante.

14. MONITOREO AMBIENTAL

14.1 INTRODUCCIÓN

El Parque Arqueológico de Tierradentro, como ha sido ya mencionado se encuentra ubicado en el municipio de Inzá en el departamento del Cauca y se caracteriza por tener un clima templado de montaña con un régimen pluviométrico bimodal, con máximos de precipitaciones entre los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre, y periodos relativamente secos entre los meses de diciembre-febrero y junio y agosto asociados a la migración anual de la Zona de Convergencia Intertropical (Hurtado & Mesa: estudios hidroclimáticos de la cuenca alta-media del Río Cauca)

Es pertinente mencionar que, el cambio climático ha generado que las épocas identificadas estacionalmente ya no correspondan necesariamente a la temporalidad que se conocía y que haya una variación del clima mucho más evidente en la región. Lo anterior tiene una incidencia en el clima interno de los hipogeos, especialmente por el impacto que pueden tener infiltraciones y zonas donde la roca pierde humedad.

El monitoreo de las condiciones ambientales es un componente fundamental de la conservación preventiva, y permite identificar riesgos potenciales de deterioro asociados al comportamiento higrotérmico y evaluar la estabilidad micro ambiental de cada hipogeo.

El presente capítulo aborda el análisis de las condiciones ambientales registradas en 6 hipogeos: S21, S30, S10, S11, S12 y SA1. Con el fin de ampliar la cobertura del monitoreo, se instalaron dos equipos adicionales en los hipogeos S21, SA1, S10 y S11, sumándose a los equipos ubicados permanentemente en S12 y S30. Esta decisión responde al interés de monitorear las condiciones de humedad relativa y temperatura en los hipogeos que fueron intervenidos con fines de conservación.

El análisis de los registros comprende el periodo entre octubre 2025 y marzo 2026, con el propósito de establecer una referencia al comportamiento higrotérmico durante los siete meses en los que se desarrollaron la mayoría de las actividades del proyecto. Sin embargo, a modo de comprender a profundidad el comportamiento ambiental en el interior de los hipogeos, se hará una comparación con años anteriores 2024 y 2025 de los hipogeos S12 y S30, ya que se cuentan con registros de ese momento en estos dos hipogeos.

Esta información se complementa con los datos tomados en campo sobre contenido de humedad superficial, que, en conjunto, ayudan a comprender el comportamiento diferencial del interior de cada uno de los hipogeos en relación con las condiciones ambientales.

14.2 METODOLOGÍA

Para este análisis se contemplaron dos tipos de datos recolectados en campo:

- Condiciones ambientales de humedad relativa y temperatura registrados con un datalogger Testo 175H1
- Contenido de humedad superficial registrado con un protímetro.

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por el geólogo Jorge Barón como complemento para comprender la materialidad de los hipogeos y el efecto de las condiciones higrotérmicas sobre la conservación de la superficie de los hipogeos.

Equipos

Para la toma de datos de humedad relativa y temperatura, se utilizó el Datalogger Testo 175H1 (equipo con registrador de datos de 2 canales), programado para hacer un registro de datos en un intervalo de 3 horas y 2 horas.



Ilustración 97. Equipo datalogger Testo 175-H1 y protímetro

Para la toma de datos de contenido de humedad superficial, se utilizó el protímetro digital mini (equipo medidor de humedad portátil tipo aguja con indicador LED de color y pantalla). Las mediciones se hicieron mediante el contacto directo con la superficie pétreo. El equipo clasifica los valores dentro de tres rangos que son indicados por la luz led:

- Seco (verde): 7-16.9
- En riesgo (amarillo): 17-19.9
- Húmedo (rojo): 20-99.9.

Ubicación de equipos

Los dataloggers se ubican colgados dentro de una jaula metálica en los nichos cercanos al acceso, para evitar el contacto directo del equipo con el suelo o paredes. La decisión de posicionar el equipo en este lugar es para poder captar las condiciones en el interior del hipogeo. A continuación, se presentan los gráficos de levantamiento de los hipogeos con la ubicación de los equipos dataloggers dentro de cada uno de ellos.

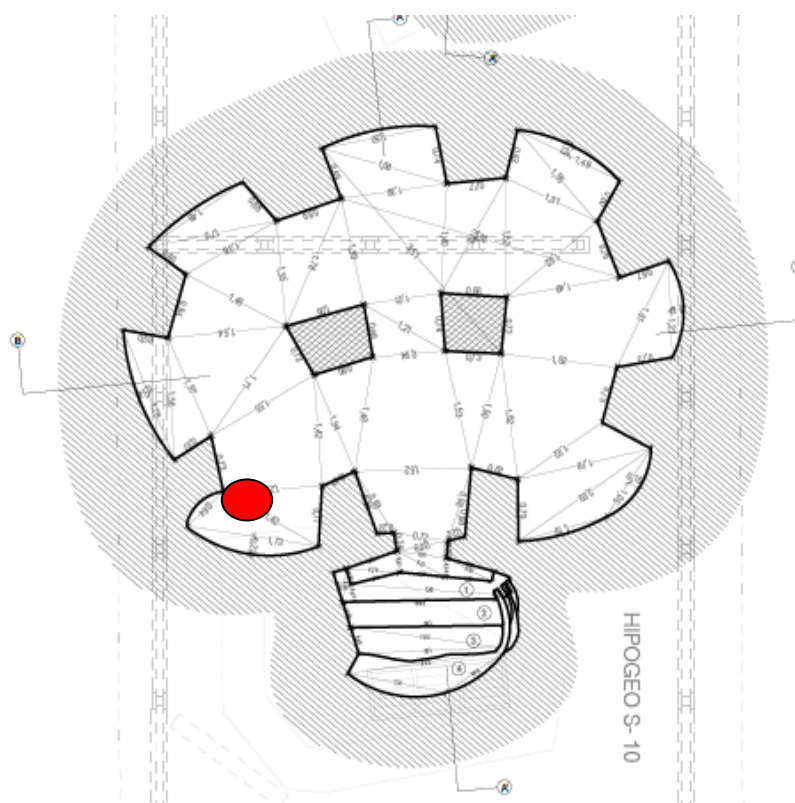


Ilustración 98. Ubicación datalogger en hipogeo S10

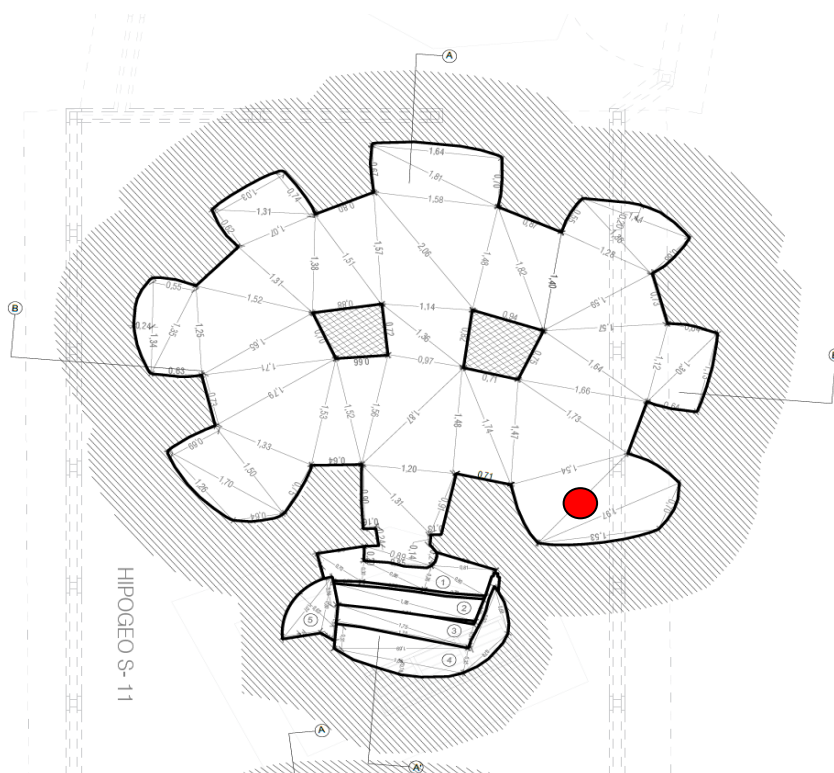


Ilustración 99. Ubicación datalogger hipogeo S11

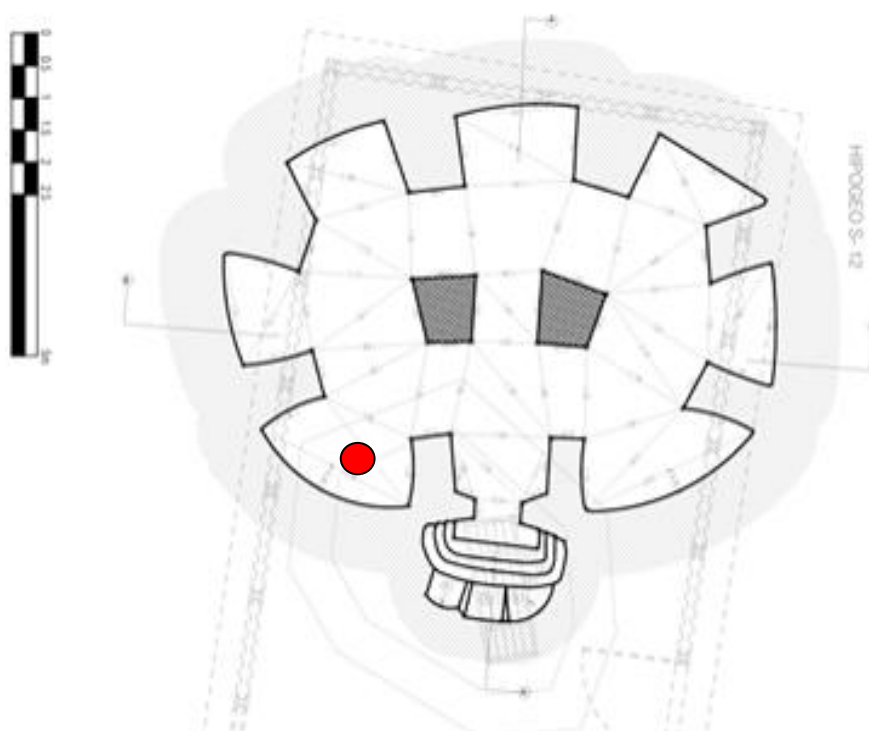


Ilustración 100. Ubicación datalogger en hipogeo S12

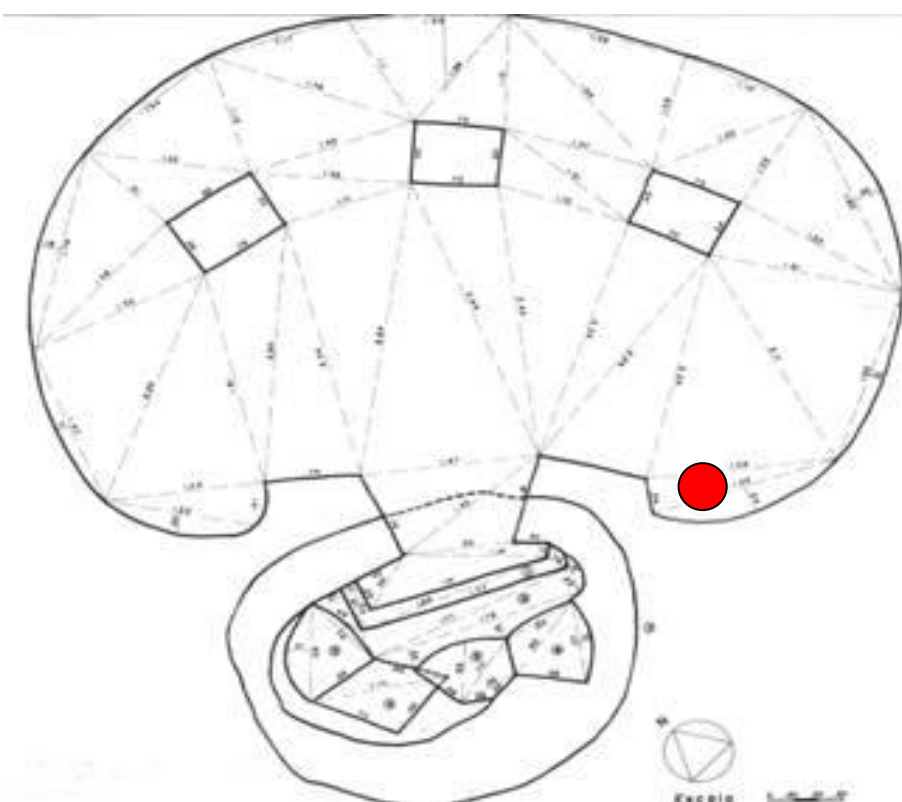


Ilustración 101. Ubicación de datalogger en hipogeo S21

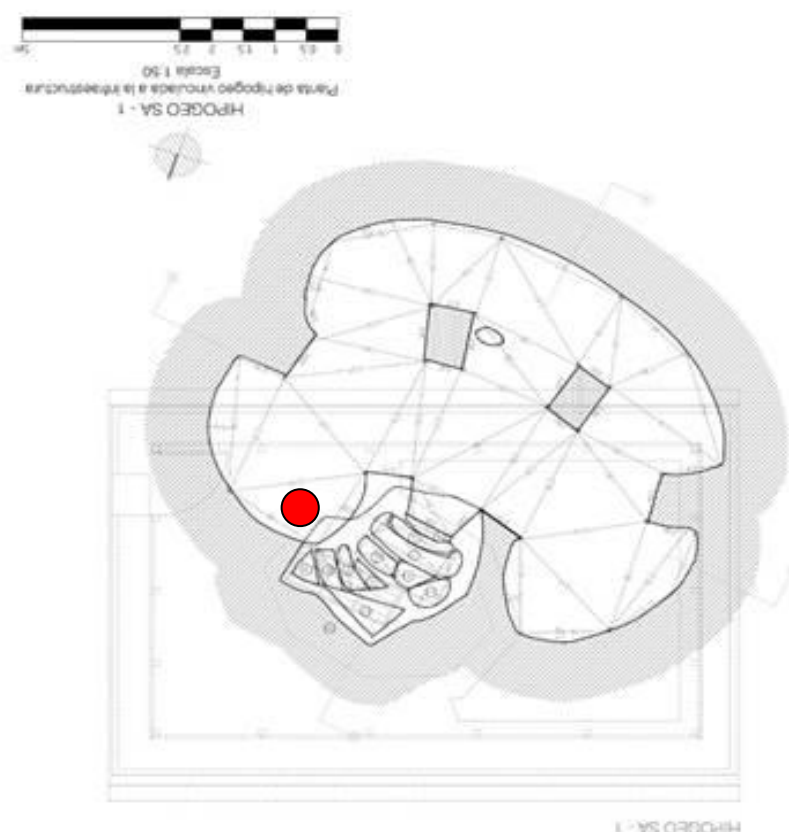


Ilustración 102. Ubicación de datalogger en hipogeo SA1

Procesamiento de datos

El procesamiento de la información se hizo a partir de los registros suministrados por los dataloggers, incluyendo los valores máximos, mínimos y promedios de humedad relativa y temperatura, así como diagramas de series temporales para cada periodo monitoreado.

Se identificó que algunos registros presentaban valores mínimos inadecuados para el comportamiento real del microclima interno de los hipogeos. Por esta razón se realizó una revisión crítica de cada serie de datos para depurar registros atípicos y se concluyó que estos valores corresponden al periodo de traslado desde el parque hasta el momento de descarga de los datos, lo que afecta las variables como promedios, amplitud térmica y oscilación de la humedad relativa.

