

**Reconstrucción Paleoambiental de la Génesis de los Yacimientos de Travertino a través del  
Estudio Sedimentológico y Geoquímico en Málaga y Concepción, Santander.**

Danna Valentina Serrano Joya, Erick Emmanuel Villamizar Sanguino

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Dr. Gatsby Emperatriz López Otálvaro

Doctor en Ciencia Geológicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mis abuelos, Marlene y Esteban, cuyo amor infinito y apoyo incondicional han sido el pilar más grande de mi vida, porque gracias a ellos soy quien soy hoy.

A mis padres, Milena y John, por su esfuerzo, confianza y cariño, que me dieron la fuerza necesaria para hacer realidad este sueño.

A mi tía, por sus palabras de aliento y el respaldo sincero en los momentos más difíciles.

A mi amado Salem, compañero fiel de mis días universitarios, a quien amé con mi vida y que ahora me acompaña desde el cielo con su luz.

A mis profesores, que creyeron en mí incluso cuando yo dudaba, y me enseñaron a reconocer y valorar mi propio camino.

A Erick, con quien compartí horas de trabajo, aprendizajes y desafíos, y cuya compañía hizo más valiosa y llevadera esta etapa.

A mis amigas Karen y Majo, con quienes conversé, con quienes compartí muchos cafés, con quienes reí, lloré y soñé. Por ser mi refugio en los días difíciles y mi alegría en los momentos de celebración.

Y, finalmente, al universo, por conspirar a mi favor, poner en mi vida a las personas correctas y recordarme que cada paso, incluso los más pequeños, tiene un propósito en el gran viaje de la existencia.

### **Dedicatoria**

A mi mamá, Anita Sanguino Landázabal, por ser mi pilar, mi apoyo incondicional, mi guía en los momentos difíciles, por brindarme siempre amor, paciencia y luz en cada instante de incertidumbre.

A mi papá, Néstor Villamizar, por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante, por enseñarme el valor del esfuerzo y la honestidad, y por enorgullecerse de cada uno de mis logros, por pequeños que fueran.

A Danna, por ser la persona que estuvo a mi lado en los momentos más difíciles, por su paciencia, su dedicación y compromiso, y por sus ganas incansables de dar siempre lo mejor.

Gracias por ser un apoyo constante y un motor de motivación en este proceso.

A mi tío Eivar, a Sandra y a Adrian Samuel, por brindarme un hogar y una familia en todo el sentido de la palabra, por acompañarme en cada etapa, escucharme con atención y regalarme consejos valiosos que me ayudaron a seguir firme en el camino.

A mi fiel compañero Tyrion, mi mascota, cuya compañía se convirtió en mi mayor estabilidad emocional. Gracias por llenar mis días de alegría, tranquilidad y cariño incondicional.

A cada uno de ustedes, que con su amor, paciencia y apoyo me dieron la fuerza necesaria para culminar esta etapa, les dedico con gratitud este logro que no hubiera sido posible sin ustedes.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Proyecto 3887 del Semillero de Paleoceanografía y Paleoclimatología de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el apoyo en la financiación de algunas de las salidas de campo. Extendemos nuestro agradecimiento al Laboratorio GIGBA del Parque Tecnológico Guatiguará (UIS) dirigido por el Prof. Carlos García por su apoyo en el desarrollo de los análisis petrográficos de microscopía óptica, y a la Escuela de Geología de la UIS por su financiación en el envío de muestras a Ecuador y por el préstamo de los estereomicroscopios del Laboratorio de Petrografía Avanzada para el análisis macroscópico de las muestras.

Asimismo, los autores expresan su agradecimiento al laboratorio CENCINAT de la Universidad de las Fuerzas Armadas (Ecuador) por la realización de los análisis SEM y EDS, y al laboratorio INCLAY (Bogotá, Colombia) por el procesamiento y análisis de las muestras mediante DRX, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	12
1.1.Objetivo General.....	12
1.2.Objetivos Específicos.....	12
2. Marco geológico .....	12
2.1. Localización.....	12
3. Metodología .....	14
4. Resultados .....	16
4.1.Características del depósito y cartografía geológica.....	16
4.2.Petrografía y caracterización de las macrofacies y microfacies. ....	22
4.3.Microscopía Electrónica De Barrido (SEM).....	26
4.4.Difracción de rayos X (DRX).....	28
4.5.Espectroscopia De Dispersión De Energía (EDS).....	29
5.Discusión.....	32
5.1 Interpretación De Las Litofacies Y Biofacies.....	32
5.1.1 Travertino Cristalino (TRV2) .....	32
5.1.1.1 Travertino Cristalino (Deg-01). ....	32
5.1.1.2 Balsas De Travertino (Deg-02).....	32
5.1.1.3 Pisoides/Granos Recubiertos (Deg-03).....	33
5.1.1.4 Travertino Bandeado (Deg-04).....	33
5.1.1.5 Travertino Estromatolítico (Deg-05) .....	34
5.1.1.6 Travertino Masivo (Deg-06).....	35
5.1.1.7 Travertino Brechificado (Deg-07) .....	35
5.1.1.8 Espeleotemas (Deg-08).....	35
5.1.1.9 Corteza/Costra De Recubrimiento (Deg-10) .....	36
5.1.2.1 Travertino Poroso / Toba Calcárea (Deg-09- Deg-11).....	36
5.2Condiciones Paleoambientales De Formación.....	37
5.3 Procesos Diageneticos .....	39
5.4 Modelo Paleoambiental .....	40

Conclusiones .....44  
Referencias Bibliográficas ..... 45

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características petrográficas y macroscópicas de los litotipos de travertino.....	25
Tabla 2. Composición mineralógica determinada con DRX, porcentaje en peso. ....	29
Tabla 3. Composición elemental normalizada en porcentaje en peso (wt. %). ....	30
Tabla 4. Composición elemental normalizada en porcentaje atómico (at. %). ....	31

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa de Localización Regional. ....	13
Figura 2. Cartografía de la zona de estudio a escala 1:15000.....	16
Figura 3. Morfología del depósito de travertino. ....	17
Figura 4. Columna estratigráfica de la zona de estudio. ....	18
Figura 5. Rasgos asociados a los depósitos de travertino. ....	19
Figura 6. Geoformas y rasgos asociados a los depósitos de travertino.....	21
Figura 7. Muestras representativas de travertino del área de estudio. ....	23
Figura 8. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) a 50 $\mu$ m. ....	26
Figura 9. Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) a 50 $\mu$ m. ....	27
Figura 10. Modelo propuesto para la formación del Travertino. ....	43

### Resumen

**Título:** Reconstrucción Paleoambiental de la Génesis de los Yacimientos de Travertino a través del Estudio Sedimentológico y Geoquímico en Málaga y Concepción, Santander.\*

**Autor:** Danna Valentina Serrano Joya, Erick Emmanuel Villamizar Sanguino\*\*

**Palabras Clave:** Toba calcárea; Carbonatos continentales; Procesos hidrotermales; Mineralogía

Este estudio reconstruye la génesis y la evolución paleoambiental de los depósitos de estos depósitos de travertino, a partir del análisis petrográfico, microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS), y difracción de rayos X (DRX) aplicados a 11 muestras de travertino. Los resultados indican que la formación del travertino estuvo principalmente controlada por la actividad tectónica de la Falla del Río Servitá y por la morfología local, que favorecieron el ascenso de fluidos hidrotermales ricos en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la sobresaturación de iones de calcio (Ca<sup>2+</sup>) derivados de la lixiviación de la Formación Tibú–Mercedes. Y a partir de la cual se formaron dos litotipos principales: travertino cristalino compacto, asociado a condiciones hidrotermales estables y desgasificación rápida; y travertino poroso (toba calcárea), vinculado a ambientes superficiales de baja energía con fuerte influencia biológica. La mineralogía está dominada por calcita (>99%) con minerales detríticos subordinados, reflejando alternancias entre actividad química y aporte terrígeno. Estos resultados permiten proponer un modelo evolutivo en el que la interacción entre tectónica, hidrología, biología y clima controla las fluctuaciones en la precipitación carbonatada y la dinámica geomorfológica del sistema travertínico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Gatsby Emperatriz López Otálvaro, Doctor en Ciencia Geológicas

**Abstract**

**Title:** Paleoenvironmental Reconstruction of the Genesis of Travertine Deposits through Sedimentological and Geochemical Analysis in Málaga and Concepción, Santander\*

**Author:** Danna Valentina Serrano Joya, Erick Emmanuel Villamizar Sanguino \*\*

**Key Words:** Calcareous tufa; Continental carbonates; Hydrothermal processes; Mineralogy

This study reconstructs the genesis and paleoenvironmental evolution of travertine deposits located between Málaga and Concepción (Santander, Colombia), based on the petrographic, scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD) analysis of 11 travertine samples. The results show that travertine formation was mainly controlled by the tectonic activity of the Servitá River Fault and local morphology, which enabled the ascent of CO<sub>2</sub>-rich hydrothermal fluids and the oversaturation of Ca<sup>2+</sup> from the leaching of the Tibú–Mercedes Formation. Two main lithotypes were identified: compact crystalline travertine, formed under stable hydrothermal conditions with rapid degassing, and porous travertine (tufa), deposited in low-energy surface environments with strong biological influence. Mineralogical analyses, dominated by calcite (>99%) with minor detrital minerals, reflect alternations between chemical stability and terrigenous input. These findings support an evolutionary model in which tectonics, hydrology, biology, and climate jointly controlled variations in carbonate precipitation and the geomorphological dynamics of the travertine system.

---

\* Degree Work

\*\*Physicochemical Engineering College. Geology Department. Director: PhD. Gatsby Emperatriz López Otálvaro.