Para el análisis de los datos, se tuvieron en cuenta los siguientes insumos y datos: en primer lugar, el documento en PDF que genera el equipo datalogger donde se reúne el diagrama y la tabla de cada una de las variables. En este sentido, se realizó un análisis a partir de los registros donde puede rastrearse el comportamiento tanto de la temperatura como de la humedad relativa en cada intervalo de tres horas y dos horas. Se analizaron varios intervalos de tiempo para ver el comportamiento general de las condiciones dentro de los hipogeos, como lo son: 24 horas, 36 horas y 48 horas. Estos intervalos permiten evaluar ciclos diarios y una posible estabilidad térmica.

Se consideró de igual forma, el clima estacional (temporadas húmedas y secas) ya que esto influye indirectamente en el comportamiento de la humedad relativa, especialmente en estructuras con filtraciones activas, como lo es el S21.

Finalmente, se hizo una relación entre los datos del contenido de humedad superficial, los resultados de los análisis petrográficos y de técnica, y las condiciones ambientales, con el fin de obtener un panorama general del comportamiento al interior de cada uno de los hipogeos.

Hipogeos monitoreados

Alto de Segovia	S-10, S-11, S12, S21 y S30.
Alto de San Andres	SA1.

En tanto los hipogeos S10, S11, S12, S21 y SA1 se han descrito con anterioridad no se abordan acá, a continuación se hace una breve mención sobre el hipogeo S30.

- **Hipogeo S30**

Este hipogeo cuenta con sistema de protección conformado por un cobertizo a dos aguas con canales y dos bajantes, piso de gravilla, cerca con puerta. El cobertizo protege también al hipogeo S21 y cubre por completo el hipogeo S30. Al igual que los demás hipogeos del Alto de Segovia, la entrada del hipogeo está cubierta por un marco de concreto que tiene una puerta de madera con marco y malla metálica y candado que permite acceder al pozo. Dicha malla permite la ventilación de los hipogeos de manera permanente.

14.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primer lugar, se muestran los registros de cada uno de los hipogeos donde se describen los intervalos que se tuvieron en cuenta para analizar fluctuaciones de humedad relativa y temperatura. En este sentido, se presenta el análisis de 12 horas, 24 horas y 48 horas con el fin de obtener un panorama general del comportamiento de las variables en una medida de tiempo determinada.

En segundo lugar, se presenta un análisis comparativo de los hipogeos S12 y S30, con los registros que se tienen entre 2024 y 2026. Este análisis ayuda a comprender de mejor manera el comportamiento de las variables de humedad relativa y temperatura, tanto como sus máximos, mínimos y promedios en los diferentes años. En este sentido, se toman en cuenta los registros de los diferentes años para identificar si hay fluctuaciones considerables, si existe una estabilidad en el microclima al interior de los hipogeos y también se observa en qué época del año fueron tomados los registros con el fin de identificar la influencia del clima estacional en el microclima del interior de los hipogeos.

En tercer lugar, se hace un análisis comparando las mismas variables de cada uno de los hipogeos incluidos en el estudio. Esto, dará un panorama general del comportamiento del microclima de los hipogeos.

En último lugar se correlacionan todas las variables, para obtener una visión general del comportamiento de las condiciones ambientales al interior de los hipogeos y sus efectos en la conservación.

Comportamiento higrotérmico hipogeo por hipogeo

- **HIPOGEO S21**

El hipogeo S21 tiene una particularidad y es que presenta una dinámica micro ambiental condicionada por una filtración activa de humedad en la cámara. Este proceso ha favorecido la presencia de raíces, desprendimientos en la zona de la cámara y acumulación de humedad particularmente en la cista y superficies cercanas al área donde se encuentra la filtración. Durante periodos con un alto nivel de precipitaciones, se filtra el agua directamente dentro del hipogeo lo cual hace necesario que los trabajadores del parque saquen manualmente el agua.

A continuación, se presentan los registros del 2025 y 2026 del hipogeo S21:

Lapso de 24 horas/S21-agosto 2025: Los registros muestran valores de humedad relativa persistentemente elevados, con oscilaciones menores al 2% en horas de la mañana y en el transcurso del día se mantiene constante. Por otro lado, la temperatura presenta una amplitud térmica reducida de 0.2°C, lo que indica un ambiente térmicamente estable.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
30/8/2025 07:00:00	98.10	20.00
30/8/2025 10:00:00	99.40	20.10
30/8/2025 13:00:00	99.90	20.20
30/8/2025 16:00:00	99.90	20.20
30/8/2025 19:00:00	99.90	20.20
30/8/2025 22:00:00	99.60	20.20
31/8/2025 01:00:00	99.20	20.20
31/8/2025 04:00:00	99.10	20.20
31/8/2025 07:00:00	98.80	20.10

Tabla 29. Registro humedad relativa y temperatura/S21 en un lapso de 24 horas/agosto 2026

Lapso de 16 horas/S21-enero 2026: En este periodo la humedad relativa permanece constante en 99.9%, lo que evidencia una condición de saturación hídrica sostenida asociada a la filtración activa presente en el interior del hipogeo. La temperatura también indica una estabilidad térmica en el interior.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
1/1/2026 07:15:54	99.90	21.00
1/1/2026 09:15:54	99.90	21.00
1/1/2026 11:15:54	99.90	21.10
1/1/2026 13:15:54	99.90	21.10
1/1/2026 15:15:54	99.90	21.10
1/1/2026 17:15:54	99.90	21.10
1/1/2026 19:15:54	99.90	21.00
1/1/2026 21:15:54	99.90	21.00
1/1/2026 23:15:54	99.90	21.00

Tabla 30. Registro humedad relativa y temperatura/ S21 en un lapso de 16 horas/enero 2026

- **HIPOGEO S10**

Lapso de 24 horas/S10-marzo 2026: Los registros del hipogeo S10 evidencian una humedad relativa constante de 99.9%, lo que sugiere condiciones cercanas al punto de saturación durante el periodo monitoreado donde se adelantaron labores de conservación al interior del hipogeo. La temperatura presenta variaciones leves, con una amplitud máxima de 0.5.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
17/3/2026 10:00:05	99.90	17.00
17/3/2026 12:00:05	99.90	17.20
17/3/2026 14:00:05	99.90	17.30
17/3/2026 16:00:05	99.90	17.50
17/3/2026 18:00:05	99.90	17.50
17/3/2026 20:00:05	99.90	17.30
17/3/2026 22:00:05	99.90	17.20
18/3/2026 00:00:05	99.90	17.20

18/3/2026 02:00:05	99.90	17.10
18/3/2026 04:00:05	99.90	17.10
18/3/2026 06:00:05	99.90	17.10
18/3/2026 08:00:05	99.90	17.10
18/3/2026 10:00:05	99.90	17.00

Tabla 31. Registro humedad relativa y temperatura/ S10 en un lapso de 24 horas/Marzo 2026

- **HIPOGEO S11**

Lapso de 48 horas/S11-Marzo 2026: En el hipogeo S11 se observa un comportamiento altamente estable, con una humedad relativa constante del 99.9% y una amplitud térmica de 0.1. Este comportamiento indica un microclima interior estable y con baja interacción con las condiciones externas. Es importante recordar que en este lapso se estuvieron adelantando labores de conservación al interior del hipogeo, por lo que el número de personas y los procesos realizados pueden ser la causa de la alta humedad relativa.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
17/3/2026 11:00:00	99.9%	20.8°C
17/3/2026 13:00:00	99.9%	20.8°C
17/3/2026 15:00:00	99.9%	20.8°C
17/3/2026 17:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 19:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 21:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 23:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 01:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 03:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 05:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 07:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 09:00:00	99.9%	20.9°C
17/3/2026 11:00:00	99.9%	20.9°C

Tabla 32. Registro humedad relativa y temperatura/ S11 en un lapso de 24 horas/Marzo 2026

- **HIPOGEO SA1**

Febrero 2026-Hipogeo SA1: Los registros a continuación evidencian una humedad relativa alta, con variaciones a lo largo del transcurso del día, no superando una variación del 3,4%. Por otro lado, la temperatura denota una estabilidad térmica con variaciones máximas de 0.3°C. Los registros fueron tomados cuando se estaban adelantando labores de intervención al interior del hipogeo.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
13/2/2026 13:00:05	99.20	18.90
13/2/2026 15:00:05	99.70	18.90
13/2/2026 17:00:05	99.90	19.00
13/2/2026 19:00:05	97.60	18.90
13/2/2026 21:00:05	97.40	18.90
13/2/2026 23:00:05	97.60	18.80
14/2/2026 01:00:05	97.80	18.80
14/2/2026 03:00:05	97.60	18.80
14/2/2026 05:00:05	96.80	18.70
14/2/2026 07:00:05	97.60	18.70
14/2/2026 09:00:05	97.20	18.80
14/2/2026 11:00:05	98.50	18.90
14/2/2026 13:00:05	96.50	18.90

Tabla 33. Registro humedad relativa y temperatura/ SA1 en un lapso de 24 horas/Febrero 2026

Lapso de 24 horas/SA1-Marzo 2026: Se puede observar que la humedad relativa se mantiene por encima del 99.9%, sin variaciones extremas, lo cual puede indicar un punto de saturación al registrar los valores cercanos al 100%. Esto corresponde a los resultados esperados con el desarrollo de las intervenciones al interior del hipogeo que se estaban llevando a cabo en el mes de marzo. La temperatura por otra parte tiene una variación de 0.9 y se observan variaciones de 0.3 en los intervalos de 2 horas, lo cual no indica una fluctuación significativa.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
--------------	----------------------	------------------

14/3/2026 01:00:05	99.90	18.40
14/3/2026 03:00:05	99.90	18.40
14/3/2026 05:00:05	99.90	18.30
14/3/2026 07:00:05	99.90	18.30
14/3/2026 09:00:05	99.90	18.30
14/3/2026 11:00:05	99.90	18.70
14/3/2026 13:00:05	99.90	19.00
14/3/2026 15:00:05	99.90	19.00
14/3/2026 17:00:05	99.90	18.70
14/3/2026 19:00:05	99.90	18.50
14/3/2026 21:00:05	99.90	18.40
14/3/2026 23:00:05	99.80	18.30
15/3/2026 01:00:05	99.40	18.10

Tabla 34. Registro humedad relativa y temperatura/ SA1 en un lapso de 24 horas/Marzo 2026

● HIPOGEO S12

Comparativo temporal s12 2024-2026

A continuación, se presentan los registros del hipogeo S12 desde el 2024 hasta el 2026, iniciando con una tabla comparativa donde se observan las variables mínimas, máximas y promedios de humedad relativa y temperatura máxima.

Año y periodo	T°C Máx.	T°C Min.	T°C Promedio	HR Máx.	HR Mín.	HR. Promedio
Diciembre 2024- Oct.2025	21.0°C	20.5°C	20.7°C	99.9%	95.7%	97.8%
Oct 2025 -Febrero 2026	20.7°C	20.1°C	20.4°C	99.9%	98,6%	99.2%
Febrero-marzo 2026	21.9°C	20.5°C	21.2°C	99.9%	98.6%	99.2%

Tabla 35. Comparación por años variables de humedad relativa y temperatura S12

Al observar la tabla comparativa, se puede identificar que en el hipogeo S12, hay un comportamiento similar en los registros, lo cual indica que hay cierta estabilidad en el microclima del hipogeo. La

humedad relativa alcanza a registrar un 99.9% como máximo y tiene variaciones hasta del 3% en los valores mínimos. Por otro lado, la temperatura alcanza su promedio máximo durante las labores de intervención en el hipogeo.

En el lapso entre febrero y marzo del 2026, cuando se adelantaron las labores de intervención en el hipogeo S12, se puede evidenciar que en ambas ocasiones los valores de humedad relativa no pudieron ser registrados en algunos momentos por lo que puede ser que haya una saturación de humedad relativa en el ambiente. Teniendo en cuenta los procesos que se hicieron y la cantidad de personas al mismo tiempo en el interior del hipogeo. Asimismo, se observa el aumento de los valores registrados de temperatura y variaciones de hasta 0.4°C. Estas condiciones se encuentran acordes a lo esperado al hacer una intervención en conservación en estructuras subterráneas.

Lapso 48 horas/S12 Diciembre 2024: En el intervalo de tiempo de 48 horas en el hipogeo S12 en el mes de diciembre del 2024, se identifica que la temperatura no tiene fluctuaciones significativas, ya que en el periodo comprendido tiene una variación de 0.2°C. Por otro lado, la humedad relativa presenta variaciones hasta un 2% entre los intervalos de medición (3 horas). Se puede observar cierta estabilidad térmica en el microclima del hipogeo, donde la humedad relativa asciende hacia las horas de la noche y madrugada y desciende en el comienzo y transcurso del día.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
13/12/2024 01:00:00	96.70	20.80
13/12/2024 04:00:00	97.20	20.80
13/12/2024 07:00:00	96.90	20.80
13/12/2024 10:00:00	98.00	20.80
13/12/2024 13:00:00	98.60	20.80
13/12/2024 16:00:00	98.80	20.80
13/12/2024 19:00:00	99.00	20.90
13/12/2024 22:00:00	97.80	20.90
14/12/2024 01:00:00	97.80	20.90
14/12/2024 04:00:00	97.30	20.90
14/12/2024 07:00:00	97.10	20.90
14/12/2024 10:00:00	98.20	20.90
14/12/2024 13:00:00	97.80	20.90
14/12/2024 16:00:00	99.10	21.00

14/12/2024 19:00:00	96.50	20.90
14/12/2024 22:00:00	96.80	20.90
15/12/2024 01:00:00	96.60	20.90

Tabla 36. Registro humedad relativa y temperatura/ S12 en un lapso de 48 horas/Diciembre 2024

Lapso 48 horas/S12 Abril 2025: En este lapso de tiempo, se puede identificar un comportamiento similar al descrito anteriormente, donde la temperatura tiene una variación de 0.1 y la humedad relativa una variación del 2,7%, por lo que se puede decir que hay cierta estabilidad en el microclima del hipogeo y se mantiene tanto en 2024 como en 2025.

Fecha y hora	Humedad Relativa(%)	Temperatura (°C)
5/4/2025 01:00:00	98.00	20.80
5/4/2025 04:00:00	97.90	20.80
5/4/2025 07:00:00	97.80	20.80
5/4/2025 10:00:00	98.40	20.80
5/4/2025 13:00:00	99.70	20.80
5/4/2025 16:00:00	99.90	20.90
5/4/2025 19:00:00	99.90	20.90
5/4/2025 22:00:00	99.30	20.90
6/4/2025 01:00:00	99.40	20.90
6/4/2025 04:00:00	97.50	20.80
6/4/2025 07:00:00	97.80	20.80
6/4/2025 10:00:00	99.10	20.80
6/4/2025 13:00:00	99.80	20.90
6/4/2025 16:00:00	99.90	20.90
6/4/2025 19:00:00	98.80	20.90
6/4/2025 22:00:00	98.60	20.90
7/4/2025 01:00:00	98.10	20.80

Tabla 37. Registro humedad relativa y temperatura/ S12 en un lapso de 48 horas/Abril 2025

Lapso 24 horas/S12 Septiembre 2025: En el intervalo de tiempo de 24 horas en el hipogeo S12 en el mes de septiembre del 2025, se identifica que la temperatura no tiene fluctuaciones significativas, ya que en el periodo comprendido tiene una variación de 0.2°C. Por otro lado, la humedad relativa presenta variaciones leves entre los intervalos de medición (3 horas).