## Introducción

El travertino es una roca carbonatada continental formada por la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como resultado de la desgasificación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) desde soluciones hidrotermales sobresaturadas (Pentecost, 2005). Su génesis implica la interacción de factores fisicoquímicos (pH, temperatura, concentración de iones), biológicos (actividad microbiana, cianobacterias, briofitas) e hidrológicos (tasa de descarga, flujo del agua), y suele estar asociada a zonas tectónicamente activas donde las fallas facilitan el ascenso de fluidos (Pentecost, 2005; Capezzuoli et al., 2014; Brogi et al., 2016; Aguillar et al., 2024). Estos cuerpos son altamente sensibles a variaciones hidrológicas, climáticas y tectónicas, lo que los convierte en registros precisos de las condiciones ambientales de su formación. En este sentido, los travertinos se consideran archivos geológicos clave para la reconstrucción de paleoambientes y paleoclimas, así como para el análisis de procesos neotectónicos y de evolución del paisaje (Martínez Cortizas, 2000; Wang et al., 2022).

En la Cordillera Oriental, específicamente en Santander, se han documentado depósitos de travertino en el área de Málaga y Concepción, cuya génesis ha sido vinculada a la actividad tectónica e hidrológica de la quebrada Ojo de Agua (Moros & Villarreal Acevedo, 2022). Así, los afloramientos de travertino en esta región, aun escasamente estudiados en cuanto a su formación, morfología, distribución y relación con estructuras activas y aguas superficiales, constituyen un escenario excepcional para futuras investigaciones. Su potencial como archivos paleoambientales los convierte en piezas clave para comprender la evolución geodinámica de la Cordillera Oriental. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo reconstruir las condiciones paleoambientales asociadas a la formación de los travertinos de Santander, a partir de su caracterización geológica, petrográfica y mediante técnicas de análisis instrumental.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Reconstruir paleoambientalmente la génesis de los depósitos de travertino de Málaga y Concepción, Santander, a través de estudios estratigráficos de las litofacies y biofacies carbonatadas, mineralogía, geoquímica, diagénesis y un modelo depositacional.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar los morfotipos depositacionales y la geometría de las distintas litofacies y biofacies a través de la macro y micro fabrica del travertino.

Analizar los procesos sedimentarios que han favorecido la formación del travertino.

Elaborar un modelo de distribución de facies de los depósitos de travertino que incluya las condiciones ambientales durante su formación.

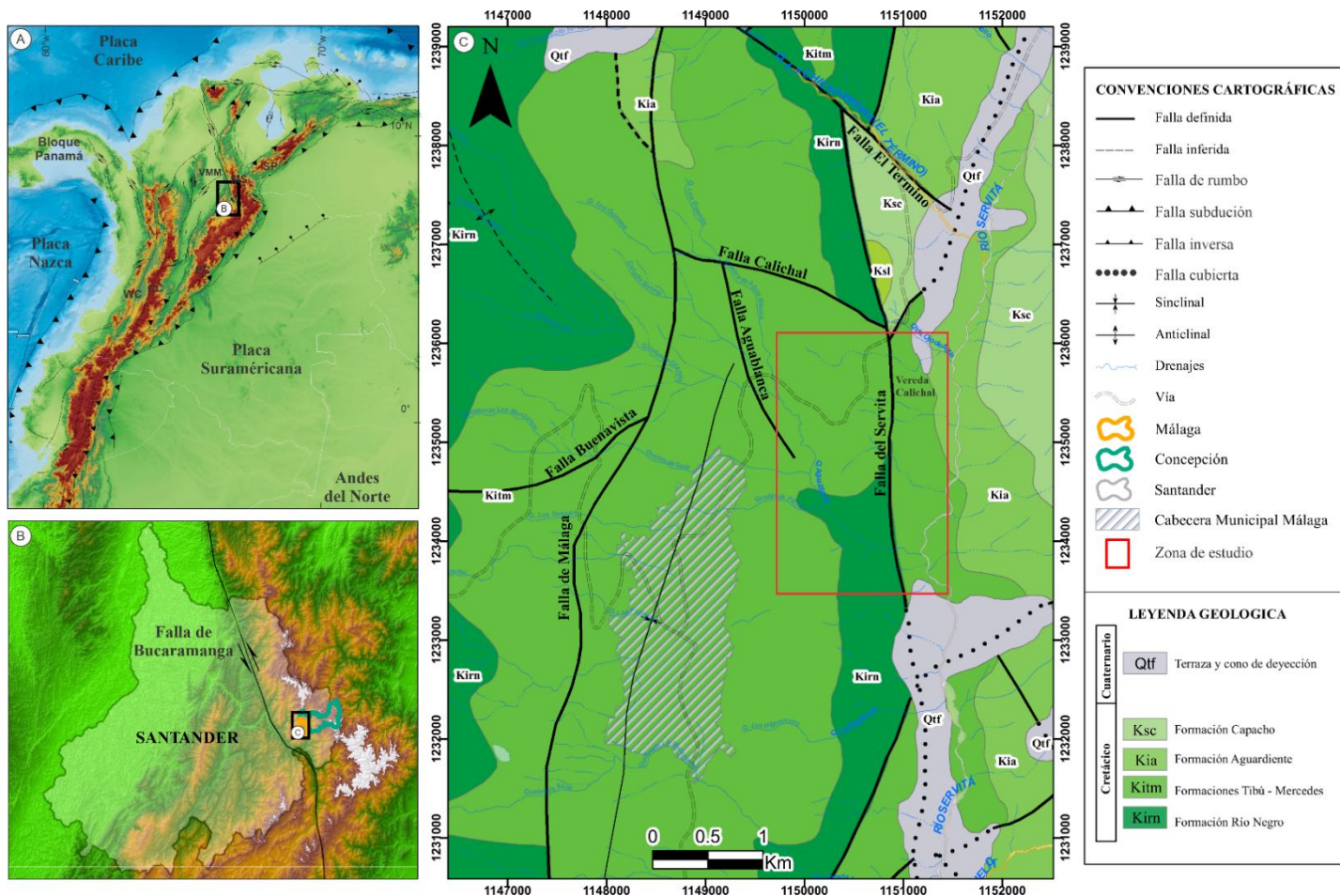
## **2. Marco Geológico**

### **2.1 Localización**

El área de estudio se localiza en el noreste de Colombia, en el departamento de Santander (Figura 1), específicamente en el extremo sur del Macizo de Santander, hacia su borde oriental, en la zona sur del páramo del Almorzadero. Esta zona se extiende desde el noreste del municipio de Málaga hasta el suroeste del municipio de Concepción, y se desarrolla sobre las secuencias sedimentarias de la cuenca de la Cordillera Oriental (Lozano & Zamora, 2014).

**Figura 1**

*Mapa de Localización Regional.*



*Nota.* A) Mapa de Colombia con la localización del área de estudio. B) Mapa del departamento de Santander con detalle de la zona de Málaga–Concepción. C) Mapa regional con el contexto geológico principal, modificado de la plancha 136 del SGC.

Litológicamente está conformada principalmente por rocas sedimentarias del Cretácico, entre las que se destacan la Formación Tibú–Mercedes (Kitm), de ambiente marino, compuesta por intercalaciones de calizas grises fosilíferas, lutitas y areniscas de grano fino a medio (Vargas et al., 1976). Suprayaciéndola, se encuentra la Formación Aguardiente (Kia), caracterizada por areniscas cuarzosas gruesas con glauconita y fosfatos, alternadas con lutitas y calizas ricas en

materia orgánica, propia de un ambiente transicional (Yurewicz & Hernández, 1998). También afloran depósitos cuaternarios (Q<sub>tf</sub>) representados por fragmentos angulosos de roca en matriz arenosa y por niveles gravosos, arenosos y fangosos (Vargas et al., 1976) (Figura 1).

La Falla del Río Servitá, una estructura de orientación NNE–SSW, con cinemática inversa y vergencia hacia el este, controla tectónicamente la zona de estudio (Figura 1). Esta falla ha sido interpretada como una estructura profunda de alto ángulo, originada a partir de una flor positiva de tipo sinistral, asociada a la Falla de Rumbo de Bucaramanga (Forero-Ortega et al., 2020). A nivel local, la Falla del Río Servitá establece contactos tectónicos entre la Formación Tibú–Mercedes y la Formación Aguardiente, controlando la disposición y distribución de las unidades litológicas en el área.

### **3. Metodología**

La cartografía geológica del área de estudio se realizó a escala 1:15.000, con base en un análisis geológico y geomorfológico apoyado en la recolección sistemática de datos en aproximadamente 20 puntos de control dentro del área, considerando la distribución espacial de los afloramientos, la estratigrafía, la variabilidad litológica y el control estructural (Figura 2).

Durante el trabajo de campo se recolectaron 11 muestras, seleccionadas en zonas con buena exposición y con un adecuado estado de preservación, entendido como afloramientos poco alterados y con mínima meteorización superficial, lo que permitió una caracterización más confiable de las facies litológicas y texturales observadas en los depósitos de travertino, e interpretar su dinámica deposicional.

Las muestras fueron caracterizadas macroscópicamente mediante un estereomicroscopio Leica EZ4 de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS), con el fin

de describir con mayor detalle las mesofábricas presentes y así reconocer los cambios en la fábrica del travertino en diferentes puntos de la zona de estudio. Posteriormente, se seleccionaron seis muestras de travertino basadas en la compactación y cristalinidad para la elaboración de secciones delgadas ( $\sim 30 \mu\text{m}$ ), que fueron analizadas mediante petrografía con un microscopio de luz polarizada Leica DM750, en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Para complementar el análisis petrográfico, se obtuvieron imágenes de 10 muestras de travertino mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando el equipo Tescan – MIRA 3 del laboratorio CENCINAT de la Universidad de las Fuerzas Armadas en Ecuador. Esta técnica permitió observar con mayor resolución la microfábrica de los depósitos, incluyendo texturas, estructuras y minerales. Adicionalmente, se empleó espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) acoplada al SEM, con el fin de identificar y caracterizar cualitativamente los elementos presentes en las fases minerales observadas.

Finalmente, se realizaron tres análisis de Difracción de Rayos X (DRX) en el laboratorio INCLAY (Bogotá), utilizando un equipo Miniflex de Rigaku. Se analizaron las muestras GDE-4 y GDE-6: en GDE-4 se efectuaron dos análisis independientes con el fin de evaluar posibles variaciones composicionales entre bandas de distinta coloración, mientras que en GDE-6 se buscó identificar el aporte de minerales detríticos y arcillosos a la formación del travertino clástico. Las dos muestras fueron pulverizadas previamente en un mortero de ágata RETSCH RM100 de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, hasta obtener un tamaño de partícula  $< 75 \mu\text{m}$ , garantizando homogeneidad granulométrica y ausencia de contaminantes antes del análisis.