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
24/9/2025 01:00:00	98.50	19.90
24/9/2025 04:00:00	98.10	19.90
24/9/2025 07:00:00	98.00	19.90
24/9/2025 10:00:00	98.90	19.90
24/9/2025 13:00:00	99.90	20.00
24/9/2025 16:00:00	99.90	20.00
24/9/2025 19:00:00	99.90	20.10
24/9/2025 22:00:00	98.70	20.00
25/9/2025 01:00:00	98.30	20.00

Tabla 38. Registro humedad relativa y temperatura/ S12 en un lapso de 24 horas/Septiembre 2025

Lapso de 36 horas/S12-Febrero 2026: La ausencia de registros de humedad relativa durante el periodo de febrero-marzo del 2026 corresponde al momento en que se estaban adelantando las labores de intervención al interior del hipogeo. Por esto, tiene sentido que la humedad relativa estuviera cercana al punto de saturación en el ambiente. Por otra parte, el comportamiento de la temperatura muestra una dinámica estable, con variaciones máximas de 0.4°C en intervalos de tres horas.

Fecha y Hora	Humedad Relativa	Temperatura °C
13/2/2026 13:00:00	----	20.60
13/2/2026 16:00:00	----	20.60
13/2/2026 19:00:00	----	20.70
13/2/2026 22:00:00	----	20.70
14/2/2026 01:00:00	----	20.70
14/2/2026 04:00:00	----	20.70
14/2/2026 07:00:00	----	20.70
14/2/2026 10:00:00	----	21.00

14/2/2026 13:00:00	----	21.20
14/2/2026 16:00:00	----	21.00
14/2/2026 19:00:00	----	20.80
14/2/2026 22:00:00	----	20.80
15/2/2026 01:00:00	----	20.70

Tabla 39. Registro humedad relativa y temperatura/ S12 en un lapso de 36 horas/Febrero 2026

Lapso de 36 horas/S12-Marzo 2026: Como bien se mencionó, en algunos intervalos de los registros, se observa la falta de datos en las mediciones de humedad relativa. Este comportamiento puede asociarse a puntos de saturación del sensor o procesos de condensación en ambientes con humedad relativa cercana al 100%, como lo son los ambientes internos de los hipogeos. Los valores se encuentran cercanos a registros del 99.9%, por lo que se refuerza la hipótesis de que hay una saturación de humedad en el ambiente. Este factor de saturación puede ser desencadenante de la presencia de biocolonización o condensación sobre la superficie de los hipogeos.

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
16/3/2026 01:00:00	----	21.30
16/3/2026 04:00:00	----	21.20
16/3/2026 07:00:00	----	21.10
16/3/2026 10:00:00	----	21.50
16/3/2026 13:00:00	----	21.70
16/3/2026 16:00:00	----	21.70
16/3/2026 19:00:00	----	21.50
16/3/2026 22:00:00	----	21.40
17/3/2026 01:00:00	----	21.40
17/3/2026 04:00:00	----	21.30
17/3/2026 07:00:00	----	21.30
17/3/2026 10:00:00	----	21.30
17/3/2026 13:00:00	----	21.70

Tabla 40. Registro humedad relativa y temperatura/ S12 en un lapso de 36 horas/ Marzo 2026

● HIPOGEO S30

Tabla comparativa por periodos 2025-2025 y 2025-2026:

A continuación, se presenta una tabla comparativa de dos periodos de medición en el hipogeo S30 de temperatura, humedad relativa y sus variables. Se puede observar que en el primer periodo octubre 2024-octubre 2025, la variación entre la temperatura máxima y mínima es de 1.8°C y de humedad relativa del 1.3%. En el segundo periodo octubre 2025-febrero 2026 la variación entre la temperatura máxima y mínima es de 0.8°C y de humedad relativa de 3.1%. Los datos demuestran que hay una estabilidad en el microclima al interior del hipogeo.

Año y periodo	T°C Máx.	T°C Min.	T°C Promedio	HR Máx.	HR Mín.	HR. Promedio
Octubre 2024- Oct.2025	20.6°C	18.8°C	19.7°C	99.9%	98.6%	99.2%
Oct 2025 -Febrero 2026	20.4°C	19.6°C	20°C	99.9%	96.8%	98.3%

Tabla 41. Comparación por años variables de humedad relativa y temperatura S30

Lapso 24 horas/S30 Diciembre 2024: En el análisis de 48 horas se pudo identificar que la temperatura no tiene variaciones significativas y se mantiene estable, solo con una variación de 0.1°C. Por otro lado, la humedad relativa indica también una estabilidad al mantenerse sobre el 99%.

Fecha y hora	Humedad Relativa(%)	Temperatura(°C)
12/12/2024 10:00:00	99.00	20.50
12/12/2024 13:00:00	99.90	20.50
12/12/2024 16:00:00	99.90	20.50
12/12/2024 19:00:00	99.90	20.50
12/12/2024 22:00:00	99.90	20.50
13/12/2024 01:00:00	99.70	20.50
13/12/2024 04:00:00	99.10	20.50
13/12/2024 07:00:00	99.10	20.50
13/12/2024 10:00:00	99.20	20.50

Tabla 42. Registros humedad relativa y temperatura/ S30 en un lapso de 24 horas/Diciembre 2024

Lapso 24 horas/S30 Febrero 2025: En el lapso de 24 horas, se puede identificar que la temperatura mantiene estabilidad, con variaciones a lo largo del día no mayores a 0.3

Fecha y hora	Humedad Relativa(%)	Temperatura(°C)
1/2/2025 07:00:00	97.00	20.20
1/2/2025 10:00:00	99.10	20.40
1/2/2025 13:00:00	97.70	20.40
1/2/2025 16:00:00	97.00	20.40
1/2/2025 19:00:00	96.50	20.50
1/2/2025 22:00:00	95.60	20.30
2/2/2025 01:00:00	96.80	20.30
2/2/2025 04:00:00	96.70	20.30
2/2/2025 07:00:00	96.80	20.20

Tabla 43. Registro humedad relativa y temperatura/S30 en un lapso de 24 horas/Febrero 2025

Lapso 24 horas/S30 Mayo 2025: En un lapso de 24 horas se pudo observar que la humedad relativa no presenta variaciones, manteniéndose en el mismo valor 99.9%. Por otra parte, la temperatura tuvo variaciones leves de 0.1 °C. En este hipogeo no hubo procesos de variación, sin embargo, el comportamiento de la humedad relativa es similar

Fecha y hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura(°C)
1/5/2025 01:00:00	99.70	20.30
1/5/2025 04:00:00	99.60	20.20
1/5/2025 07:00:00	99.30	20.20
1/5/2025 10:00:00	99.90	20.20
1/5/2025 13:00:00	99.90	20.30
1/5/2025 16:00:00	99.90	20.40
1/5/2025 19:00:00	99.90	20.40
1/5/2025 22:00:00	99.90	20.30
2/5/2025 01:00:00	99.90	20.30

Tabla 44. Registro humedad relativa y temperatura/S30 en un lapso de 24 horas/Mayo 2025

Al comparar los resultados de cada uno de los hipogeos monitoreados, se observa que el comportamiento micro climático al interior de estos no es homogéneo. Por un lado, los hipogeos como el S12 y S30 presentan mayor estabilidad en los registros a lo largo del tiempo, lo cual puede estar relacionado a la topografía donde se encuentran ubicados estos hipogeos, además de su profundidad que no permite tanta interacción con las condiciones ambientales externas.

Análisis comparativo de todos los hipogeos

A continuación, se presenta una tabla de análisis comparando cada uno de los hipogeos, la temperatura y humedad relativa máxima, mínima, promedios registrados en los meses de febrero-marzo 2026:

Hipogeo	T°C Máxima	T°C Mínima	T°C Promedio	HR Máxima	HR Mínima	HR Promedio
S10	17.5°C	16.7°C	17.1°C	99.9%	99.9%	99.9%
S11	20.9°C	20.5°C	20.7°C	99.9%	99.9%	99.9%
S12	21.9°C	20.9°C	20.4°C	99.9%	98.6%	99.3%
S21	21.9°C	20.9°C	21.1°C	99.9%	99.9%	99.07%
S30	20.4°C	19.6°C	20.1°C	99.9%	99.9%	99.5%
SA1	19.6°C	17.8°C	18.7°C	99.9%	96.5%	98.2%

Tabla 45. Comparación de variables higrotérmicas en hipogeos (febrero-marzo 2026)

La tabla nos indica que se presenta un microclima caracterizado por tener una alta estabilidad térmica y con condiciones de humedad relativa superiores al 90%, en algunos casos cercanos al punto de saturación. Este comportamiento es consistente con las condiciones ambientales esperadas en estructuras subterráneas, como lo son los hipogeos. No obstante, el comportamiento microclimático no es homogéneo entre los hipogeos. Se observan ligeras variaciones en la humedad relativa mínima en los hipogeos S12 y SA1, lo que sugiere que pueden tener dinámicas internas diferenciadas o que hay una mayor interacción con las condiciones ambientales externas.

Los hipogeos S12 y S30 presentan una mayor estabilidad higrotérmica a lo largo del tiempo, ya que presentan amplitudes térmicas reducidas y oscilaciones leves de humedad relativa. Este comportamiento puede estar relacionado a factores como profundidad del hipogeo, menor interacción con las condiciones exteriores y las condiciones topográficas específicas de cada Alto. Por otro lado, estructuras como hipogeos S21 y SA1 presentan una dinámica hidrotérmica más variables. En el caso del S21, por la presencia de la filtración activa la humedad relativa actúa en base a esto. En el SA1, como se ha mencionado, las variaciones registradas pueden estar asociadas a una mayor

interacción con las condiciones climáticas externas y las características topográficas del Alto de San Andrés.

En términos generales, la temperatura registrada en cada uno de los hipogeos indica que se mantiene en un rango entre los 17°C y 21°C. La variación de 4°C puede estar condicionada por el entorno, las condiciones del terreno, la profundidad del hipogeo y su interacción con las condiciones ambientales externas.

Teniendo en cuenta los resultados, se puede identificar que la amplitud térmica en los registros resulta ser adecuada teniendo en cuenta las condiciones del entorno. Es decir, que al ser una estructura subterránea tiene sentido que no haya una alta amplitud térmica. Se puede llegar a comprender que se genere un equilibrio térmico en el interior del hipogeo, con la mínima interacción con las condiciones externas.

La oscilación de humedad relativa se considera normal, sin llegar a presentar extremos. Los valores mínimos registrados se encuentran superiores al 90% y los valores máximos alcanzan el 99.9%, por lo que las fluctuaciones no llegan a ser una problemática a identificar. Sin embargo, los altos niveles de humedad relativa sostenidos en el tiempo son un medio ideal para el crecimiento de biocolonización, presencia de insectos, raíces y depósitos superficiales.

Relación con humedad superficial y materialidad

A continuación, se presenta la tabla de los valores registrados donde se encuentra en número del hipogeo, la ubicación de la toma de datos y el resultado, con el rango de color establecido por el equipo. Los datos se tomaron en hipogeos de diferentes altos, con el fin de obtener un panorama general del comportamiento del contenido de humedad superficial. En cada uno de los hipogeos se tomaron datos en tres puntos, jugando con la altura y ubicación de la zona, para obtener datos diferenciales dentro de cada hipogeo.

Hipogeo	Ubicación	Resultado
S11	Pilastra 1	41.4
	Nicho 2 parte baja	28.1
	Nicho 1	64.5
S12	Nicho 2 medio	42.7
	Pilastra parte media	22.1
	Nicho 4	38.6

S5	Nicho 1 parte media	44.4
	Nicho 1 abajo	99.9
	Pilastra	68.3
SA1	Nicho 1	30.7
	Nicho 6	99.9
	Nicho 3	22.3
A57	Cámara parte media	42.7
	Parte baja	53.6
	Bóveda	15
A41	Cámara parte media	19.8
	Cámara parte baja	16.4
	Pozo	23.3
D1	Nicho 2 media	59.8
	Nicho 3 media	65.6
	Ingreso	24.8

Tabla 46. Datos de contenido de humedad superficial

Análisis de datos

A partir de los resultados obtenidos, se pudo identificar que cada uno de los hipogeos tiene un comportamiento de contenido de humedad superficial diferencial. Se pudo comprobar que cada hipogeo presenta valores fluctuantes, desde el rango de seco, en riesgo y húmedo (rango establecido en equipo Protímetro BLD5702).

Este comportamiento se ajusta a la realidad del hipogeo y su entorno, donde en la mayoría de los casos al alcanzar el punto de saturación de humedad en superficie (99.9) corresponde a zonas que se ubican próximas a una filtración activa de humedad, cercanía a zonas de fisuras, donde hay presencia de musgo, raíces o capa superficial de barro.

La toma de datos generales en hipogeos de diferentes Altos es una manera de comprender de manera específica las condiciones medioambientales de cada alto, además de entender la interacción entre la materialidad de los hipogeos y su comportamiento frente a los factores ambientales y biológicos. La toba volcánica, es una roca blanda con alta porosidad lo cual la hace propensa a tener una mayor absorción higroscópica y retener la humedad, que, junto con la falta de ventilación permanente puede

generar las condiciones ideales para el aumento del contenido de humedad relativa del ambiente y mantener valores elevados de humedad en superficie.

En el Alto del Aguacate, se identificó una tendencia inclinada hacia los valores ubicados en el rango de seco. Se registraron valores dentro del rango de húmedo, en las zonas bajas del hipogeo donde hay un mayor crecimiento de musgo y barro en superficie. Sin embargo, vale la pena recalcar en que los valores registrados en el Alto si son considerablemente diferentes en comparación con datos de hipogeos del Alto de San Andrés y Alto de Segovia donde se presentaron valores mucho mayores de humedad en superficie. Esto puede comprobar la hipótesis que, los hipogeos al estar secos en la superficie pétrea pueden llegar a presentar problemas como disgregación activa.

Estos resultados pueden relacionarse con las condiciones ambientales registradas dentro de los hipogeos, ya que los ambientes con humedad relativa con cercanía al punto de saturación favorecen la absorción de humedad por parte de la roca. Teniendo en cuenta los análisis científicos de petrografía hechos por el geólogo del proyecto Jorge Barón, se pudo comprobar que la toba al ser una roca blanda, en su estructura está débilmente solidificadas (Barón, 2026, FIAN) por lo tanto tiene una mayor capacidad de absorber y retener humedad en superficie. Además, también menciona lo siguiente en sus conclusiones: “-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.”(Barón, 2026, FIAN) lo cual tiene implicaciones en la conservación de lo hipogeos, ya que al generar procesos de contracción y secado puede haber desprendimientos en la superficie pétrea.

En este sentido, la combinación entre humedad relativa alta y filtraciones activas (como es el caso del S21) genera las condiciones propicias para la acumulación de humedad superficial, lo que puede favorecer procesos como crecimiento biológico o formación de depósitos superficiales.

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de espectroscopía Raman de las muestras tomadas de hipogeos en el Alto de Segovia, se comprobó la presencia de un recubrimiento arcilloso superficial producto de procesos de iluviación. Este fenómeno ocurre cuando el agua de infiltración transporta partículas finas desde niveles superiores del suelo y las deposita sobre la superficie pétrea que presenta poros o cavidades. Estos depósitos modifican la dinámica higroscópica de la roca, ya que aumentan la retención de humedad localizada, aumentan tiempos de secado y favorecen los procesos de biocolonización.

Esto ayuda a comprender que, factores como la materialidad de la toba y procesos activos de infiltración han ocasionado el arrastre de materiales arcillosos al interior de los hipogeos creando depósitos superficiales que modifican la dinámica higroscópica de la roca. Además, con la formación de esta capa adicional superficial, se pueden generar procesos de reblandecimiento en la superficie, desprendimiento o disgregación localizada.

14.4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que el microclima al interior de los hipogeos se caracteriza por una alta estabilidad térmica y una humedad relativa constantemente elevada y en muchos casos cercana al punto de saturación. Estas condiciones son coherentes con estructuras subterráneas, pero favorecen la permanencia de humedad en superficie y pueden incrementar la aparición de biocolonización, condensación y acumulación de depósitos superficiales.