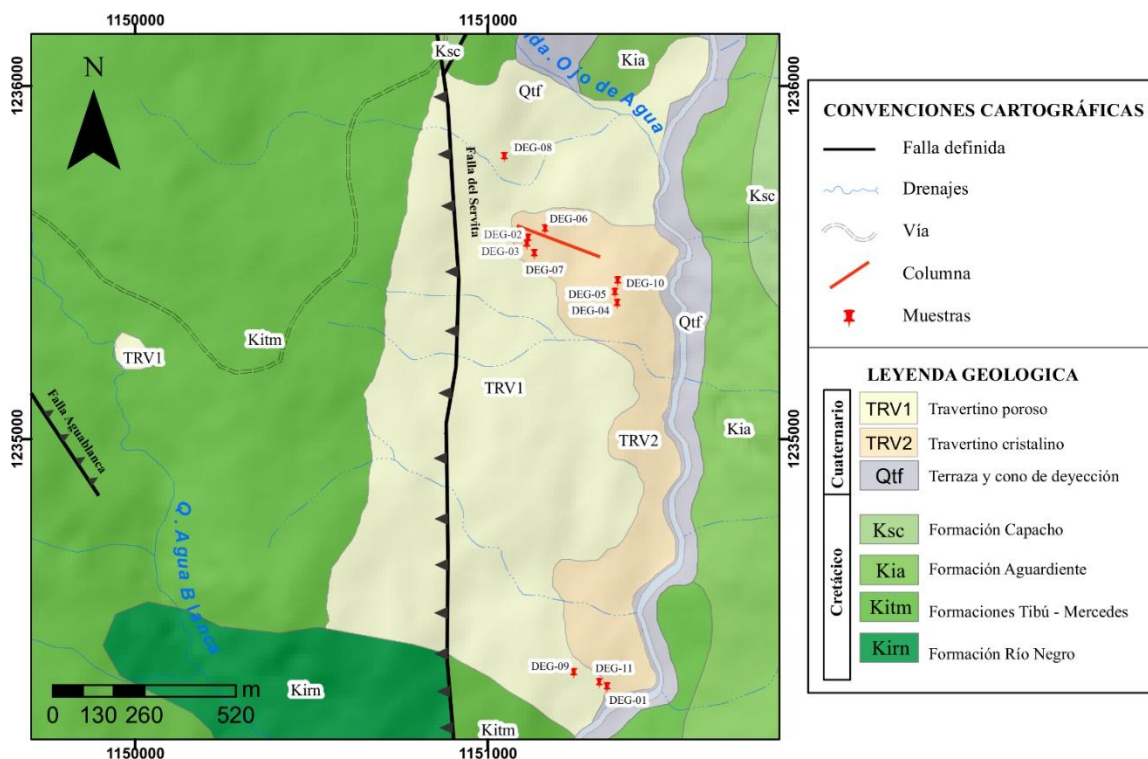
## 4. Resultados

### 4.1 Características del depósito y cartografía geológica

A partir de la cartografía realizada a escala 1:15.000, se reconoció que el depósito de travertino presenta una disposición elongada en dirección NE–SW, paralela a la traza de la Falla del Río Servitá (Figura 2). Se determinó que el depósito ocupa un área aproximada de 1,42 km<sup>2</sup> dentro de la zona de estudio, extendiéndose en dirección W–E a favor de la pendiente, a lo largo de aproximadamente 850 metros, desde la vía Málaga–Concepción hasta los depósitos cuaternarios del río Servitá, atravesando la zona actualmente en explotación.

**Figura 2**

*Cartografía de la zona de estudio a escala 1:15000.*

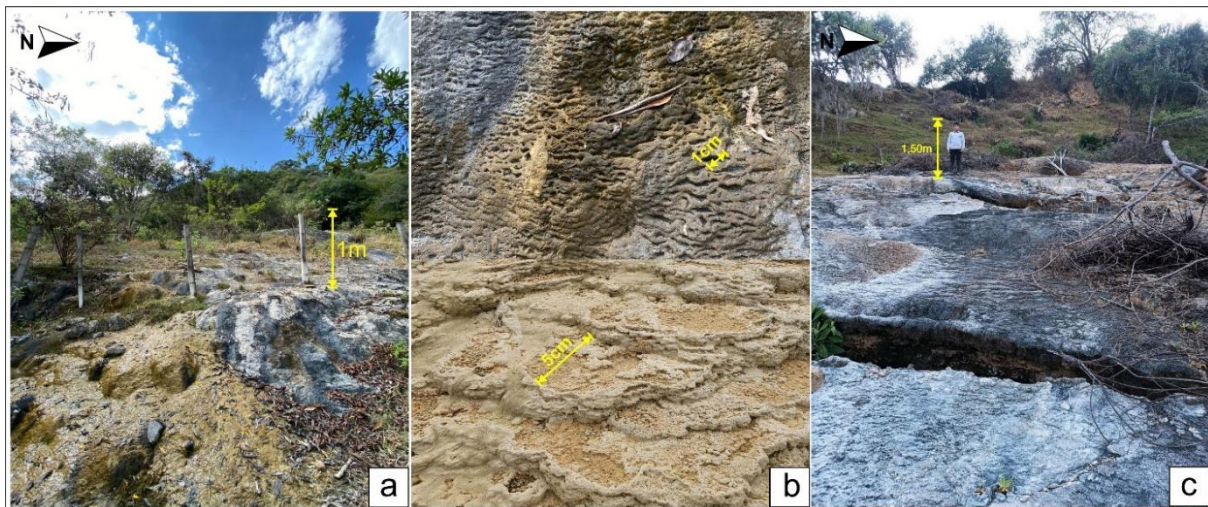


*Nota.* Mapa geológico a escala 1:15.000 en el área de Málaga–Concepción, mostrando las unidades litológicas, estructuras principales y la distribución de los depósitos de travertino.

La morfología principal del depósito corresponde a formas onduladas con pendiente moderada ( $\sim 30^\circ$ ), en dirección W-E, conformando estructuras tipo minirrepresa o minidams (Figura 3.a), con una distancia entre represas (Inter-Dam Distance, IDD) que oscila entre 1 y 3 cm (Figura 3.b). Estas formas presentan variaciones cromáticas, con tonos grises GLEY 2 4/10B y 7/10B (Munsell, 2009) en sectores más secos y aparentemente inactivos fluvialmente, y colores pardos 2.5Y 8/8 (Munsell, 2009) en áreas más húmedas con flujo activo. Esta morfología muestra variaciones en el IDD a lo largo del depósito, asociadas principalmente a los cambios en la pendiente del terreno. Hacia el suroeste, donde las pendientes son más suaves, se observan estructuras tipo represa más espaciadas y con mayores valores de IDD, lo que sugiere que una menor pendiente favorece el desarrollo de formas onduladas más amplias (Figura 3.c).

**Figura 3**

*Morfología del depósito de travertino.*



*Nota.* (a) minirrepresas; (b) variaciones en la distancia entre represas (IDD); (c) minirrepresas con evidencias de karstificación.

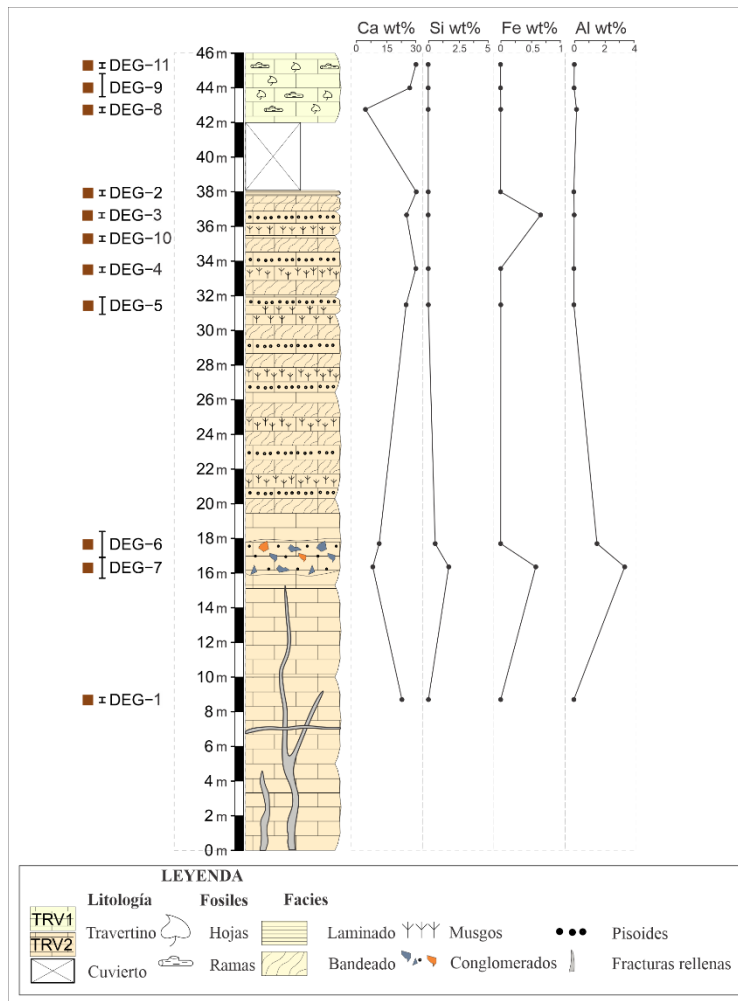
El reconocimiento espacial permitió diferenciar litológica y espacialmente el depósito, el cual se identificó dos tipos de travertino: poroso (TRV1) y cristalino (TRV2), delimitados en la

cartografía (Figura 2), y definidos en este estudio con base en sus características texturales y en las geoformas asociadas.