El análisis comparativo permitió identificar comportamientos microambientales diferenciados entre los hipogeos. Por un lado, los hipogeos S12 y S30 presentan mayor estabilidad microclimática, mientras que el hipogeo S21 muestra un comportamiento fuertemente condicionado por las filtraciones activas que presenta y finalmente, en el SA1 se evidencia una mayor interacción con las condiciones ambientales externas, puede ser debido a la topografía del terreno y profundidad del hipogeo.

Los datos de contenido de humedad superficial confirman que existen diferencias significativas en la dinámica higroscópica entre los hipogeos y entre distintos sectores al interior de un mismo hipogeo. Estas variaciones se relacionan, como se ha mencionado anteriormente, con factores como la topografía de cada alto, la ventilación, presencia de depósitos arcillosos, fisuras o grietas y circulación de humedad en el interior de la roca (toba).

La relación entre una humedad relativa alta, humedad superficial elevada, materialidad pétreo altamente porosa propia de esta toba volcánica y los depósitos arcillosos formados por la iluviación constituye una relación que debe estudiarse más a profundidad, ya que los hipogeos son estructuras subterráneas vulnerables a procesos naturales del entorno que se encuentran en permanente interacción con la materialidad. Como bien se mencionó en los resultados de Jorge Barón, los ciclos de humectación y secado de la roca pueden haber aumentado su frecuencia, lo cual influye directamente en el estado de conservación de los hipogeos.

Los resultados petrográficos y espectroscópicos complementan la interpretación de las condiciones ambientales, evidenciando que el proceso de iluviación modifica la capa superficial de los hipogeos, es decir, que se modifica su capacidad de absorción y retención de humedad de la roca, favoreciendo procesos como reblandecimiento, disgregación localizada o desprendimientos. La retención de humedad en superficie puede ser un factor que esté influyendo directamente en las condiciones de alta humedad relativa al interior de los hipogeos.

Sobre los registros de temperatura, se identificó una alta estabilidad térmica en el interior de los hipogeos, con variaciones menores a 1, lo cual corresponde al comportamiento esperado en estructuras subterráneas. Por otra parte, la humedad relativa presenta valores elevados, cercanos al punto de saturación lo que evidencia un microclima muy húmedo y constante en el interior de los hipogeos.

Se puede decir que las diferencias registradas entre los hipogeos monitoreados sugieren que factores como la topografía de cada sitio, la ventilación, la presencia de filtraciones activas y las características constructivas influyen en el comportamiento ambiental de cada hipogeo.

14.5 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con un monitoreo ambiental a largo plazo, que incluya la toma de datos de temperatura y humedad relativa del ambiente, de contenido de humedad superficial y temperatura

superficial. Se recomienda hacer la observación del clima del día/mes para tener en cuenta las condiciones ambientales externas. Para la consignación de esta información se puede utilizar una tabla de Excel que funcione para recolectar los datos del clima: soleado, lluvioso, nublado. Esta información, puede ayudar a establecer si, por ejemplo, un día con temperaturas elevadas puede llegar a tener un efecto en el interior del hipogeo, o si, por otro lado, las fuertes lluvias pueden causar un aumento de la humedad relativa. Resulta necesario obtener la mayor cantidad de datos posibles para relacionarlos correctamente en el monitoreo, y poder tener un punto de comparación.

Con un monitoreo y análisis de los datos, se puede hacer un seguimiento del comportamiento de las condiciones ambientales, identificando fluctuaciones considerables, si se mantiene un equilibrio en el microclima al interior de los hipogeos y el efecto del clima general de la zona en el interior de los hipogeos. Es pertinente tener en cuenta que los efectos del cambio climático que, generan el aumento de la temperatura anual, por lo que es un escenario a considerar que en el futuro las condiciones al interior de los hipogeos también sufran una variación y pueda tener efectos en su conservación.

Se tiene en cuenta la recomendación del geólogo Jorge Barón para el monitoreo de las condiciones ambientales al interior de los hipogeos, donde menciona la inclusión de equipo datalogger en la entrada y al interior, con el fin de obtener gradientes y variaciones estacionales. (Barón, 2026, FIAN) Para el hipogeo S21 se recomienda continuar con los estudios que permitan comprender el origen de la infiltración y buscar acciones para solventarla. Asimismo, se debe hacer un análisis preventivo en los demás hipogeos de los Altos, para poder identificar a tiempo una filtración y evitar que llegue a una amplia magnitud.

Finalmente, tomando la tesis de Sara Moncada, se recomienda incluir en el análisis de las condiciones el punto de rocío, ya que esto podría dar información sobre la condensación de agua sobre la superficie de los hipogeos e incluso, puede aportar para la metodología de la ubicación de los equipos, ya que los sensores pueden verse afectados por esta condensación generando errores en los registros del equipo. Para esto, ella recomienda retirar los dataloggers dentro de los hipogeos durante un día con el propósito que el sensor pueda “respirar” y no saturarse por el efecto de la humedad por condensación.

15. SOCIALIZACIÓN DEL PROYECTO

15.1 INTRODUCCIÓN

El presente anexo constituye la memoria descriptiva de las estrategias de socialización y divulgación implementadas durante el desarrollo del proyecto de documentación, estudios e intervenciones de los hipogeos en estado de conservación crítico en el parque arqueológico nacional de Tierradentro

Este apartado detalla el proceso llevado a cabo con la comunidad y los actores locales, subrayando que la preservación del patrimonio del Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro no solo depende de las acciones técnicas, sino también del fortalecimiento del sentido de apropiación y el diálogo de saberes en torno al patrimonio arqueológico del territorio.

La estrategia de comunicación se fundamentó en dar a conocer el proyecto y sus resultados tanto a nivel local como a un público en general. Así pues, se realizaron sesiones permanentes con los trabajadores del Parque y su administradora con el fin de dar a conocer los avances y poder articular con ellos la adecuada ejecución y monitoreo de las actividades. Con las comunidades aledañas se realizaron una sesión de socialización en San Andrés de Pisimbalá y un taller en Inzá que informó sobre el desarrollo del proyecto y dio a conocer aspectos técnicos de los hipogeos así como la información fotogramétrica que permite el recorrido virtual de éstos y para el público en general se llevó a cabo un ciclo de cuatro sesiones que explicaron con detalle el proyecto y sus logros. Estas últimas fueron transmitidas por redes sociales y aún se encuentran accesibles en la web. A continuación se exponen en detalle

A continuación se describe con más detalle la estrategia antes descrita.

15.2 ESPACIOS DE SOCIALIZACIÓN

SOCIALIZACIÓN CON TRABAJADORES DEL PAT

Durante los periodos de comisión de 2025 y 2026, las actividades de socialización se integraron de manera transversal a las labores técnicas desarrolladas en el Parque Arqueológico de Tierradentro. Se realizaron jornadas de transferencia de conocimientos con los trabajadores y el personal de apoyo, previa y posterior al inicio de las actividades, con el fin de socializar los objetivos de la comisión, en cuales hipogeos se tiene planeado trabajar y los principales procesos a desarrollar tales como el uso de morteros de inyección y la estabilización del soporte pétreo. . En este sentido se buscó comunicar debidamente a tiempo a todos los trabajadores del parque la información para que pudieran comunicarle a los visitantes y público en general. Estas sesiones permitieron también capacitar al personal en la identificación temprana de deterioros, asegurando que las labores de mantenimiento preventivo sigan los estándares del proyecto.

Igualmente, durante el desarrollo de la intervención en los diferentes hipogeos en el mes de febrero desde la página del ICANH y redes sociales, se hizo un comunicado oficial sobre el cierre temporal de los hipogeos para conocimiento de la ciudadanía en general.



Ilustración 103 Comunicado ICANH cierre temporal hipogeos febrero 2026

Finalmente, debido a la problemática asociada al crecimiento de cuerpos fúngicos en varios de los hipogeos que fueron intervenidos, María Paula Álvarez Coordinadora del proyecto y Antonio Guarnizo biólogo del proyecto, convocaron un espacio virtual con el fin de presentar y discutir en torno a la información recogida hasta el momento, el monitoreo que se estaba adelantando y las acciones planteadas a corto-medio plazo. A este espacio se invitó al subdirector del Grupo de Patrimonio Fernando Montejo, al coordinador del Grupo de Patrimonio Carlos Reina, Patricia Ramírez, Sara Moncada, Sofía Sabogal y Lina Rincón conservadoras del Grupo de Patrimonio, Rosalín Casas administradora del Parque Arqueológico de Tierradentro, Angelmiro Pito trabajador de planta del Parque y Gian Carlo trabajador del proyecto quien apoyó el monitoreo fotográfico de algunos de los hipogeos. En este espacio se pudieron determinar las acciones a corto-medio plazo para solventar la problemática, teniendo en cuenta que antes de implementar cualquier metodología de manejo, se deben hacer pruebas in situ con el fin de determinar su correcta eficacia.

Finalmente, el proceso se consolidó a través de una articulación institucional constante, donde la comunicación fluida entre contratistas, funcionarios del ICANH y trabajadores del parque garantizó que las intervenciones técnicas fueran comprendidas y respaldadas por los actores presentes en el territorio.

SOCIALIZACIÓN CON COMUNIDAD DE TIERRADENTRO

En el marco de la apropiación social, se establecieron espacios de diálogo con las comunidades locales para comunicar el alcance del proyecto, los resultados obtenidos a la fecha y la importancia de conservar tanto la estructura como la pintura mural de los hipogeos.





Ilustración 104. Jornadas de socialización, comisión febrero 2026. Fuente: Proyecto FIAN 2025-2026.

De manera complementaria, se desarrollaron talleres didácticos dirigidos al público infantil, utilizando metodologías pedagógicas para sensibilizar a las nuevas generaciones sobre el valor del patrimonio arqueológico. En el marco de la conmemoración de los 30 años de la declaratoria del Parque Arqueológico de Tierradentro por la UNESCO, Sofía Sabogal del área de Conservación del Grupo de Patrimonio en compañía con Carla Rodríguez y Camila Mayorga conservadoras del proyecto FIAN, llevaron a cabo un taller de sensibilización enfocado en las técnicas pictóricas prehispánicas presentes en los hipogeos del sitio. La actividad abordó la elaboración de réplicas utilizando materiales y procedimientos inspirados en los originales, con el fin de acercar a la comunidad local y visitantes a la importancia cultural del sitio arqueológico y el valor de su conservación. Esta actividad, desarrollada en el mes de noviembre del 2025, tuvo como finalidad compartir con la comunidad local y los visitantes para promover la divulgación del conocimiento y el valor del patrimonio cultural.



Ilustración 105. Desarrollo del taller sobre técnicas pictóricas en Biblioteca Pública de Inzá/Noviembre 2025.

15.3 ESPACIOS DE DIVULGACIÓN

Con el fin de hacer la divulgación del proyecto y sus resultados a un público general se llevó a cabo un ciclo de 4 sesiones donde diferentes miembros del equipo explicaron los aspectos más relevantes y hallazgos durante el estudio y la intervención de los hipogeos. Dichas jornadas realizadas durante el

mes de mayo de 2026, fueron anunciadas en redes sociales, buscando la asistencia de la ciudadanía y se invitó específicamente a los alumnos del programa de Conservación de patrimonio cultural mueble que cursaban el taller de restauración de pintura mural a que asistieran a ellas.

Estos encuentros tuvieron lugar de forma presencial en el Auditorio Paul Rivet (ICANH) y fueron transmitidos globalmente a través de YouTube y Facebook Live (@ICANHCOL), permitiendo una cobertura integral de los siguientes temas. Las grabaciones aún reposan en la web y el link para acceder a ellas se presenta en la tabla a continuación:

Sesión 1 (15 de mayo):	Apertura del ciclo con la introducción al proyecto, detallando la documentación técnica y el uso de tecnologías de registro 3D para el diagnóstico del estado de conservación. Link en youtube: https://www.youtube.com/watch?v=vjx7qBdGEIs
Sesión 2 (22 de mayo):	Presentación de los diagnósticos estructurales y la formulación específica del mortero estructural utilizado en las intervenciones. Link en youtube: https://www.youtube.com/watch?v=yty_TXkT1Dw
Sesión 3 (27 de mayo):	Análisis de la problemática de desprendimientos, enfocándose en la formulación de morteros de inyección y las maniobras de estabilización. Link en youtube: https://www.youtube.com/live/s3OWNgaY_J8
Sesión 4 (29 de mayo):	Cierre del ciclo con la exposición de análisis geológicos, abordando los fenómenos de disgregación de la roca y los procesos de consolidación final. Link en youtube: https://www.youtube.com/watch?v=4wBcooyOxGc

Tabla 47. Sesiones de divulgación: día y descripción de los espacios



Ilustración 106. Pieza de difusión para redes sociales “¿Sabes qué es el Proyecto Tierradentro FIAN 2025 – 2026?”. ICANH.

Este esfuerzo de divulgación no solo cumplió con el deber de informar sobre la gestión del patrimonio, sino que fortaleció el vínculo entre los investigadores y la comunidad interesada en la preservación de los hipogeos de Tierradentro.

1.1. SESIÓN 1: INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO DOCUMENTACIÓN TÉCNICA, ESTADO DE CONSERVACIÓN Y REGISTRO 3D

La sesión tuvo lugar el día 15 de mayo de 3.00pm, en el primer módulo de socialización se presentó el sistema de documentación técnica empleado, así como el diagnóstico y el estado de conservación en el marco del Proyecto FIAN 2025–2026 Tierradentro. La exposición estuvo a cargo de María Paula Álvarez, investigadora principal del proyecto, quien destacó, en primer lugar, que su desarrollo fue posible gracias al trabajo de un equipo interdisciplinario integrado por conservadores-restauradores, ingenieros, arquitectos, geólogos y otros especialistas.

Inicialmente, se expusieron los objetivos del proyecto, junto con su marco de trabajo y el alcance de sus componentes. Se señaló que el proyecto comprende diez hipogeos ubicados en los altos de Segovia, San Andrés, Aguacate y El Duende.

La socialización se desarrolló en dos momentos. En la primera parte se presentaron las técnicas de documentación aplicadas en los hipogeos, a partir de modelos fotogramétricos, fotografías ortoimágenes y la herramienta MetigoMap, con el fin de elaborar un levantamiento tridimensional detallado. Este levantamiento, además de constituir un registro fiel de los hipogeos, sirve como soporte documental y como herramienta de seguimiento para futuras intervenciones. Asimismo, se explicaron los criterios de intervención adoptados dentro del proyecto, entre ellos el criterio de mínima intervención y la elaboración de un glosario de deterioros, orientado a sistematizar la documentación de las patologías existentes y facilitar su monitoreo.

Durante la socialización también se subrayó que cada hipogeo constituye un universo particular; sin embargo, pueden clasificarse en hipogeos simples y complejos, de acuerdo con su configuración espacial y complejidad ornamental. Una vez expuesta la metodología de levantamiento y las técnicas utilizadas, se dio paso a una ronda de preguntas antes de avanzar a la segunda parte de la presentación, centrada en los resultados de los estudios de diagnóstico y conservación.

En esta segunda fase se expusieron los efectos de los microclimas presentes en los hipogeos y, a partir de estudios geotécnicos, de comportamiento y de patología estructural, se identificaron con detalle las singularidades de sus condiciones de conservación, así como la pérdida de volumen y el daño estructural. Se hizo especial énfasis en el efecto de la disgregación de la toba volcánica sobre la conservación de los hipogeos y de sus elementos constitutivos.

También se señaló, desde la perspectiva del diagnóstico y monitoreo, la importancia de medir la velocidad del deterioro, teniendo en cuenta que cada patología presenta características y patrones de avance distintos. Esto permite la formulación de un programa de mantenimiento y de conservación preventiva y correctiva. Asimismo, se abordó la posibilidad de que la disgregación y la construcción de los hipogeos guardaran alguna relación causal, dado que este deterioro se habría intensificado después de la instalación de dichos elementos.