Se elaboró una columna estratigráfica de 46 metros de espesor (Figura 4) a partir de la integración de la información obtenida en campo, sintetizando las características de las dos unidades principales que conforman el depósito. El cuerpo TRV2, reconocido como la unidad más antigua, se caracteriza por una textura cristalina compacta, de mayor cohesión y dureza, y se encuentra principalmente en el contacto con la Formación Tibú-Mercedes (Figura 5a) y en la zona de explotación donde se observa la exposición más completa de ambas unidades (Figura 5b).

**Figura 4**

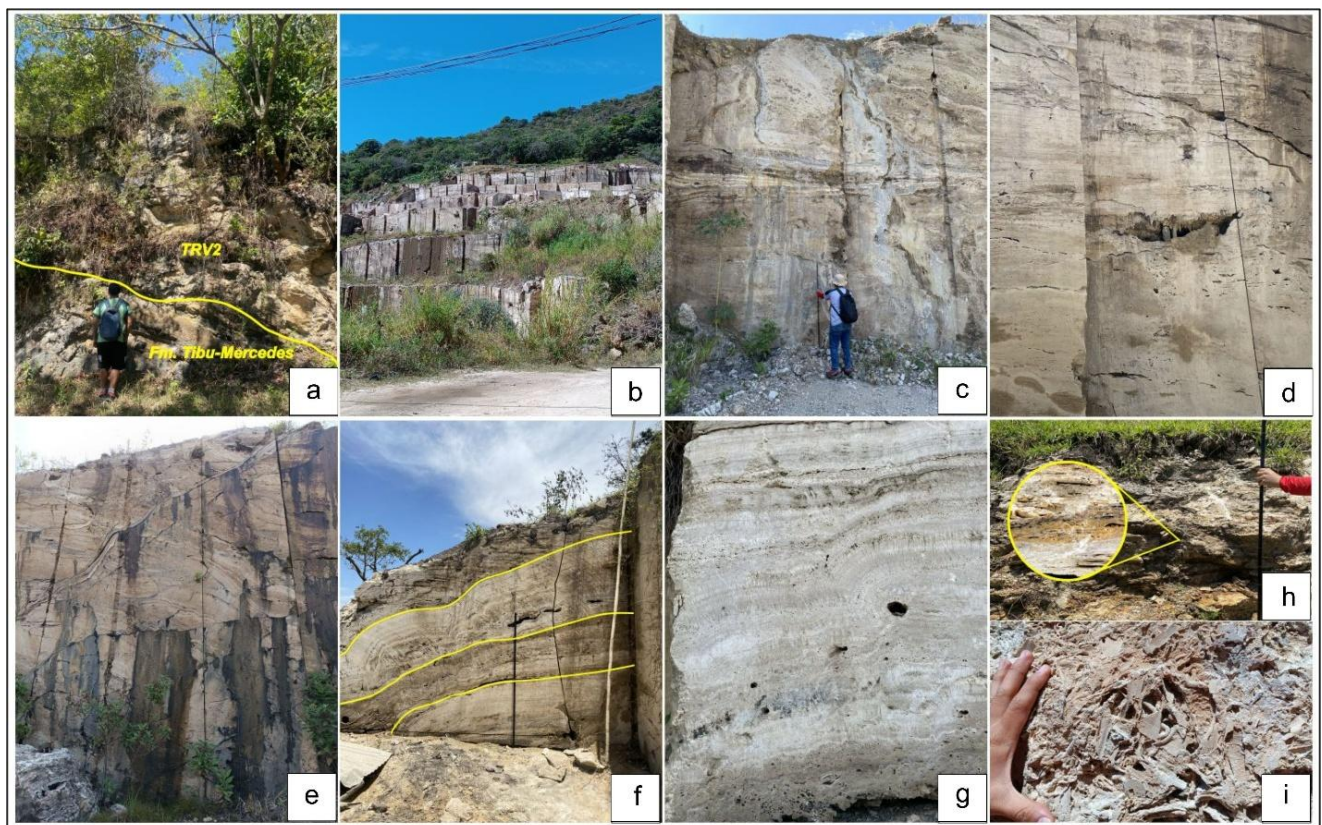
*Columna estratigráfica de la zona de estudio.*



En la base del depósito se reconocieron fracturas rellenas con venas bandeadas de  $\text{CaCO}_3$ , predominantemente de orientación vertical o ascendente, aunque también se observaron algunas horizontales. Estas venas presentan espesores variables, entre 10 cm y 1 m (Figura 5.c), y muestran un bandeamiento rítmico de carbonato de calcio. Los niveles inferiores evidencian un marcado desarrollo de procesos postdeposicionales, principalmente karstificación (Figura 5.d) y fracturamiento (Figura 5.e), lo que sugiere una intensa reactivación hidráulica y disolución diferencial durante etapas posteriores a la acumulación.

### Figura 5

*Rasgos asociados a los depósitos de travertino.*



*Nota.* (a) contacto erosivo entre TRV2 y la Fm.Tibu-Mercedes ; (b) cantera de travertino; (c) venas de carbonato de calcio, indicativas del paso de fluidos hidrotermales a lo largo de las fracturas; (d) evidencias de karstificación; (e) fracturamiento con circulación de agua a través de las fisuras; (f)

variaciones en la precipitación del travertino; (g) intercalaciones de arbustos (shrubs) y pisoides; (h) balsas de travertino, muestra DEG-02; (i) toba calcárea (TRV1) con moldes de hojas y ramas.

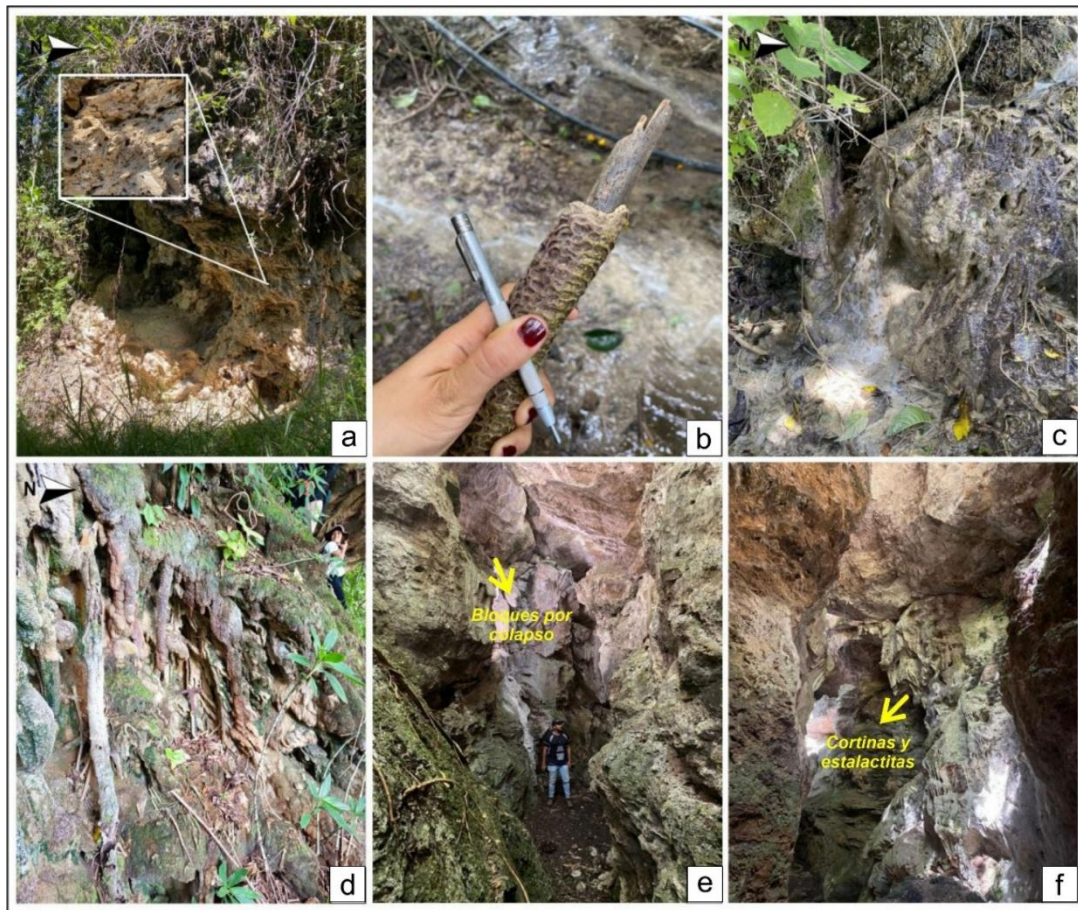
En los niveles suprayacentes se observa una disminución progresiva del fracturamiento y de la frecuencia de venas, dando lugar al desarrollo de niveles cristalinos ondulados (Figura 5.f). Estos niveles presentan un bandeamiento claramente definido por la alternancia de tonalidades grisáceas (GLEY 2 7/10G), pardas (10YR 7/6) y blancas (10YR 8/1). Dentro de esta sucesión se reconocen intercalaciones de distintos litotipos, incluyendo travertino granular cristalino, capas con pisoides y niveles blanquecinos con morfologías arbustivas constituidas íntegramente por  $\text{CaCO}_3$  (Figura 5.g). En la parte superior del depósito se reconoce un litotipo cristalino conformado por balsas horizontales de travertino dispuestas de manera superpuesta (Figura 5.h).

Sobre este nivel se encuentra la unidad TRV1, caracterizada por su textura predominantemente porosa, de menor densidad y asociada a tobas calcáreas. Esta litofacies, distribuida de manera dominante en el área de estudio, presenta además moldes de hojas y restos vegetales que evidencian la participación de materia orgánica en su formación (Figura 5.i)

La unidad TRV1 evidencia una estrecha asociación con la vegetación, especialmente hojas, ramas, musgos y raíces, la cual desempeñó un papel determinante en el desarrollo de las formas depositacionales (Figura 6.a). Aunque en la mayoría de los sectores solo se preservan moldes producto de la descomposición del material orgánico, en algunas áreas aún se observan restos vegetales cubiertos por carbonato de calcio o "caliche", especialmente en zonas de baja pendiente con pequeños arroyos (Figura 6.b)

**Figura 6**

*Geoformas y rasgos asociados a los depósitos de travertino*



*Nota.* (a) tobas calcáreas con restos vegetales; (b) Ramas conservadas cubiertas de Travertino; (c) depósito activo formando cascadas a partir de raíces; (d) cascadas con estalactitas y tubos de travertino; (e) cuevas con colapso gravitacional; (f) estalactitas y cortinas.

Dentro de TRV1 se desarrollan geoformas tipo cascada, cuyas dimensiones varían según la topografía. Estas estructuras presentan alturas promedio de 1 a 3 m y anchos de hasta 5 m, determinados por la disponibilidad de espacio para el flujo en el momento de la precipitación (Figura 6.c). Las cascadas se distinguen por sus formas lobuladas e irregulares, que reflejan la acumulación discontinua de carbonato de calcio durante el flujo del agua. Estas morfologías

culminan en la formación de tubos de travertino y estalactitas, producto del goteo persistente de aguas sobresaturadas en carbonato de calcio (Figura 6.d). El travertino asociado a estas condiciones es masivo, de textura y estructura irregular, poroso y sin laminación.

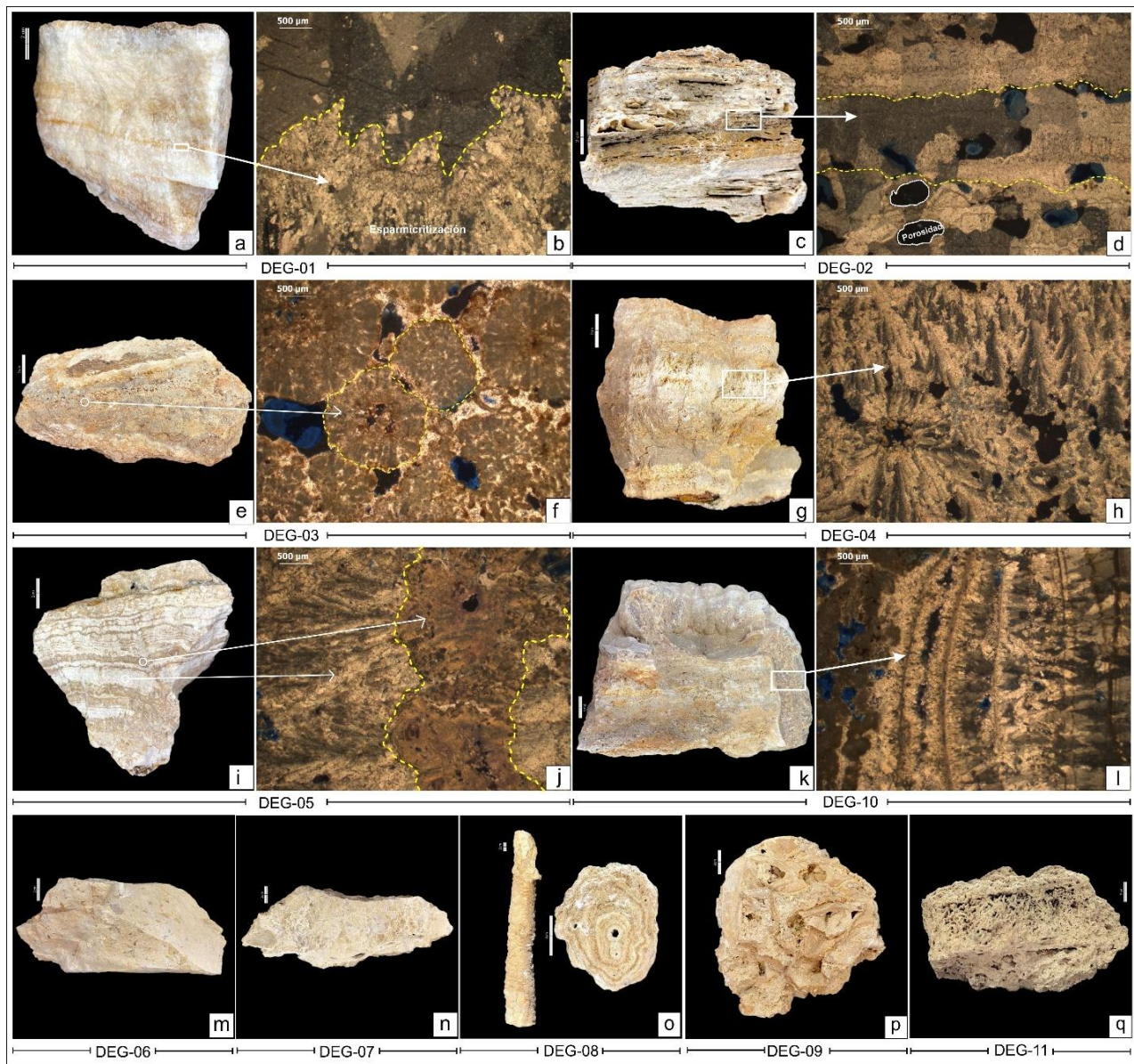
Finalmente, se identificaron evidencias de procesos postdeposicionales adicionales, principalmente karstificación, que generaron cavidades, cuevas y colapsos gravitacionales. Estos procesos dieron origen a bloques de más de 10 m de longitud, actualmente estabilizados (Figura 6.e), dentro de los cuales se reconocieron geoformas tipo cortina y estalactitas (Figura 6.f).

#### **4.2 Petrografía y caracterización de las macrofacies y microfacies.**

El análisis macroscópico de las muestras (Figura 7) permitió documentar las principales características del depósito, entre ellas la variabilidad cromática, con tonalidades grises (GLEY 2 7/10G), pardas (10YR 7/6) y blancas (10YR 8/1), de acuerdo con la tabla de colores de Munsell (2009). También se reconocieron diferencias en la morfología y en la disposición de las capas, así como contrastes en la porosidad entre las dos unidades. En TRV2, caracterizada por un predominio de texturas cristalinas compactas, la porosidad es baja (10–15%), principalmente de tipo intergranular. En contraste, TRV1 presentó una porosidad considerablemente mayor (40–60%), asociada tanto a la menor densidad de la roca como a la preservación de moldes derivados de la descomposición de materia orgánica, que generan porosidad móldica. La tabla 1 resume en detalle las características diagnósticas de los distintos litotipos identificados.

**Figura 7**

*Muestras representativas de travertino del área de estudio.*



*Nota.* (a, c, e, i, k, m, n, o, p, q) Fotografías macroscópicas de las muestras seleccionadas (DEG-01 a DEG-11). (b, d, f, h, j, l) Imágenes en lámina delgada en luz transmitida (PPX). (a–b) travertino cristalino con estructuras columnares y bandas micríticas; (c–d) balsas laminadas con micrita y cristales gruesos de calcita; (e–f) pisoides con laminación alternante y matriz micrítica; (g–h) travertino bandeado con laminación criptocíclica y fábricas arbustivas; (9–10) travertino

estromatolítico con alternancia de shrebs y cianobacterias; (k-l) corteza con cristales columnares de calcita; (m) travertino masivo con clastos retrabajados; (n) travertino brechado con clastos angulosos en matriz arcillosa; (o) estalactitas con bandas concéntricas; (p) travertino con moldes vegetales; (q) travertino con briofitas formando estructuras porosas ramificadas.

Se identificaron, además, facies con estructuras columnares de calcita (e.g., DEG-01, DEG-10), unidades laminadas con pisoides, shrebs y bandas estromatolíticas (DEG-02 a DEG-05), así como depósitos masivos y brechados con clastos retrabajados o angulosos en matriz arcillosa (DEG-06–07). Asimismo, se reconocieron facies espeleotemáticas, como estalactitas (DEG-08), y litotipos con restos vegetales y briofitas (DEG-09, DEG-11).

A nivel microscópico, las secciones delgadas revelaron hábitos de calcita columnar, granular y masiva, con dominios homogéneos o alternantes dominados por micrita, frecuentemente modificada por procesos de neomorfismo agradacional y esparmicritización. Estos rasgos texturales complementan la información macroscópica y constituyen criterios diagnósticos para discriminar entre facies compactas de baja porosidad y facies porosas con mayor influencia biogénica.

En conjunto, las facies documentadas evidencian la coexistencia de distintos regímenes de formación, que abarcan desde la actividad microbiana responsable de la laminación hasta la precipitación inorgánica masiva de carbonato y los procesos de retrabajo que modificaron los depósitos originales. Esta heterogeneidad constituye un elemento clave para interpretar la evolución del sistema y servirá de base para la discusión paleoambiental.

Tabla 1.