Finalmente, se abrió un espacio de preguntas en el que se abordaron temas como los estudios estéticos e iconográficos de los hipogeos, aspecto que no hace parte del objeto del proyecto, pero que fue señalado como una necesidad dentro del Plan de Conservación.



Ilustración 107. Sesión 1 del espacio de divulgación.

1.2. SESIÓN 2: DIAGNÓSTICO, FORMULACIÓN DEL MORTERO ESTRUCTURAL E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL

Realizada el 22 de mayo de 2026, en el segundo módulo de socialización se abordaron el diagnóstico, la intervención estructural y la formulación del mortero estructural desarrollado para la intervención de los hipogeos objeto de estudio en el marco del Proyecto FIAN 2025–2026 Tierradentro. En primer lugar, se realizó una recapitulación general del proyecto, sus objetivos y el equipo profesional

participante. Posteriormente, se presentó la metodología de trabajo del componente estructural, la cual comprendió la revisión documental, el reconocimiento en sitio, el desarrollo de pruebas para la formulación del mortero estructural, así como la elaboración del diagnóstico y de la propuesta de intervención.

A continuación, intervino Germán Hermida, ingeniero encargado de la formulación del mortero estructural, quien explicó los materiales empleados en la búsqueda de una mezcla compatible con la toba volcánica. Para ello, se utilizó toba triturada y se exploraron distintas combinaciones mediante ejercicios interactivos, con el propósito de encontrar una formulación adecuada en términos físicos, mecánicos y estéticos. En este proceso se realizaron pruebas de color, fluidez, contenido de aire y comportamiento de la mezcla, orientadas a producir un mortero estructural compatible con el soporte de los hipogeos.

Uno de los principales hallazgos de las pruebas desarrolladas en el marco del componente estructural fue la baja resistencia de la toba volcánica. La prueba de resistencia arrojó un valor promedio de 11,4 kg/cm², lo cual permitió concluir que se trata de un material muy débil. En contraste, el mortero inicialmente desarrollado alcanzaba una resistencia aproximadamente quince veces superior a la del soporte, razón por la cual fue necesario adelantar un proceso de debilitamiento controlado de la mezcla, con el fin de asegurar su compatibilidad estructural. Asimismo, se presentaron las pruebas de fluidez y la incorporación de aditivos naturales, como fibras vegetales, dentro de los ensayos de conformación del mortero. También se diseñaron lechadas estructurales inyectables, destinadas a la consolidación de grietas y fisuras sin generar tensiones excesivas sobre la roca.

Posteriormente, se presentó la identificación de los hipogeos con daños estructurales priorizados dentro del estudio. En esta fase se describieron, uno a uno, los casos analizados, correspondientes a los hipogeos S-21, S-10, S-11, S-12, SA-1 y SA-2, señalando sus condiciones particulares de conservación y los deterioros estructurales evidenciados.

Dentro de los hallazgos se indicó que las diaclasas constituyen un deterioro recurrente en los hipogeos, especialmente cuando se entrecruzan y generan desprendimientos en cuña. Asimismo, se identificaron afectaciones no contempladas inicialmente, como infiltraciones laterales y superiores, así como la relación entre la cobertura —entendida como la cantidad de material existente entre el hipogeo y la superficie— y los daños estructurales observados. En este contexto, se señaló que el hipogeo SA-1 presenta la condición más compleja desde el punto de vista estructural, debido a la presencia de diaclasas en cuña combinadas con infiltraciones en nichos, pérdida de volumen y desprendimiento de fragmentos en la bóveda.

Luego de la explicación detallada de los deterioros identificados en cada hipogeo y de sus posibles causas, se expusieron algunas conclusiones generales. Entre ellas, se señaló que los deterioros presentan un origen principalmente natural y mecánico, y no necesariamente sísmico. De hecho, a partir del análisis de carga litoestática, se concluyó que, debido a su conformación monolítica, su geometría de arco y su condición de confinamiento en roca, los hipogeos presentan un comportamiento intrínsecamente sismorresistente, pese a la baja resistencia a la compresión de la toba volcánica.

Otra conclusión relevante fue que, a mayor amplitud del arco y menor presencia de pilares o elementos de soporte, se incrementa el compromiso estructural del hipogeo. Asimismo, se evidenció que varios deterioros tienen relación con cambios en las condiciones de humedad, tanto por exceso

como por déficit, así como con la presencia de diaclasas que conforman cuñas, más que con eventos sísmicos propiamente dichos.

También se descartó lo señalado en estudios anteriores respecto a que los cobertizos estuvieran generando una carga excesiva sobre los hipogeos. Se explicó que estos elementos no transmiten cargas de magnitud significativa; sin embargo, su incidencia debe analizarse desde otros factores, especialmente en relación con las variaciones de humedad y las condiciones ambientales del entorno.

Posteriormente, se explicaron los criterios de intervención adoptados y se enfatizó la importancia de comprender el contexto de los hipogeos, dado que muchos de sus deterioros tienen origen en factores externos, como las condiciones hidrológicas, ambientales y geológicas. En este sentido, se expusieron los límites de la acción de intervención, así como la necesidad de articular el monitoreo, la mitigación o eliminación de las causas de deterioro y las acciones directas de conservación o intervención sobre sus efectos, todo ello bajo el criterio de mínima intervención.

Finalmente, Camilo Betancur expuso las acciones de intervención desarrolladas, entre ellas los procesos de limpieza, estabilización, conformación de puentes de adherencia para asegurar la fijación del mortero, anastilosis, estabilización de bóvedas, reintegración de piezas mediante espigos de fibra de vidrio y construcción de formaletas modulares. Asimismo, se presentaron los resultados obtenidos, resaltando el cumplimiento de los criterios de mínima intervención, compatibilidad y legibilidad, y describiendo en detalle las intervenciones realizadas en cada uno de los hipogeos.

Como cierre, María Paula Álvarez subrayó la importancia de la discusión interdisciplinaria entre los profesionales del proyecto para definir el alcance de las intervenciones y el modo de abordaje de cada caso. Se concluyó que la comprensión del comportamiento estructural de los hipogeos resulta fundamental para orientar las intervenciones actuales y futuras, garantizando el respeto por sus valores de autenticidad e integridad. Finalmente, se resaltó el conocimiento técnico de los constructores originales de estos espacios, especialmente en lo relativo al uso de las formas, los materiales y las condiciones propias del medio excavado.

Proyecto FIAN

German Hermida 2



Foto 6- Cubos de 5 cm de arista fabricados y curados de acuerdo a la ASTM C 109.

Tabla 4- Evolución de resistencia a la compresión en cubos de mortero estructural con cemento Argos (ASTM C 109).

Edad (días)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	23.2
3	42.7
7	101.0
28	147.0

o, formulación del mortero estructural e intervención estructural desde el ICANH

Diagnóstico, formulación del mortero estructural e intervención estructural

Instituto Colombiano de Antropología e Historia

15.1 k suscriptores

Suscribirse

6

Compartir

Preguntar

Guardar

Descargar

Ilustración 108. Sesión 2 del espacio de divulgación

1.3. SESIÓN 3: ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE DESPRENDIMIENTOS, ENFOCÁNDOSE EN LA FORMULACIÓN DE MORTEROS DE INYECCIÓN Y LAS MANIOBRAS DE ESTABILIZACIÓN.

Realizada el 29 de mayo de 2026, en el tercer módulo de socialización se abordaron los problemas de desprendimientos, la formulación de morteros de inyección y las intervenciones de estabilización del soporte pétreo y de la pintura mural en los hipogeos en estado crítico, en el marco del Proyecto FIAN 2025–2026 Tierradentro. En primer lugar, se realizó una recapitulación general del proyecto, sus antecedentes, objetivos y el carácter interdisciplinario del equipo participante, integrado por conservadores-restauradores, ingenieros, geólogos, biólogos, personal de campo y trabajadores del parque.

La sesión inició con la presentación de la problemática identificada en los hipogeos, relacionada principalmente con la presencia de desprendimientos, grietas, fisuras, fracturas e inestabilidad en el soporte pétreo, así como con levantamientos y pérdidas de adherencia del enlucido que soporta la pintura mural. Se explicó que estos deterioros se presentan tanto en la roca como en la capa de enlucido, y que en algunos casos están asociados con la presencia de galerías generadas por insectos y otros agentes biológicos, las cuales han producido vacíos, debilitamientos y zonas de alta fragilidad. Posteriormente, se expuso el propósito de la estabilización, orientado a mitigar riesgos activos y evitar la pérdida de fragmentos de roca, enlucido o capa pictórica. Se señaló que estos riesgos podían incrementarse por factores como movimientos telúricos, vibraciones generadas por el tránsito de visitantes o por la propia fragilidad de los materiales. En ese sentido, se precisó que las intervenciones debían ser focalizadas, compatibles con los materiales originales, sustentadas en el diagnóstico técnico y debidamente documentadas.

A continuación, Carla Rodríguez explicó la metodología adoptada para abordar la estabilización. Esta comprendió el diagnóstico y reconocimiento del estado de conservación, la documentación escrita, gráfica y fotográfica de los deterioros, la reformulación y prueba de morteros, la selección de zonas piloto, la preparación de materiales y, finalmente, la intervención en los hipogeos priorizados. Se indicó que las acciones se concentraron principalmente en los hipogeos S-21, S-10, S-11, S-12 y SA-1, por ser aquellos que presentaban mayores necesidades de estabilización.

En relación con los morteros de inyección, se explicó que el proyecto tomó como antecedente la investigación realizada por Clemencia Vernaza en 2019 sobre morteros para el hipogeo S-12. A partir de este estudio, el equipo no partió de cero, sino que validó y ajustó técnicamente una formulación previamente investigada, teniendo en cuenta las condiciones actuales de los hipogeos, la disponibilidad de materiales y las necesidades específicas de la intervención. Para ello se recolectaron materiales locales de los altos de Segovia, Aguacate, San Andrés y El Duende, y se realizaron pruebas de inyectabilidad, fluidez, contracción, densidad, tiempo de secado y adhesión.

Dentro de los resultados se señaló que las fórmulas 3.1 y 7 presentaron los mejores comportamientos. La primera, de granulometría más fina, fue empleada como micromortero para zonas que requerían mayor penetración, especialmente redes de galerías y sectores de alta fragilidad. La segunda, con partículas de mayor tamaño, permitió atender galerías amplias, grietas y

zonas en las que se requería mayor capacidad de llenado y menor fluidez. También se concluyó que la toba de Segovia presentó el mejor comportamiento general, por lo cual fue mantenida como material principal dentro de la formulación.

Luego se presentaron pruebas complementarias, entre ellas el uso exploratorio de perlita como material liviano para morteros de inyección. Esta prueba fue aplicada en galerías de los nichos 1 y 2 del hipogeo S-12 y arrojó resultados favorables en términos de fluidez, adhesión y ausencia de contracción significativa en terreno, aunque se aclaró que deberá seguir evaluándose en futuras intervenciones. También se expusieron las pruebas de morteros de resane, formulados con distintas proporciones de áridos y aglomerantes, y evaluados según cohesión, contracción, adherencia, color y textura.

Posteriormente, se explicó el desarrollo de la intervención en campo, destacando las dificultades propias del trabajo en bóvedas, nichos y cielorrasos, así como el esfuerzo requerido para la recolección, trituración y cernido de tierras. Dentro de las acciones de estabilización se incluyeron la aplicación de morteros de resane para el cierre de fisuras, grietas, galerías de gran dimensión y bordes vulnerables; la readhesión del enlucido mediante tilosa; y la aplicación de morteros de inyección para estabilizar zonas inestables del soporte pétreo y redes de galerías.

Respecto a la readhesión del enlucido, se explicó que se empleó tilosa MH300P, seleccionada por su estabilidad, pH neutro, transparencia, resistencia a microorganismos y buen comportamiento en bajas proporciones. En algunos sectores fue necesario combinar la inyección de tilosa con mortero, especialmente cuando el enlucido se encontraba flotante debido a la presencia de galerías. Asimismo, durante la intervención se realizaron ajustes en campo, entre ellos la incorporación de ácido piroleñoso en algunos procesos, debido a la presencia de hongos en hipogeos como S-12, S-11 y S-10. Durante la socialización también se subrayó la importancia de documentar técnicamente las intervenciones realizadas. Además del levantamiento gráfico de deterioros, se elaboró un registro de las zonas intervenidas mediante MetigoMap, lo cual permitió dejar trazabilidad de la aplicación de morteros de inyección, resanes, tilosa y otros tratamientos complementarios. Esta documentación constituye una base fundamental para el seguimiento, monitoreo y conservación futura de los hipogeos.

Finalmente, se presentó la reintegración cromática de los morteros aplicados, aclarando que esta no fue necesaria en todos los casos. En hipogeos como el S-12, el color del mortero se integró adecuadamente con las superficies existentes; sin embargo, en otros como el S-10 y el S-11 fue necesario aplicar tierras coloreadas del mismo contexto para mitigar el impacto visual de la intervención, sin intervenir ni reintegrar faltantes de capa pictórica original.

Como cierre, María Paula Álvarez resaltó que la comprensión detallada de los deterioros y la documentación rigurosa fueron determinantes para definir intervenciones coherentes con los criterios del proyecto. Se concluyó que la estabilización permitió reducir riesgos y atender zonas críticas del soporte pétreo y de la pintura mural, especialmente en los hipogeos S-10, S-11, S-12, S-21 y SA-1. Asimismo, se destacó la importancia de contar con un equipo técnico capacitado, materiales compatibles y una metodología flexible que permita responder a las condiciones reales de campo, siempre bajo criterios de mínima intervención, autenticidad, respeto por los materiales originales y valoración del conocimiento técnico de los constructores originales de los hipogeos.

YouTube

Buscar

Evaluación de los morteros de inyección

Reológicas:

- Test de inyectabilidad mediante jeringa
- Test de flujo para evaluar plasticidad
- Test de rezumo y expansión

Físico - mecánicas:

- Densidad húmeda y seca
- Test de Tiempo de secado inicial y final
- Test de Contracción al secado en maqueta
- Test de Adhesión inicial y adhesividad final

prendimientos, formulación de mortero de inyección e intervención de estabilización desde el TC

Problemas de desprendimientos, formulación de mortero de inyección e intervención de estabilización

Instituto Colombiano de Antropología e Historia

Suscribirse

3

Compartir

Preguntar

Guardar

Ilustración 109. Sesión 3 del espacio de divulgación

1.4. SESIÓN 4: CIERRE DEL CICLO CON LA EXPOSICIÓN DE ANÁLISIS GEOLÓGICOS, ABORDANDO LOS FENÓMENOS DE DISGREGACIÓN DE LA ROCA Y LOS PROCESOS DE CONSOLIDACIÓN FINAL.

Realizada el 29 de mayo de 2026, en el auditorio Paul Rivet, la cuarta y última sesión de socialización del Proyecto FIAN 2025–2026 Tierradentro abordó los análisis geológicos, los problemas de disgregación y las pruebas de consolidación desarrolladas en los hipogeos en estado crítico del Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro.

La sesión se planteó como cierre del ciclo de socialización, en el cual previamente se habían presentado el sistema de documentación técnica, el diagnóstico estructural, las intervenciones de estabilización del soporte pétreo y la pintura mural, y las soluciones aplicadas frente a desprendimientos y problemas de conservación. En esta última charla, el énfasis estuvo puesto en comprender la naturaleza geológica de los hipogeos, la técnica material de sus superficies y el fenómeno de la disgregación, entendido como uno de los deterioros que genera pérdida irreversible de volumen e información material.

A continuación, intervino Jorge Varón, geólogo del proyecto, quien explicó el origen volcánico de las rocas en las que fueron excavados los hipogeos. Señaló que estas corresponden a tobas no soldadas, formadas por fragmentos de origen volcánico aglutinados por ceniza, caracterizadas por ser porosas, poco cohesionadas y naturalmente disgregables. Esta condición, si bien representa una vulnerabilidad desde el punto de vista de la conservación, también fue aprovechada por los constructores originales para tallar y labrar los hipogeos.