*Características petrográficas y macroscópicas de los litotipos de travertino.*

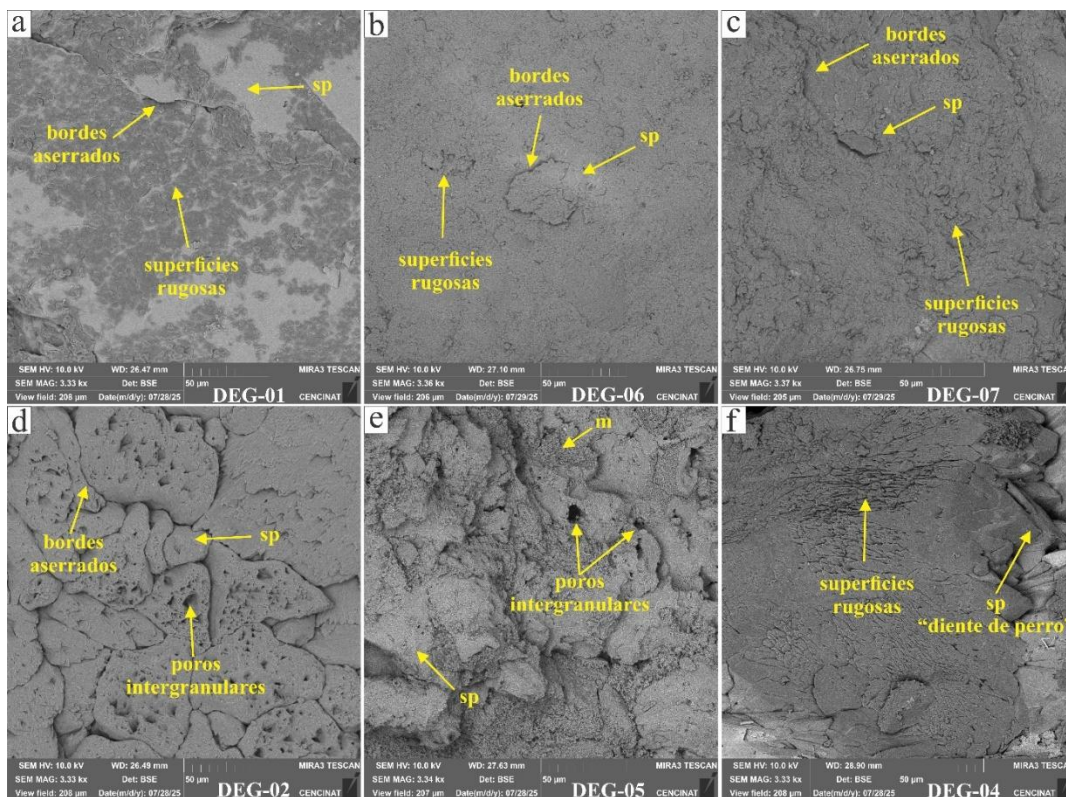
LITOTIPOS	COD	FACIE	ESTRUCTURA	TEXTURA	DESCRIPCIÓN	FIG MACRO	FIG MICRO
<b>Travertino Cristalino</b>	DEG-01	Travertino cristalino	Laminada Estructuras columnares de calcita	Cristales de calcita las bandas claras y gruesas con fracturamiento Textura micrítica en las bandas más oscuras.	Travertino de composición completamente cristalina, constituido por calcita densa dispuesta en bandas de entre 2 mm y 2 cm de espesor, con una variación cromática desde pardas (10YR 7/6) y blancas (10YR 8/1) según Munsell (2009), siendo las bandas más delgadas las oscuras y las más gruesas las claras. Las bandas claras presentan estructuras columnares formadas por cristales alargados de calcita y evidencias de fracturamiento, mientras que las bandas oscuras muestran una textura micrítica observada en micro.	Fig. 6.a	Fig. 6. b
	DEG-02	Balsas de travertino ( <i>coate</i> )	Laminada formando balsas	Micrita cristalina en forma de pluma y cristales gruesos de Calcita	Travertino cristalino dispuesto en capas independientes de 1 a 5 mm de espesor, con porosidad intercristalina baja y porosidad móldica entre capas (1–3 mm). Presenta variación cromática de pardo oscuro a gris y blanco, y neomorfismo agradacional en cristales gruesos de calcita.	Fig. 6.c	Fig. 6. d
	DEG-03	Pisoides ( <i>Coated grains</i> )	Laminación alternante entre capas de travertino y niveles de pisoides	Textura micrítica general, Neomorfismo agradacional en capas cristalinas y matriz micrítica	Presenta laminación alternante entre travertino grisáceo y niveles de pisoides (1–2 cm), los cuales exhiben recubrimientos concéntrico-radiales (1–5 mm) con pardas (10YR 7/6) y blancas (10YR 8/1) según Munsell (2009). En sección delgada, se observa textura micrítica y neomorfismo agradacional en capas y matriz.	Fig. 6. e	Fig. 6. f
	DEG-04	Travertino bandeado	Laminación ciclotémica con capas cristalinas, <i>shrubs</i> y pisoides (1–3 mm).	Textura homogénea en capas cristalinas; micrita predominante en arbustos y pisoides.	Conformada por travertino cristalino masivo grisáceo con textura homogénea y porosidad intercristalina, niveles arcillosos con <i>shrubs</i> blancos y porosidad móldica, y capas delgadas con pisoides (1–5 mm); todos con micrita dominante en sección delgada.	Fig. 6. g	Fig. 6.h
	DEG-05	Travertino estromatolítico	Laminación ondulada y alternante entre <i>shrubs</i> y cianobacterias.	Textura micrítica	Facies con laminación ondulada y alternante, compuesta por capas blancas de aspecto arcilloso con estructuras tipo arbusto (micríticas en sección delgada), intercaladas con capas pardo oscuras de travertino cristalino con estructuras estromatolíticas bien desarrolladas.	Fig. 6. i	Fig. 6. j
	DEG-10	Corteza	Banda de Costra de recubrimiento	Esparita, Cristales columnares con hábito botrioidal	Travertino cristalino que forma una costra de recubrimiento con hábito botrioidal. En sección delgada, presenta cristales columnares gruesos de calcita que aumentan progresivamente de tamaño hacia las capas externas, evidenciando un neomorfismo agradacional.	Fig. 6.k	Fig. 6. l
	DEG-06	Travertino masivo	Estructura masiva	Travertino micrítico con clastos subangulosos de travertino y caliza redondeada.	Travertino clásico cristalino masivo de tonalidad parda, con clastos subangulosos de 2 mm a 1 cm, formados por fragmentos retrabajados del mismo travertino y caliza redondeada.	Fig. 6.m	-
	DEG-07	Travertino brechificado	Brechada	Matriz arcillosa con clastos angulosos de travertino cristalino	Travertino brechado compuesto por una matriz arcillosa que aloja clastos angulosos de travertino cristalino, con tamaños entre 0,5 y 2 cm.	Fig. 6. n	-
	DEG-08	Espeleotemas	Forma alargada y colgante, con morfología cónica o tubular invertida	Calcita cristalina con laminaciones onduladas concéntricas.	Depósito colgante de morfología cónica a tubular invertida, formado por calcita cristalina de colores blanco y pardo, con laminaciones concéntricas onduladas de ~0,5 cm.	Fig. 6.o	-
<b>Travertino Poroso</b>	DEG-09	Travertino con Hojas	Masiva	Micrítico, poco cementado, con moldes vegetales.	Travertino poco cementado, casi arcilloso, con moldes de hojas y ramas, con porosidad de aprox 40%. Presenta estructura masiva con zonas de orientación preferencial del material vegetal y otras con disposición aleatoria.	Fig. 6. p	-
	DEG-11	Travertino con briofitas	<i>Framework</i>	Aspecto terroso y morfologías ramificadas asociadas a un andamiaje biológico.	Travertino grisáceo, liviano y de aspecto terroso, con alta porosidad aprox 55%. Su estructura está determinada por un <i>framework</i> de briofitas preservadas, cuyas morfologías ramificadas actúan como andamiaje natural.	Fig. 6. q	-

### 4.3 Microscopía Electrónica De Barrido (SEM)

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM Scanning Electron Microscope), reveló que los travertinos analizados (DEG-01 a DEG-11) presentan una composición mineralógica dominada por calcita. Esta se manifiesta en dos texturas principales: micrítica (m), definida por cristales muy finos de calcita ( $< 4 \mu\text{m}$ ) que conforman una matriz, y esparítica (sp), caracterizada por cristales de mayor tamaño ( $> 5\text{--}10 \mu\text{m}$ ), que a menudo se forman por procesos diagenéticos de recristalización o transformación de la micrita.

#### Figura 8

*Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) a 50  $\mu\text{m}$ .*



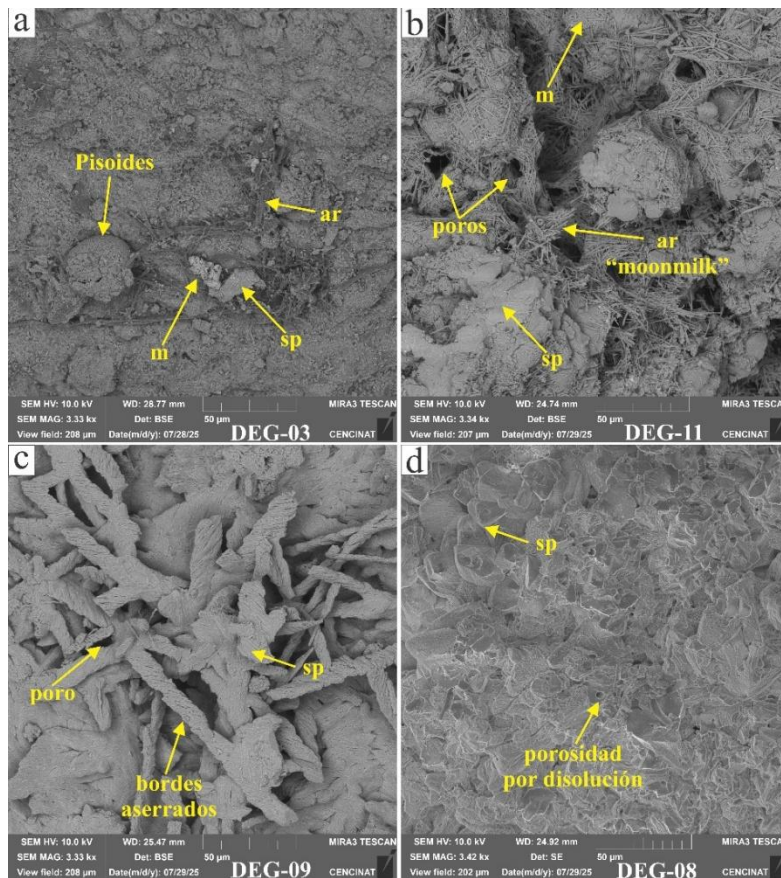
*Nota.* Abreviaturas: sp = esparita, m = micrita. (8.a–8.c) Calcita en texturas micrítica y esparítica con evidencias de disolución parcial, expresada en superficies rugosas y bordes aserrados. (8.d–8.e) Cristales de calcita con disolución más intensa y desarrollo de poros intergranulares y

oquedades, indicando porosidad secundaria postdeposicional. (8.f) Cristales de calcita escalenoédricos (“diente de perro”) con superficies rugosas por disolución.