Posteriormente, se presentaron los resultados de los estudios científicos realizados sobre la pintura mural, especialmente a partir de análisis petrográficos y espectroscopía. Se explicó que las capas de enlucido blanco están compuestas principalmente por caolinita, material derivado de la alteración extrema de la toba volcánica, cuya función habría sido principalmente estética por su capacidad de resaltar sobre el soporte. También se identificaron capas de enlucido beige, posiblemente compuestas por esmectita o haloisita, utilizadas para homogeneizar la superficie irregular de la roca antes de la aplicación de las capas pictóricas.

En relación con los pigmentos, se indicó que las capas de tonalidad café rojiza o amarillenta corresponden a arcillas naturalmente teñidas con óxidos de hierro, mientras que las capas negras están asociadas con fragmentos de rocas metamórficas con presencia de grafito. También se identificaron películas de pigmento puro de color rojo, correspondientes a hematita, y pigmentos negros vinculados a materia orgánica carbonizada. Estos hallazgos permitieron reconocer que los materiales empleados en la pintura mural provenían en buena medida de fuentes locales y que fueron seleccionados a partir del conocimiento de sus propiedades cromáticas y materiales.

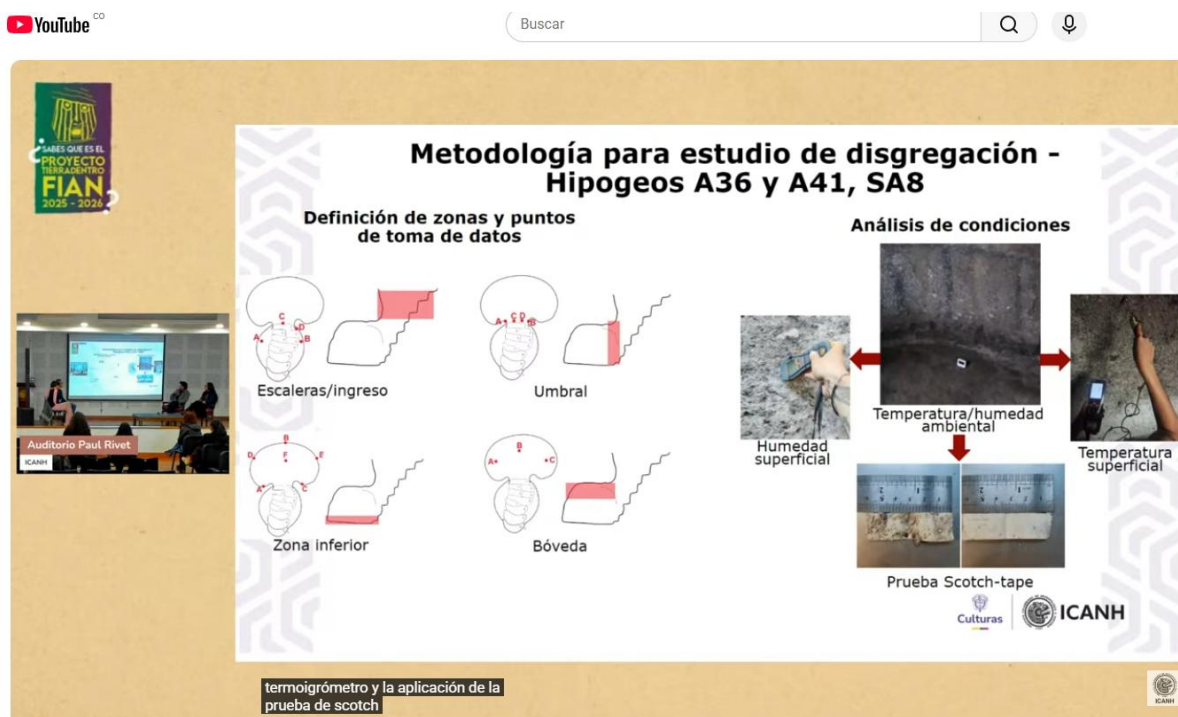
Luego se abordó el problema de la disgregación desde el punto de vista geológico. Se explicó que este fenómeno se relaciona con la alteración del vidrio volcánico presente en la matriz y en los fragmentos de pumita de la toba. En una primera etapa, dicha alteración genera minerales de arcilla que pueden aportar cierta cohesión al material; sin embargo, cuando se intensifican los ciclos de humectación y secado, y cuando ingresan fluidos cargados de arcillas desde los horizontes superiores del suelo, se produce una segunda etapa de alteración que resulta dañina para la roca. Este proceso genera microfracturamiento, aumento de porosidad, ablandamiento, pérdida de conexión entre partículas y, finalmente, disgregación, descamación o desprendimiento.

Posteriormente, Luis Vergara presentó la metodología de estudio in situ de la disgregación, aplicada principalmente en los hipogeos A-36, A-41 y SA-8. Esta metodología buscó documentar, categorizar y hacer seguimiento al fenómeno de disgregación mediante observación del estado de conservación, definición de puntos de análisis, medición de humedad superficial, temperatura superficial, condiciones ambientales y aplicación de pruebas controladas de desprendimiento de partículas. Asimismo, se desarrolló una escala de valoración para clasificar la disgregación en niveles bajo, medio y alto, con el fin de homogeneizar el registro y permitir comparaciones entre sectores e hipogeos.

En el Alto del Aguacate se identificó que la disgregación se concentra principalmente en las escaleras, zonas de ingreso, umbrales y bóvedas, donde existe mayor incidencia de radiación solar, ventilación, fluctuaciones de temperatura y humedad, así como pérdida progresiva de la humedad natural de la toba. También se señaló que la poca profundidad de las cámaras, la cercanía entre hipogeos y la presencia de cobertizos han modificado las condiciones de humedad del soporte, favoreciendo procesos de secado y estrés material. En contraste, las zonas inferiores de las cámaras mostraron mayor estabilidad, asociada a condiciones ambientales más constantes y a una mayor humedad superficial.

Respecto al Alto de San Andrés, se explicó que presenta una dinámica hídrica más compleja, relacionada con procesos de infiltración, escorrentía, acumulación de humedad, fisuras y diaclasas. En este alto, la disgregación se concentra especialmente en escaleras, umbrales y zonas de transición, mientras que las cámaras tienden a presentar mayor estabilidad. También se observó que algunas capas arcillosas pueden actuar como protección, pues las zonas donde la toba se encuentra más

expuesta presentan mayor pérdida de cohesión, desprendimiento granular y pérdida volumétrica localizada.



Análisis geológicos, los problemas de disgregación y la consolidación

Ilustración 110. Sesión 4 del espacio de divulgación

A continuación, se expusieron las pruebas de consolidantes realizadas para evaluar posibles tratamientos frente a la disgregación. Se probaron tres productos: Nano Estel, basado en nanopartículas de sílice suspendidas en agua; Nano Restore, compuesto por nanopartículas de hidróxido de calcio en alcohol; y Wacker OH, consolidante comercial a base de silicato de etilo modificado. Las pruebas se realizaron en el hipogeo SA-8, mediante aplicación por aspersión en capas finas y evaluación posterior mediante pruebas táctiles. Como resultado, se concluyó que los consolidantes con mejor comportamiento fueron Wacker OH y Nano Restore, mientras que Nano Estel no produjo los resultados esperados.

También se presentaron pruebas de rehidratación realizadas en los hipogeos S-11 y S-12, mediante aplicación controlada de agua por aspersión en pilastras durante varios días consecutivos. Aunque se observó una mejoría temporal de la superficie poco después de la aplicación, al día siguiente la disgregación persistía, por lo que se concluyó que la rehidratación directa no constituye por sí sola una solución efectiva. No obstante, estas pruebas permitieron avanzar en la reflexión sobre la necesidad de recuperar progresivamente condiciones de humedad de equilibrio en la roca.

Finalmente, se discutieron las implicaciones de consolidar superficies extensas. Se concluyó que no resulta adecuado aplicar consolidantes de manera generalizada sobre la totalidad de las superficies disgregadas, pues ello podría generar efectos no deseados y contradecir el criterio de mínima intervención. En cambio, se propuso reservar su uso para zonas puntuales, especialmente aquellas que requieren estabilización previa para permitir intervenciones posteriores, como inyecciones de mortero o readhesiones.

Como cierre, María Paula Álvarez resaltó que la disgregación debe entenderse a partir de la relación entre la naturaleza geológica de la toba, la alteración del vidrio volcánico, los ciclos de humectación y secado, las dinámicas de infiltración y la pérdida de humedad asociada a intervenciones en el entorno, como cobertizos e impermeabilizaciones. Se señaló que las estrategias futuras deberán orientarse principalmente hacia la conservación preventiva, mediante acciones graduales y monitoreadas que permitan recuperar o mantener condiciones de humedad estables, evitar cambios bruscos y respetar el equilibrio particular de cada hipogeo. En ese sentido, se concluyó que cada hipogeo funciona como un universo independiente, con condiciones propias que deben ser comprendidas antes de definir cualquier medida de intervención. Por último, gracias a una de las intervenciones del público se recordó que una de las recomendaciones del proyecto es evaluar la posibilidad de modificar la cobertura vegetal, teniendo en cuenta que esta también ha sido modificada sobre los hipogeos y su reemplazo por especies nativas puede favorecer un mejor intercambio de humedad.

16. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones en torno al Sistema de documentación, el estudio de la técnica, diagnóstico y estado de conservación

- La documentación técnica desarrollada en el marco del Proyecto FIAN 2025–2026 constituye una herramienta fundamental para el conocimiento, registro, seguimiento y futura intervención de los hipogeos en estado crítico del Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro, en tanto permite contar con levantamientos tridimensionales, ortoimágenes y registros gráficos precisos de sus condiciones actuales.
- El uso de herramientas como la fotogrametría, las ortoimágenes y MetigoMap permitió consolidar un sistema de documentación detallado, capaz de registrar tanto las características formales de los hipogeos como las patologías presentes en sus superficies, facilitando la identificación, localización y monitoreo de los deterioros.
- Los análisis geológicos permitieron establecer que los hipogeos fueron excavados en tobas no soldadas de origen volcánico, materiales naturalmente porosos, poco cohesionados y disgregables, condición que facilitó su talla por parte de los constructores originales, pero que también constituye una de sus principales vulnerabilidades desde el punto de vista de la conservación.
- El estudio petrográfico de la pintura mural permitió identificar que los enlucidos y pigmentos empleados provienen de materiales locales derivados de la alteración de la toba volcánica, arcillas naturalmente coloreadas, óxidos de hierro, rocas metamórficas con grafito y materia orgánica carbonizada, lo cual evidencia un conocimiento técnico preciso de los recursos disponibles en el entorno.
- El diagnóstico evidenció que cada hipogeo presenta condiciones particulares de conservación, por lo cual no es posible establecer soluciones homogéneas para todos los casos; por el contrario, cada estructura debe ser comprendida como una unidad específica, con dinámicas propias de deterioro, configuración espacial y complejidad ornamental.
- La identificación de deterioros como la disgregación de la toba volcánica, la pérdida de volumen, las alteraciones microclimáticas y los daños estructurales permitió reconocer la necesidad de medir no solo la existencia de las patologías, sino también su velocidad de avance, con el fin de orientar acciones de conservación preventiva, mantenimiento y seguimiento técnico.
- La sesión permitió concluir que, si bien el proyecto se concentra en la documentación, diagnóstico e intervención de hipogeos en estado crítico, existen líneas de investigación complementarias, como los estudios estéticos e iconográficos, que resultan relevantes para fortalecer el conocimiento integral de estos bienes y que deberán ser consideradas en la desarrollo de la agenda de investigaciones en torno al Parque Arqueológico de Tierradentro.

Conclusiones relacionadas con Diagnóstico e intervención estructural y la formulación del mortero estructural

- El diagnóstico estructural permitió establecer que varios de los deterioros presentes en los hipogeos tienen un origen principalmente natural y mecánico, asociado a la presencia de diaclasas, infiltraciones, pérdida de volumen, variaciones de humedad y condiciones propias de la toba volcánica, más que a eventos sísmicos propiamente dichos.
- Las pruebas realizadas sobre la toba volcánica evidenciaron su baja resistencia mecánica, lo cual hizo necesario ajustar la formulación del mortero estructural para garantizar su compatibilidad con el soporte original, evitando la incorporación de materiales excesivamente rígidos o resistentes que pudieran generar nuevas tensiones sobre la roca.
- La formulación del mortero estructural constituyó un proceso técnico de ajuste y validación, en el cual se evaluaron aspectos físicos, mecánicos y estéticos, tales como color, fluidez, contenido de aire, resistencia, comportamiento de la mezcla y compatibilidad con la toba volcánica, con el fin de obtener un material adecuado para la consolidación de grietas, fisuras y zonas inestables.
- El análisis estructural permitió concluir que los hipogeos presentan un comportamiento intrínsecamente sismorresistente, derivado de su condición monolítica, su geometría en arco y su confinamiento en roca; sin embargo, esta condición no elimina la necesidad de intervenir aquellos sectores donde la amplitud de los arcos, la ausencia de soportes, las diaclasas o las infiltraciones comprometen la estabilidad.
- Las intervenciones estructurales desarrolladas, entre ellas la estabilización de bóvedas, la anastilosis, la reintegración de fragmentos, el uso de espigos de fibra de vidrio, los puentes de adherencia y las formaletas modulares, permitieron atender zonas críticas bajo criterios de mínima intervención, compatibilidad, legibilidad y respeto por los valores de autenticidad e integridad de los hipogeos.

Conclusiones relacionadas con los problemas de desprendimientos, formulación de morteros de inyección e intervención de estabilización

- La estabilización del soporte pétreo y de la pintura mural se definió como una acción prioritaria para mitigar riesgos activos asociados a desprendimientos, grietas, fisuras, fracturas, pérdida de adherencia del enlucido y presencia de galerías generadas por insectos y otros agentes biológicos, los cuales comprometían la conservación material de varios hipogeos.
- La intervención se concentró principalmente en los hipogeos S-10, S-11, S-12, S-21 y SA-1, identificados como los casos con mayores necesidades de estabilización, lo cual evidencia que la priorización de acciones se fundamentó en el diagnóstico técnico, la gravedad de los deterioros y el riesgo de pérdida de material original.
- La formulación de morteros de inyección no partió de cero, sino que tomó como base experiencias e investigaciones previas, especialmente la desarrollada por Clemencia Vernaza en 2019, las cuales fueron validadas y ajustadas de acuerdo con las condiciones actuales de los hipogeos, la disponibilidad de materiales locales y las necesidades específicas de la intervención.
- Las pruebas realizadas consideraron variables como fluidez, capacidad de penetración, contracción al secado, adhesión inicial y final, y ausencia de rezumo permitieron seleccionar

las fórmulas 3.1 y 7 como las más adecuadas para la estabilización. Estos ensayos permitieron identificar formulaciones con comportamiento favorable para contextos donde se requiera estabilización localizada del soporte diferenciando su uso según las características del deterioro: la primera, como micromortero de mayor capacidad de penetración para redes de galerías y zonas frágiles; y la segunda, como mortero de mayor granulometría para grietas, vacíos y sectores que requerían mayor capacidad de llenado.

- La intervención demostró la importancia de articular el diagnóstico, la experimentación con materiales, la documentación gráfica y fotográfica, y la adaptación técnica en campo, incluyendo acciones como resanes, readhesión con tilosa, inyección de morteros, uso exploratorio de perlita y reintegración cromática, siempre bajo criterios de mínima intervención, compatibilidad, autenticidad y respeto por los materiales originales.
- A futuro, cualquier eventual uso de morteros de inyección en otros hipogeos deberá estar precedido por una nueva evaluación de campo, la actualización del levantamiento de deterioros, la identificación precisa de puntos críticos y la verificación de que la pérdida de cohesión o las discontinuidades del soporte presenten un comportamiento activo que justifique una intervención material directa.