En las Figura 8.a–8.c, se reconocieron rasgos de disolución parcial de la calcita, evidenciados por superficies rugosas y bordes aserrados en los cristales. En las Figura 8.d y 8.e también se observaron procesos de disolución, acompañados por el desarrollo de poros intergranulares y oquedades, lo que indica la generación de porosidad secundaria asociada a procesos postdeposicionales. En la Figura 8.f se observa, además, calcita escalenoédrica (“diente de perro”) con superficies rugosas producto de disolución.

### Figura 9

*Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) a 50 µm.*



*Nota.* Abreviaturas: sp = esparita, ar = aragonito, m = micrita. (9.a) Pisoides de morfología redondeada acompañados por micrita y cristales de calcita. (9.a-9. b) Agregados de aragonito con textura tipo moonmilk (filamentos fibrosos) intercrecidos con calcita. (9.c) Láminas de aragonito parcialmente disueltas y recrystalizadas, con bordes irregulares y superficies alteradas que originalmente presentaban textura moonmilk. (9.d) Cristales euédricos romboédricos de calcita esparítica, con porosidad por disolución manifestada en forma de oquedades.

En la Figura 9.a se identifican pisoides de morfología redondeada, asociados con micrita y cristales de calcita. Tanto en la Figura 9.a como en la Figura 9.b se observaron además agregados de aragonito con textura tipo *moonmilk*, término que describe filamentos fibrosos dispuestos intercrecidos con la calcita. En la Figura 9.c se distinguen láminas de aragonito parcialmente disueltas y recrystalizadas, con bordes irregulares y superficies alteradas que originalmente presentaban textura *moonmilk*. En la Figura 9.d se reconocen cristales romboédricos euédricos de calcita esparítica, acompañados por porosidad de disolución en forma de oquedades.

#### **4.4 Difracción de rayos X (DRX)**

Los resultados de DRX evidencian que la calcita es la fase mineral dominante en todas las muestras analizadas, con valores superiores al 89 % (Tabla 2). En las submuestras DEG-04-1 y DEG-04-2, correspondientes a la facie de travertino bandeado, la calcita alcanza proporciones cercanas al 100 % (99,63 % y 99,25 %, respectivamente), acompañada únicamente por cantidades menores de siderita (0,37 % y 0,75 %). No se identificaron fases detríticas ni arcillosas en estas muestras, lo que sugiere un carácter esencialmente monomineral.

En contraste, la muestra DEG-06, correspondiente a la facie de travertino masivo, presentó una mineralogía más heterogénea. Aunque la calcita sigue siendo el mineral dominante (89,3 %), se identificaron porcentajes significativos de cuarzo (5,55 %) y plagioclasa (0,51 %), además de

minerales de alteración arcillosa como illita/mica (3,18 %) y caolinita (0,89 %), junto con una fracción menor de siderita (0,56 %).

Cabe señalar que en los difractogramas no se detectó aragonito en ninguna de las muestras analizadas por DRX. Sin embargo, este mineral sí se observó en otras muestras del mismo depósito mediante SEM, lo que indica que su ausencia en DRX se debe a la selección de muestras analizadas y no a que el sistema carezca de aragonito.

### Tabla 2.

*Composición mineralógica determinada con DRX, porcentaje en peso.*

Muestra	Cuarzo	Plagioclasa	Caolinita	Illita/mica	Calcita	Siderita
DEG-04-1	-	-	-	-	99,63	0,37
DEG-04-2	-	-	-	-	99,25	0,75
DEG-06	5,55	0,51	0,89	3,18	89,3	0,56

### 4.5 Espectroscopia de dispersión de energía (EDS)

El análisis elemental mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS) mostró que las diez muestras de travertino (DEG-01 a DEG-10) están constituidas principalmente por calcio (Ca), oxígeno (O) y carbono (C). Los valores normalizados en porcentaje en peso (wt.%) (Tabla 3) indican que el oxígeno es el elemento predominante, con valores entre 49 % y 60 %, seguido por el calcio (20 %–26 %) y el carbono (18 %–25 %). Esta composición es coherente con una matriz carbonatada rica en calcita (CaCO<sub>3</sub>).

**Tabla 3.***Composición elemental normalizada en porcentaje en peso (wt. %).*

<b>Muestra</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>
<b>DEG-01</b>	-	21.27	54.94	-	-	-	-	-	-	23.79	-
<b>DEG-02</b>	-	14.39	55.08	-	-	-	-	-	-	30.53	-
<b>DEG-03</b>	-	16.32	57.63	-	-	-	-	-	-	25.44	0.61
<b>DEG-04</b>	-	15.24	54.37	-	-	-	-	-	-	30.38	-
<b>DEG-05</b>	-	17.48	57.73	-	-	-	-	-	-	24.79	-
<b>DEG-06</b>	-	23.95	59.30	0.59	0.41	1.47	1.46	-	-	12.82	-
<b>DEG-07</b>	8.95	18.30	54.78	0.60	0.51	3.24	3.97	-	0.56	8.51	0.58
<b>DEG-08</b>	-	28.88	66.01	-	-	0.47	-	-	-	4.64	-
<b>DEG-09</b>	-	15.63	57.35	-	-	-	-	-	-	27.02	-
<b>DEG-11</b>	-	16.11	53.94	-	-	-	-	-	-	29.95	-

Los valores normalizados en porcentaje atómico (at. %) (Tabla 4) mantienen la misma tendencia, con predominio de oxígeno, seguido por carbono y calcio. Además de estos elementos mayoritarios, se identificaron Si, Al, Fe, Mg, Na, K, P, B, Ti y S en proporciones bajas (< 2 % en la mayoría de los casos). En la muestra DEG-07 se detectaron señales puntuales de B y P; sin embargo, debido a las limitaciones del EDS en la cuantificación de estos elementos (especialmente por la baja energía de emisión de rayos X en el caso del B y posibles solapamientos en el P), dichos resultados deben considerarse con cautela y no se tomaron en cuenta en este estudio.

**Tabla 4.***Composición elemental normalizada en porcentaje atómico (at. %).*

<b>Muestra</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>
<b>DEG-01</b>	-	30.54	59.22	-	-	-	-	-	-	10.24	-
<b>DEG-02</b>	-	22.18	63.72	-	-	-	-	-	-	14.10	-
<b>DEG-03</b>	-	24.23	64.25	-	-	-	-	-	-	11.32	0.20
<b>DEG-04</b>	-	23.39	62.64	-	-	-	-	-	-	13.97	-
<b>DEG-05</b>	-	25.61	63.50	-	-	-	-	-	-	10.89	-
<b>DEG-06</b>	-	32.32	60.08	0.41	0.28	0.88	0.84	-	-	5.18	-
<b>DEG-07</b>	13.09	24.10	54.17	0.41	0.33	1.90	2.24	-	0.23	3.36	0.17
<b>DEG-08</b>	-	36.09	61.92	-	-	0.26	-	-	-	1.74	-
<b>DEG-09</b>	-	23.41	64.47	-	-	-	-	-	-	12.12	-
<b>DEG-11</b>	-	24.57	61.74	-	-	-	-	-	-	13.69	-

Las señales de Si y Al, en conjunto con los difractogramas de DRX, permiten interpretar la presencia de caolinita, mientras que los picos de K podrían estar asociados a micas detríticas (illita/micas). La presencia de Fe se vincula con siderita, y el Mg posiblemente con procesos de sustitución en la red cristalina de la calcita.

Las muestras de los niveles estratigráficos cercanos a 16 y 18 m (DEG-06 y DEG-07) (Figura 4), correspondientes a facies de travertino masivo y brechificado, registran aportes significativos de varios elementos (Fe, Si, Al y Mg), lo que sugiere una mayor influencia detrítica. En contraste, las muestras DEG-02 a DEG-05, asociadas a facies de travertino cristalino, balsas (floe travertine), bandeado y estromatolítico, muestran espectros dominados casi exclusivamente

por Ca, reflejando una composición más pura. Se destaca que en la facies de costras asociadas a procesos de disolución no se realizaron análisis EDS, por lo que su composición química no pudo ser determinada.

## **5. Discusión.**

### **5.1 Interpretación de las litofacies y biofacies**

#### **5.1.1 Travertino Cristalino (TRV2)**

**5.1.1.1 Travertino cristalino (DEG-01).** Los cristales de este tipo se concentran en clinofomas desarrolladas sobre laderas de pendiente suave, pero con buzamiento marcado y flujos rápidos, así como en los bordes de pozas, terrazas y cascadas. Esta disposición indica que su formación estuvo controlada por procesos de precipitación fisicoquímica ligados a la rápida desgasificación de CO<sub>2</sub> en entornos de alta energía, fenómeno también descrito en otros depósitos de travertino (Della Porta, Capezzuoli, & De Bernardo, 2017). Asimismo, la alternancia entre capas micríticas más oscuras y delgadas —con evidencias de esparmicritización y probable intervención de cianobacterias en periodos estivales— y capas columnares más claras —interpretadas como producto de condiciones invernales— revela un marcado control estacional en la génesis del depósito, consistente con el caso de depósitos de travertino explicados por Pentecost, 2005.

**5.1.1.2 Balsas de Travertino (DEG-02).** Dentro del sistema travertínico analizado se identificó una litofacies vinculada a ambientes de baja energía en pozas o piscinas naturales, caracterizada por la precipitación de carbonato en la interfaz aire-agua. El material se acumula inicialmente en láminas flotantes que, al aumentar su espesor, pierden flotabilidad y se depositan

en el fondo de la piscina. Este rasgo corresponde al tipo floe descrito en la literatura para ambientes de aguas estancadas (Pentecost, 2005), lo que permite relacionar su presencia en el área de estudio con procesos de precipitación asociados a condiciones hidrológicas tranquilas.

**5.1.1.3 Pisoides/Granos Recubiertos (DEG-03).** Los pisoides identificados en el sistema travertínico muestran un origen ligado principalmente al movimiento del agua en piscinas y represas, donde la agitación favoreció la precipitación carbonatada alrededor de núcleos diversos. Aunque en otros manantiales se ha destacado la importancia de la actividad bacteriana y de episodios de agitación periódica en estanques como factores clave en su génesis (Andrews & Brasier, 2005; Pentecost, 2005; Jones & Renaut, 2008), en este caso la dinámica hidráulica local parece haber tenido un papel más determinante que el control biológico. Las variaciones en la morfología de los pisoides reflejan la influencia de la forma y disposición de sus núcleos, un aspecto señalado también en la literatura (Pentecost, 2005). Sin embargo, en el depósito estudiado estas variaciones son más diversas que las reportadas en sistemas clásicos, lo que sugiere la presencia de condiciones hidrodinámicas fluctuantes durante su formación.