Conclusiones derivadas de los problemas de disgregación y la consolidación

- La roca de los hipogeos es una toba volcánica no soldada, caracterizada desde su origen por una baja cohesión, elevada porosidad (cerca al 30%) y un carácter naturalmente friable. Estas propiedades facilitaron el labrado original de las tumbas, pero hoy las hacen extremadamente susceptibles al desmoronamiento granular ante cualquier acción mecánica o ambiental.
- La disgregación se explica por un proceso de alteración progresiva del vidrio volcánico y de la matriz de la toba, intensificado por ciclos de humectación y secado, infiltración de fluidos cargados de arcillas, aumento de porosidad, microfracturamiento y pérdida de cohesión, lo que finalmente deriva en desprendimiento granular, descamación, pérdida volumétrica o colapso de fragmentos.
- La metodología de medición in situ permitió reconocer que en los hipogeos mas afectados por este deterioro, la disgregación no se distribuye de manera homogénea en los hipogeos, sino que se concentra principalmente en escaleras, ingresos, umbrales, bóvedas y zonas de transición, donde inciden con mayor fuerza la radiación solar, el viento, las fluctuaciones de temperatura y humedad, la pérdida de humedad de la roca y las condiciones particulares del entorno.
- Las pruebas de consolidación y rehidratación demostraron que las intervenciones frente a la disgregación deben ser puntuales, graduales y monitoreadas, evitando la aplicación generalizada de consolidantes sobre superficies extensas y priorizando estrategias de conservación preventiva orientadas a recuperar o mantener condiciones estables de humedad, siempre bajo criterios de mínima intervención, compatibilidad material y respeto por el equilibrio particular de cada hipogeo.
- Finalmente se señalaron acciones de conservación preventiva con atención al entorno, a efectos de mejorar las condiciones de humedad de los hipogeos, tales como: la posibilidad de

reemplazar la cobertura vegetal existente por una endémica que mejore el comportamiento de la humedad en los hipogeos, para el caso de los hipogeos del Aguacate: el retiro de los canales de desagües de los cobertizos y alternativas para cubrir el ingreso de los hipogeos, teniendo en cuenta que las áreas de umbrales y escaleras son las más afectadas por las condiciones microclimáticas generados en parte por los cobertizos.

Conclusiones relacionadas con el monitoreo ambiental y biológico

- Se hace necesario documentar los pisos de los hipogeos, el crecimiento fúngico dado entre marzo y junio de 2026 evidenciaron la necesidad de contar con fotografías de esta zona de los hipogeos, asunto que no había sido considerado hasta ahora por ninguno de los estudios hechos en los hipogeos.
- El análisis de condiciones ambientales y el seguimiento a la biocolonización existente en los hipogeos realizado sobre varios hipogeos evidenció que estas estructuras mantienen condiciones ambientales bastante estables en su interior lo que lleva también a que exista un equilibrio de las comunidades microbianas que allí habitan.
- La presencia de insectos, culebras y otros animales evidencia también que estas estructuras son nichos ecológicos de importancia para la biodiversidad de la zona.
- Es de resaltar los hallazgos en el S12 frente a estas condiciones ambientales internas. El análisis higrotérmico del hipogeo S12 evidencia que, aunque la temperatura promedio se mantiene relativamente estable durante el periodo evaluado, la humedad relativa presenta una tendencia progresiva hacia condiciones críticas de saturación. A partir de octubre de 2025 se identifica un punto de quiebre en la dinámica microclimática, caracterizado por el aumento simultáneo de la temperatura y la humedad relativa, lo que rompe el comportamiento inverso observado durante los primeros meses del estudio. En conjunto, los resultados permiten concluir que el hipogeo S12 se encuentra en una condición microclimática vulnerable, donde la capacidad natural de amortiguación ambiental parece haber disminuido. Por tanto, la conservación preventiva debe priorizar el control de la humedad, la reducción de fuentes antrópicas de calor y vapor, y el fortalecimiento del monitoreo continuo para anticipar episodios de condensación y deterioro.

Recomendaciones

Frente a la respuesta que tuvieron los hipogeos SA1 y S12 después de la intervención se recomienda:

1. Implementar un protocolo de ingreso controlado en estos hipogeos, limitando la presencia humana únicamente a actividades estrictamente necesarias de monitoreo, conservación o mantenimiento.

2. En caso de realizar intervenciones en su interior se recomienda establecer horarios de trabajo por franjas cortas, con tiempos máximos de permanencia previamente definidos y pausas amplias entre ingresos, de manera que el microclima interno pueda recuperar gradualmente su equilibrio después de cada intervención. A su vez, reducir al mínimo el número de personas que ingresan simultáneamente al hipogeo y establecer turnos escalonados para las actividades técnicas. En caso de requerirse trabajos prolongados, se recomienda dividirlos en sesiones breves y planificadas, evitando concentrar varias tareas en una misma jornada.

3. Realizar inspecciones periódicas orientadas a identificar signos tempranos de condensación, escurrimientos, manchas de humedad, cristalizaciones, biodeterioro o crecimiento biológico. Estas revisiones deben priorizarse después de periodos de saturación sostenida o luego de jornadas de intervención dentro del hipogeo.

Frente a los hipogeos A36 y S12 donde se realizaron actuaciones sobre el cobertizo y la capa impermeabilizante se recomienda retomar la metodología de evaluación del contenido de humedad de la roca y la disgregación así como la evaluación de condiciones ambientales con el fin de tener datos para poder dar lineamientos mas claros sobre cómo proceder con estas intervenciones.

Para todos los hipogeos se recomienda:

- Minimizar las fluctuaciones de humedad dentro de los hipogeos, ya que los ciclos de humectación y secado favorecen la expansión-contracción de las arcillas, la aparición de eflorescencias salinas y el desarrollo de fisuras que debilitan el soporte. 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. Se desaconseja el uso de un sistema de ventilación distinto al natural que puede generarse al ingresar aire por los pozos, 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, generar pequeñas intervenciones que por ejemplo posibiliten en el caso en que ello sea necesario que la roca recupere su contenido de humedad de equilibrio. Se considera una opción 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

Álvarez, M. P., García, L., & Jiménez, N. J. (2002). *Registro y documentación de los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Álvarez, M. P., Bateman, C., Jiménez, N. J., & Ramírez, P. (2006). *Metodología de intervención en el hipogeo S12 y evaluación general de la situación actual de los hipogeos* [Informe técnico]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Álvarez, M. P., Ramírez, P., Sabogal, S., Buitrago, A., Dávila, J., Gómez, F., Jaramillo, N., García, R., & Moncada, S. (2024). *Plan estratégico de conservación de Tierradentro*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Álvarez White, M. C. (1995). *Informe sobre el viaje a Tierradentro durante el 22 de mayo al 2 de junio de 1995* [Informe técnico]. Instituto Colombiano de Cultura.

Álvarez White, M. C. (1996). Proyecto general de conservación de los hipogeos de Tierradentro, Cauca, Colombia. *Informe sobre el viaje a Tierradentro durante el 22 de mayo al 2 de junio de 1995*. Bogotá, Instituto Colombiano de Cultura, 1996.

Ángel Reyes, G. (1989). Problemas de drenaje Parque Arqueológico de Tierradentro, Departamento del Cauca (Ref. 573-89). Ingeniería e Hidrosistemas Ltda.

Anggrayni, D., Purnama, I., Saidi, N., Novianti, F., Baharum, N., Mutamima, A., & Boukherroub, R. (2025). Antifungal and phytotoxicity of wood vinegar from biomass waste against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* TR4 infecting banana plants. *Discover Food*. doi:10.1007/s44187-025-00377-8

Aroca Araújo, A. (2013). Análisis de los diseños en los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro, Cauca, Colombia. *Revista UDCA Actualización y divulgación científica*, 11. doi:10.31910/rudca.v16.n2.2013.927

Ashuro, Z., Diriba, K., Afework, A., Husen Washo, G., Shiferaw Areba, A., G/Meskel kanno, G., Tesfu, M. (2022). Assessment of microbiological quality of indoor air at different hospital sites of Dilla university: A cross-sectional study. *Environmental Health Insights*. doi:10.1177/11786302221100047

ASTM C 780-25 "Standard Test Methods for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry". Vol 4.02

ASTM C185-20 "Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar"

ASTM C109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”

Ayala Sarasty, A., López López, D., & Urbano Delgado, D. (2025). Guía Ilustrada de Víboras del Cauca y Serpientes de Popayán. *Identificación de Serpientes de Colombia. Fauna de Colombia*.

Banchi, E., Benesperi, R., Giordani, P., Martire, L., Favero-Longo, S., & Loppi, S. (2022). Wood distillate as an alternative bio-based product against lichens on sandstone. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 170. doi:10.1016/j.ibiod.2022.105386

Barbero, S. (2023). Estudio de la actividad herbicida de los compuestos naturales citral, ácido pelargónico, carvacrol, timol, eugenol y p-cimeno en ensayos de campo. *Universitat Politècnica de València*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/197912>

Bateman, C., Segura, J., & Vernaza, C. (2020). *Informe final. Estrategias de protección para la conservación integral de los bienes de patrimonio cultural de los Parques Arqueológicos Nacionales. Tomo III: Parque Arqueológico de Tierradentro*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) – Universidad Externado de Colombia.

Bateman, C & Segura, J. (septiembre 30, 2021) Proceso de construcción de un sistema de documentación. Caso piloto Parque Arqueológico de Tierradentro, Hipogeo S12. [Conferencia] Espacio virtual de difusión de experiencias en conservación *del patrimonio cultural Conserva Conversa no 16*. Corporación Proyecto Patrimonio. <https://fb.watch/oVPfTEEzmQ/>

Bell, C. (2009). *Ritual: Perspectives and Dimensions*. New York: Oxford University Press.

Bocanegra, E. (1989). *Informe sobre la visita de inspección a los hipogeos de Tierradentro, Cauca* [Informe técnico]. Centro Nacional de Restauración.

Bocanegra, E. (1990). Fichas de estado de conservación Pintura Mural - Hipogeos de Tierradentro. Centro Nacional de Restauración.

Bocanegra, E., Castaño, H., Moncada, J., & Useche, L. A. (1993). *Problemática Tierradentro*. [Informe técnico]. Centro Nacional de Restauración.

Brimblecombe, P., & Querner, P. (2026). Insect pests and arthropods in heritage interiors. *Insects*. doi:10.3390/insects17030309

Briseño Zúñiga, E. (2019). Elaboración y aplicación de un consolidante de roca volcánica formulado con tetraetilortosilicato y nanopartículas de sílice. 10.13140/RG.2.2.29223.37288.

Brito, J., Batallas, D., & Yáñez-Muñoz, M. (2017). Ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de los bosques montanos del río Upano, Ecuador: Lista anotada, patrones de diversidad y descripción de cuatro especies nuevas. *Neotropical Biodiversity*, 125-156. doi:10.1080/23766808.2017.1299529

Byun, B., Shin, S., Bae, Y., Kim, D., & Choi, Y. (2014). First discovery of a cave-dwelling Tineid moth (Lepidoptera, Tineidae) from East Asia. *Journal of Forestry Research*, 647-651. doi:10.1007/s11676-014-0503-9

Cadena, P. Tierradentro 3D. (2018). <https://tierradentro3d.com/index.html>

Castañeda, A., & Chávez, C. (1986). Material Fotográfico – Hipogeos Tierradentro / Cauca. Centro Nacional de Restauración – Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Castaño, H., Herrera, R., & Castillo, J. E. (1994). Plan de acción de emergencia en el Parque Arqueológico de Tierradentro. [Informe técnico]. Colcultura, Instituto Colombiano de Cultura.

Castillo, E., & Herrera, R. (1994). Estado actual de Conservación de los hipogeos – agosto 2 al 8 de 1994. [Informe Técnico].

Chaves, A., & Puerta, M. (1976) Tierradentro. Ediciones Zazacuabi.

Chaves, A., & Puerta, M. (1980). Entierros primarios de Tierradentro. Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, FIAN.

Chaves, A., & Puerta, M. (1985). Tierradentro. El Áncora Editores.

Chaves, A., & Puerta, M. (1986) Monumentos arqueológicos de Tierradentro. Edit. Fondo de Promoción de la Cultura del Banco Popular.

Chaves, A., & Puerta, M. (1990a). Tierradentro. In M. Jimeno (Ed.), *Parques Arqueológicos* (pp. 87–114). Instituto Colombiano de Cultura.

Chaves, A., & Puerta, M. (1990b). Una nueva fecha para la cultura de Tierradentro. *Universitas Humanística*, 33, 31–38.

Colcultura. (1994). Emergency Assistance Request: Archeological Park of Tierradentro (Solicitud de asistencia de emergencia). Instituto Colombiano de Cultura.

De Moya Guerra, N., Martínez Hernández, N., & García, A. (2021). Diversidad taxonómica de Opiliones en la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Magdalena, Colombia. *Boletín científico Museo de Historia Natural Universidad de Caldas*, 157-180. doi:10.17151/bccm.2021.25.2.10

Dugma, G., & Zeleke, B. (2025). Formulation of organic pest control from Garlic, Onion and Chilli and its Application on Cabbage Plant. *Journal of Faculty of Food Engineering*, 143-150.

Durán Ocal, A., & Siegesmund, F. (2009). *Toba volcánica como material arqueológico en Colombia: Caracterización, causas de la descomposición y conceptos de conservación*. SECAB.

Emmons., P. (1992). Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis; Repair Strategy; Techniques. John Wiley & Sons, pp. 320

Espinosa, A. (1995). Diagnóstico y propuesta de tratamiento para la conservación de los hipogeos de Tierradentro Cauca Colombia.

Estela, A. (2012). Ejecución del contrato N°57. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Farro, R., Ramos, W., Iglesias, S., & Carreño-Farfan, C. (2021). Aislamiento e identificación de microorganismos ambientales del museo Tumbas Reales de Sipán. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 11. doi:10.31910/rudca.v24.n2.2021.1533

Fernández, F., & Sharkey, M. (2006). *Introducción a los Hymenoptera de la Región Neotropical*. Sociedad Colombiana de Entomología & Universidad Nacional de Colombia.

Fernández, S., & Pujade, J. (2015). Orden Hymenoptera. *Revista IDE@ - SEA*, 1-36.

Fisher, R. V. (1961). Proposed classification of volcanoclastic 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](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.

Gaitán, D. (2021). *Acercamiento a la técnica de elaboración y a los materiales empleados como pigmento en la capa pictórica del hipogeo S12*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Gamboa, P. (1983). El arte de Tierradentro. En *Revista de Extensión Cultural de la Sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia* No 15-1982

Gamboa, P. (1985). *Tierradentro: los constructores de hipogeos*. Instituto Colombiano de Antropología. www.gamboahinestrosa.info

Gamboa, A. L. (2005). *Materiales y técnicas alternativas para la restauración de tumbas en toba volcánica: El caso del Hipogeo S21, Tierradentro, Cauca* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana].

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.

Gavilanes, J. H., & Andrade Haro, B. (2004). Introducción a la Ingeniería de Túneles. Caracterización, clasificación y análisis geomecánico de macizos rocosos. Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador.

Giraldo, A. (2020). Tecnología y conservación de las pinturas murales de los hipogeos del Alto del Aguacate en Tierradentro, Cauca, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Goodell, B., & Jellison, J. (2022). Biodegradation of Wood. *Proceedings of the Canadian Wood Preservation Association*.

Gómez, D., García, D., Lanche, J., & Cuéllar, L. (2021). Análisis microbiológico de contaminantes atmosféricos en la plaza de mercado del sur de la ciudad de Tunja, Boyacá. *Cuaderno Activa*, 25-40.

Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. (2023). Plancha 5–13 del Atlas Geológico de Colombia 2023. Escala 1:500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.

Guerrero F., H. (1990). Hipogeos Tierradentro (Loma de Segovia): Alteraciones biológicas y toma de muestras (Orden de Trabajo No. 19.000-00-11). Centro Nacional de Restauración, Laboratorio de Biología.

Guerrero, E., & Pereira, L. (2023). CHILOPODA. *Biodiversidad de Artrópodos Argentinos*, 370-385.
Hermida, G. (2001). *Impermeabilización de hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro*. UNESCO – Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Hernández de Alba, G. (1936). Una antigua tumba de Tierradentro. *El Tiempo*, p. 4.
<https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll34/id/302>

Hernández de Alba, G. (1938a). Investigaciones arqueológicas en Tierradentro: I. *Revista de las Indias*, 2(9), 23–32.

Hernández de Alba, G. (1938b). Investigaciones arqueológicas en Tierradentro: II. *Revista de las Indias*, 2(10), 91–101.

Himes, J., Arteaga, A., Vera-Pérez, L., & Enge, K. (2022). The geographic distribution of *Atractus lehmanni* (Boettger, 1898) (Serpentes, Colubridae, Dipsadinae) in Colombia, and clarification of its status and type locality in Ecuador. *Check List*, 815-820. doi:10.15560/18.4.815

Iacomino, G., Idbella, M., Staropoli, A., Nanni, B., Bertoli, T., Vinale, F., & Bonanomi, G. (2024). Exploring the Potential of Wood Vinegar: Chemical Composition and Biological Effects on Crops and Pests. *Agronomy*, 114. doi:10.3390/agronomy14010114

2013. ICOMOS. Glosario ilustrado de formas de alteración de la roca.

Ingeniería e Hidrosistemas Ltda. (s/f). Parque arqueológico de Tierradentro. Obras de drenaje. Diseño final. Instituto Colombiano de Antropología (ICAN).

Instituto Colombiano de Antropología [ICAN]. (1989). Parque Arqueológico de Tierradentro. Proyecto: Evaluación sobre el estado de los hipogeos. Colcultura.

Instituto Colombiano de Antropología (ICAN) & Instituto Colombiano de Cultura. (1995). Primer taller de conservación de los hipogeos del Parque Nacional Arqueológico de Tierradentro.

Instituto Colombiano de Antropología & Instituto Colombiano de Cultura. (1996). Plan de Conservación Parque Arqueológico de Tierradentro Cauca - Colombia. Informe Final.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2002). *Documento general del Parque Arqueológico de Tierradentro*.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH). (2014) Project Report, Fondo de Embajadores.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2015). *Documentación, conservación y monitoreo del Parque Arqueológico de Tierradentro*. ICANH.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2016). Plan de Manejo Tierradentro

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2017). *Documentación, conservación y monitoreo de parques arqueológicos: San Agustín, Alto de los Ídolos, Alto de las Piedras y Tierradentro*. ICANH.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2019). *Informe técnico general de conservación de los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro*. ICANH.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2025). *Morteros de inyección: ensayos reológicos y evaluación físico-mecánica para hipogeos del Alto de Segovia*. ICANH.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2025). *Propuesta de intervención preliminar para los hipogeos S5, S10 y S21 – Proyecto FIAN*. ICANH.

Jiménez, N. J. (2004). *Diagnóstico del Hipogeo S12 del Parque Arqueológico de Tierradentro: Como una propuesta para la documentación y diagnóstico de los hipogeos de Tierradentro* [Tesis de pregrado, Universidad Externado de Colombia].

Jiménez González, I. (2008). Efecto de los ciclos de humedad- sequedad en el deterioro de rocas ornamentales que contienen minerales de la arcilla. Tesis doctoral.

Lura., P, Di Bella, Fontana., P., Trindler., W., Münch., B, Leemann., A. (2011). An advanced experimental setup to study plastic shrinkage cracking of concrete. Firs Middle East Conference on

Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. [Conferencia]. Febrero, Dubai, EAU.

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

Medina-González, I., Castro, M., García, V., Marín, M. E., & Meehan, P. (2009). Una primera aproximación a la normativa en materia de conservación del patrimonio cultural de México. En *La conservación-restauración en el INAH: El debate teórico* (pp. 137–151). Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Melic, A. (2015). Introducción a la clase Diplopoda. Ordenes Polyxendia, Polyzoniida, Platydesmia y Siphonocryptida. *Revista IDE@-SEA*, 18. Obtenido de http://sea-entomologia.org/IDE@/revista_23.pdf

Mendoza, L. (2010). Proyecto Piloto para la evaluar el efecto de la actividad de los cienpies (Myriapoda - Diplopoda), Sobre la Conservación de los Hipogeos del Parque Arqueologico de Tierradentro Cauca-Colombia. *Informe Contrato 040 de 2010*, 27.

Moncada Calixto, J. (1992). Informe de la visita realizada al Parque Arqueológico de Tierradentro entre el 8 y 11 de octubre de 1992. Colcultura, División de Inventarios del Patrimonio Cultural.

Moncada Castro, S. C. (2025). *Diagnóstico de conservación preventiva de los hipogeos del Parque Arqueológico Nacional de Tierradentro a partir de mapas de alteración y microclimas* [Tesis de pregrado, Universidad Externado de Colombia].

Muñoz Valbuena, D., & Fonseca Cipagauta, L. (2023). *Murciélagos de los Cerros Orientales*. Bogotá: Divulgación científica Y Cultural. doi:10.18359/litgris.7035

Muñoz, M. (2024). Desarrollo de un producto herbicida natural respetuoso con el medio ambiente para el control biológico de arvenses. *Universitat Politècnica de València*. doi:10.4995/Thesis/10251/208223

Naskrecki, P. (2013). Grasshoppers and their Relatives. *Elsevier*, 247-264. doi:10.1016/B978-0-12-384719-5.00168-4

Nunura, G., & Pacheco, E. (2023). Efecto de diferentes concentraciones de ácido piroleñoso en el control de plagas en Ficus spp. en el Parque los Portales, Distrito de Santa Anita 2022. *Universidad San Ignacio de Loya, Lima Perú*, 130.

Pasquarella, C., Pitzurra, O., & Savino, A. (2000). The index of microbial air contamination. *Journal of Hospital Infection*, 241-256. doi:10.1053/jhin.2000.0820

Pérez Castellanos, N. A., & Lima Muñoz, E. (2013). Diseño y evaluación de consolidantes para el patrimonio pétreo de origen volcánico. *Intervención (México DF)*, 4(8), 5-12.

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

Prada, W. (2014). Murciélagos en ecosistemas subterráneos de Santander, Colombia. *Universidad Industrial de Santander*.

Preciado Pinzón, G. P. (1996). *Restauración arquitectónica para los hipogeos de Tierradentro* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].

Preciado, J. (1996). *Restauración arquitectónica para los hipogeos de Tierradentro, departamento del Cauca*. Instituto Colombiano de Antropología.

Puertas Orozco, O., Carvajal Escobar, Y., & Quintero Angel, M. (2011). ESTUDIO DE TENDENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LA CUENCA ALTA-MEDIA DEL RÍO CAUCA, COLOMBIA.. *DYNA*, 78(169), 112-120. Retrieved May 13, 2026, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000500013&lng=en&tlng=es.

Ramos, C. (2016). Efecto de un repelente en base a extracto de ají (*Capsicum annum*) y ajo rosado (*Allium sativum*) sobre mosca blanca de los invernaderos (*Trialeurodes vaporariorum* Hern: Aleyrodidae) en cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). *Universidad Santo Tomás. Escuela de Agronomía*.

Rivera Torres, J. C. (2012). Evaluación de la necesidad de soporte temporal para los hipogeos S8, S12, SA1, SA12 e implementación de dispositivos de apuntalamiento el hipogeo SA1.

Rodríguez González, C. V., & Mayorga Alba, C. F. (2026). *Morteros de inyección* [Informe de pruebas reológicas y físico-mecánicas del Proyecto FIAN]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Rodríguez R., D. A. (2014). *Estudios técnicos de las pinturas de los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro: Informe final*. Haerentia S.A.S. e Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Rodríguez-Ramos, N. (2006). Estudio de la densidad poblacional y uso de habitat de *Lycosa tarentula* en Chitiva Alto, Suesca, Cundinamarca.

Romero, C., Castañeda, F., & Acosta, S. (2016). Determinación de la calidad bacteriológica del aire en un laboratorio de microbiología en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. *NOVA*, 103-111.

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](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1981)9<41:DNACOP>2.0.CO;2)

Sevilla, E., & y Grupo de Investigación Arqueodiversidad. (2009). Protección y manejo del Parque Arqueológico de Tierradentro. Facultad de Artes Integradas, Universidad del Valle. FIAN, Banco de la República.

Svanh, H. (2006). Non-destructive field tests in Stone Conservation: Field and Laboratory Tests. Junta Nacional de Patrimonio de Suecia (Swedish National Heritage Bond, Riksantikvarieämbetet). Suecia. <https://pub.raa.se/visa/dokumentation/4b7adc54-7151-4e1e-a315-029f65a1dfd2>

Taylor, S. (2005). Orthoptera. En W. White, D. Culver, & T. Pipan, *Encyclopedia of Caves* (págs. 779-783). The American Midland Naturalist.

Tenjo, R., Cramer, T., & Santos, M. (2019). *Análisis geológico y geotécnico de los hipogeos del Alto de Segovia en el Parque Arqueológico de Tierradentro, Cauca, Colombia* [Informe técnico]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Tolosa-Moreno, D., Lizarazo-Forero, L., & Blanco-Valbuena, J. (2012). Concentración y Composición microbiana en el ambiente de la Biblioteca Central Jorge Palacios Preciado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja - Colombia. *Actualidades Biológicas*, 241-252.

Torres, P. (2015). Orden Blattodea. *Revista IDE@ - SEA*, 1-13. UNESCO. (1995). Nacional Archaeological Park of Tierradentro.

Universidad Externado de Colombia e Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH). (1995). Taller de Conservación de los Hipogeos de Tierradentro. *Conservación de los hipogeos de Tierradentro*.

Useche, L. A. (1989a). Informe de visita / Informe Comisión Tierradentro. Centro Nacional de Restauración.

Useche, L. Á. (1989b). Informe Comisión Tierradentro: Programa Conservación de Monumentos Arqueológicos. Centro Nacional de Restauración, Colcultura.

Useche, L. A. (1990). Informe Técnico Tierradentro. Centro Nacional de Restauración.

Useche, L. A. (1995). *Informe de análisis de laboratorio: Hipogeos de Tierradentro, Cauca* [Informe técnico]. Centro Nacional de Restauración.

Velmurugan, N., Han, S., & Lee, Y. (2009). Antifungal activity of neutralized wood vinegar with water extracts of *Pinus densiflora* and *Quercus serrata* saw dusts. *Int. J. Environ Res Spring*, 167-176.

Veloza, Alberto. (2009) Sistema de iluminación, Barandas de Protección.

Veloza, Alberto. (2011) Reporte de visita de mantenimiento. Sistema de iluminación, Barandas de Protección.

Vergara, L. (2026). *Seguimiento, aplicación de biocidas y toma de improntas sobre la biocolonización presente en los hipogeos S10, S11, S12, S21 y SA1—Tierradentro 2026* [Informe técnico del Proyecto FIAN]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Vernaza, C. (2019). *Informe final de la formulación de un mortero de inyección para la estabilización de las superficies decoradas del Hipogeo S12 de Tierradentro*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

Vernaza, C. (2021). *Protocolo para la evaluación de acabados para la Iglesia de Kuñotambo, Perú*. Documento de trabajo interno.

Vernaza, C. (2020). *Formulación de un mortero de inyección para la estabilización de las pinturas murales de los hipogeos del Parque Arqueológico de Tierradentro* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=v5pnytZUXIE>

Vernaza, C., & Castillo, L. (2021) Herramientas para la documentación gráfica de superficies patrimoniales [Conferencia] Espacio virtual de difusión de experiencias en conservación *del patrimonio cultural Conserva Conversa no 17*. Corporación Proyecto Patrimonio. <https://fb.watch/oVORZg3hzQ/>

Villalba, L. E. (2008). Proceso de Saneamiento Ambiental curativo y preventivo para los hipogeos de los Altos de Segovia, Duende y San Andrés. ICANH, Bogotá.

Villalba, L. E. (2010). Proceso de Saneamiento Ambiental curativo y preventivo para los hipogeos de los Altos de Segovia, Duende y San Andrés del parque Arqueológico de Tierradentro- Cauca. ICANH, Bogotá.

Villalba, L. E. (2012). Proceso de Saneamiento Ambiental curativo y preventivo para los hipogeos de los Altos de Segovia, Duende y San Andrés del parque Arqueológico de Tierradentro- Cauca. ICANH, Bogotá. Villalba, L. E. (2015). *Impacto de la colonización o crecimiento de los agentes microbiológicos sobre la superficie de la toba volcánica y pintura rupestre, considerando el factor lumínico y la materialidad del soporte* [Informe final de investigación, Acta de acuerdo específico n.º 2]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia y Haerentia S.A.S.

Villalba, L. E. (2017). Actividades de saneamiento en el parque arqueológico de Tierradentro. [Informe final]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), Bogotá.

Villalba, L. E. (2023). Actividades de saneamiento en el parque arqueológico de Tierradentro. [Informe final]. Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), Bogotá.

Villamizar, F. (2008). Saneamiento ambiental, Historia clínica 44 hipogeos 2008.

Vivas, H., Marcillo, S., Zambrano, D., Pincay, M., & Calderon, J. (2022). Nivel de contaminación microbiana del aire en un taller agroindustrial y sus posibles riesgos laborales. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*. doi:10.46380/rias.v5.e253

Wacker Chemie AG. (s. f.). *SILRES® BS OH 100*. Recuperado el 16 de julio de 2026, de <https://www.wacker.com/h/en-us/silanes-siloxanes-silicates/ethyl-silicates/silres-bs-oh-100/p/000008022>

Wright, V. (2015). TIERRADENTRO - ALTO DE SEGOVIA, COLOMBIA ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO DE MATERIALES COLORANTES. Instituto Francés de Estudios Andinos

Zhang, X., Tang, M., & Li, X. (2017). Toxicity Test of Wood Vinegar Mixed with Different Fungicides on *Rhizoctonia solani*. *Asian Agricultural Research*, 81-83.

Zhang, S., Xiu, W., Xi, H., Liu, L., Sun, B., Teppen, B. J., & Liu, Q. (2023). Formation of columnar/tabular and vermicular kaolinite in the crystal tonsteins within the Late Carboniferous Coal in the Datong Coalfield, Shanxi Province, North China. *Ore Geology Reviews*, 161, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105622>

ANEXOS

1. PROTOCOLO DE NOMENCLATURA DE FOTOS Y GRÁFICOS.
2. PROTOCOLO PARA EL LEVANTAMIENTO GRÁFICO Y CUANTIFICABLE DE ESTADOS DE CONSERVACIÓN MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA METIGOMAP.
3. ANALISIS GEOLÓGICOS (PETROGRAFIA Y ESPECTROSCOPÍA RAMAN)
4. FICHAS TÉCNICAS DE PRODUCTOS USADOS EN PRUEBAS E INTERVENCIÓN
5. PROTOCOLO DE SEGUIMIENTO AL CONTROL BIOLÓGICO
6. CARACTERIZACIÓN DE HIPOGEOS CON DISGREGACIÓN
7. ANALISIS MEDIOAMBIENTAL (DIC 2024 – MAR 2026) DEL HIPOGEO S12
8. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S5
9. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S9
10. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S10
11. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S11
12. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S12
13. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO S21
14. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO D4
15. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A13
16. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A14
17. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A36
18. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO A41
19. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO SA1
20. EXPEDIENTE DE DOCUMENTACIÓN HIPOGEO SA8