**5.1.1.4 Travertino Bandeado (DEG-04).** La presencia dominante de fábricas tipo shrubs en el litotipo sugiere que los depósitos de Málaga y Concepción se desarrollaron en ambientes hidrotermales someros, caracterizados por variaciones en caudal y profundidad. Estas fábricas, con crecimiento radial y dendrítico de cristales aciculares, indican un origen principalmente fisicoquímico asociado a la rápida desgasificación de  $\text{CO}_2$  y a la turbulencia del flujo. Los procesos que han formado este tipo de travertinos han sido descritos y explicados en otros sistemas de travertino como los de Tivoli, Italia (Erthal et al., 2017; Pentecost, 2005), lo cual respalda la interpretación de condiciones de sobresaturación extrema de  $\text{CaCO}_3$  en la zona de estudio.

Asimismo, la alternancia entre fábricas masivas cristalinas y arbustivas puede reflejar cambios en la dinámica hidrológica y en la dominancia de procesos de precipitación.

**5.1.1.5 Travertino Estromatolítico (DEG-05).** En los depósitos de travertino analizados se identificó una alternancia marcada de colores y texturas, lo que indica variaciones periódicas en la porosidad, la microfábrica y la incorporación de materia orgánica. Estas diferencias se relacionan con cambios en las condiciones hidrológicas y geoquímicas del sistema, controladas por factores como el caudal, la radiación solar y la actividad biológica. Las capas oscuras, donde se reconocen estructuras arbustiformes, se asocian a fases de desgasificación lenta y flujos de baja energía; en estas condiciones, la reducción en la velocidad del agua habría favorecido la colonización microbiana y, en consecuencia, la precipitación carbonatada. Por su parte, los shrubs blanquecinos con morfología dendrítica reflejan fases de sobresaturación extrema y desgasificación rápida, en las que predominó la precipitación abiótica del carbonato. Estos patrones coinciden con lo descrito por Pentecost (2005) y Erthal et al. (2017), quienes relacionan la variabilidad textural y cromática con pulsos en la dinámica del flujo y en la intensidad de la actividad biológica.

La recurrencia de ambos tipos de fábricas en la secuencia estudiada constituye, por lo tanto, una evidencia de la alternancia entre procesos bióticos y abióticos en la formación del depósito, en concordancia con la propuesta de un control mixto señalada por Pentecost (2005) y Jones & Peng (2012). Además, la asociación cromática observada en el área sugiere un patrón estacional: capas oscuras posiblemente vinculadas a periodos cálidos (primavera-verano) y capas claras que corresponderían a condiciones invernales.

**5.1.1.6 Travertino Masivo (DEG-06).** El travertino masivo indica una acumulación continua de calcita esparítica asociada a procesos principalmente fisicoquímicos, con escasa influencia biológica y aporte detrítico reducido. Estas características concuerdan con lo señalado por Pentecost (2005) y Gandin & Capezzuoli (2014), quienes vinculan este tipo de fábricas con ambientes hidrotermales estables y de baja variabilidad. De manera similar, Okumura et al. (2011) documentaron que la sobresaturación en  $\text{Ca}^{2+}$  y la rápida desgasificación de  $\text{CO}_2$  favorecen la formación de cuerpos densos y coherentes, en línea con lo observado en los depósitos de la zona de estudio. En conjunto, los resultados sugieren que la génesis del travertino masivo estuvo controlada por un flujo sostenido de aguas carbonatadas, lo que refuerza la interpretación de un contexto hidrotermal estable comparable al descrito en otros sistemas como el las aguas termales de Nagano en Japón.

**5.1.1.7 Travertino Brechificado (DEG-07).** El travertino brechificado identificado en la zona refleja condiciones de alta energía, donde fragmentos de travertino, caliza y, en menor medida, areniscas, fueron erosionados, transportados y redepositados. Una vez estabilizados, estos clastos actuaron como núcleos de precipitación, generando recubrimientos carbonatados y costras alrededor de los fragmentos. Este comportamiento coincide con lo descrito por Luo et al. (2021), quienes interpretan la formación de brechas travertíníferas como el resultado de la interacción entre procesos clásticos y la sobresaturación de carbonato en solución. La similitud entre ambas observaciones sugiere que los depósitos analizados responden a dinámicas hidrológicas variables, capaces de alternar fases de erosión y transporte con pulsos de rápida precipitación carbonatada.

**5.1.1.8 Espeleotemas (DEG-08).** Las estructuras estalácticas reconocidas en el área corresponden a depósitos carbonatados formados por precipitación subaérea a partir de goteo,

generalmente en techos o bordes de terrazas travertíníferas. Su morfología alargada y la presencia de laminaciones onduladas concéntricas, con alternancia de tonos pardos y blancos, indican episodios sucesivos de precipitación asociados a variaciones físico-químicas del sistema. Estos rasgos concuerdan con las interpretaciones de Pentecost (2005), quien vincula las variaciones cromáticas y texturales de las estalactitas con pulsos estacionales en la química del agua. En conjunto, las evidencias sugieren un ambiente de baja energía, dominado por un flujo constante de agua sobresaturada en carbonato.

**5.1.1.9 Corteza/Costra de recubrimiento (DEG-10).** Las costras de recubrimiento observadas en el área indican un origen ligado a la precipitación carbonatada en un ambiente fluvial activo, donde la circulación de aguas sobresaturadas en carbonato de calcio favoreció la formación de capas delgadas sobre los sustratos disponibles. La presencia de morfologías botrioidales constituye un rasgo distintivo, ya que su desarrollo se asocia a la nucleación promovida por tapetes algales y cianobacterias. Este patrón coincide con lo descrito por Chafetz & Folk (1984) y Riding (2000), quienes relacionan estas texturas con la influencia directa de la actividad microbiana en la generación de superficies irregulares de precipitación. De este modo, los resultados respaldan lo planteado por Pentecost (2005) acerca del carácter fluvial de este tipo de costras, pero además destacan el papel biótico en su formación, lo que sugiere un control conjunto entre circulación hídrica y colonización microbiana en la construcción del depósito.

## **5.1.2 Travertino Poroso (TRV1)**

**5.1.2.1 Travertino poroso / Toba calcárea (DEG-09- DEG-11).** El depósito analizado presenta características típicas de ambientes de baja energía, como pozas o remansos fluviales, donde la acumulación sucesiva de láminas carbonatadas y restos orgánicos dio origen a cuerpos

porosos de toba calcárea. La abundancia de estructuras vegetales incrustadas sugiere que la vegetación ribereña y los tapetes microbianos tuvieron un papel activo tanto en la colonización de superficies húmedas como en la inducción de la precipitación carbonatada. Este comportamiento coincide con lo señalado por Pentecost (2005), Capezzuoli & Gandin (2005) y Jones & Renaut (2010), quienes destacan la interacción entre procesos fisicoquímicos y biológicos en la formación de depósitos tobáceos. Sin embargo, en los depósitos estudiados, la presencia dominante de restos vegetales respecto a rasgos microbianos apunta a un mayor control de la vegetación en comparación con lo documentado en otros sistemas, lo que sugiere que, en este caso, el factor biótico vegetal tuvo un peso más determinante en la génesis de la toba calcárea.

## **5.2 Condiciones Paleoambientales de Formación.**

Las muestras, con excepción de DEG-06 y DEG-07, reflejan condiciones geoquímicas estables y favorables para la precipitación de calcita pura, con una influencia detrítica mínima. La dominancia de  $\text{CaCO}_3$  evidenciada en los análisis de EDS y DRX indica ambientes de baja energía, pH alcalino y aporte alóctono limitado, característicos de sistemas hidrotermales carbonatados donde el equilibrio químico entre las fases líquidas y sólida se mantiene cercano a la sobresaturación. Estas condiciones favorecieron la formación de texturas homogéneas y la preservación de estructuras primarias bien definidas, como laminaciones finas y fábricas micríticas compactas, que denotan estabilidad del sistema durante la precipitación.

La presencia de hierro y siderita en algunas facies, especialmente en los travertinos masivos (DEG-06) y brechificados (DEG-07), sugiere que parte de la mineralogía se desarrolló bajo condiciones reductoras y de baja energía, típicas de microambientes anóxicos o con circulación restringida de fluidos. En estos entornos, la disponibilidad limitada de oxígeno favoreció la precipitación de carbonatos ferroso-magnésicos en equilibrio con aguas cargadas de hierro

disuelto. La asociación de siderita con clastos re TRABAJADOS y fragmentos carbonatados indica que algunos de estos materiales pudieron haberse originado en sectores localmente reductores y, posteriormente, haber sido redepositados en ambientes de mayor energía, donde coexistieron procesos de transporte y re trabajo.

No obstante, la incorporación de hierro al sistema también puede explicarse por procesos de lixiviación de las rocas preexistentes atravesadas por las aguas mineralizadas, las cuales movilizaron elementos metálicos hacia las zonas de precipitación. Este aporte se hace evidente en la formación de facies de corteza y costras de recubrimiento, donde el hierro precipita conjuntamente con el carbonato o se adhiere como película superficial. Dicho patrón refleja un sistema hidrotermal dinámico, donde pulsos de flujo, episodios de re trabajo y procesos de recubrimiento superficial actuaron de manera secuencial, generando variabilidad en la composición mineral y en la coloración de las facies.

La variación cromática observada en los depósitos se relaciona directamente con su composición mineral. La presencia de siderita, óxidos de hierro y pigmentos orgánicos explica las tonalidades pardas, miel, ocre y rojizas, mientras que las capas claras corresponden a etapas de precipitación más pura de calcita. Este patrón cromático coincide con lo reportado por Acevedo & Tovar (2022) en el sistema de travertino de Málaga y Concepción, quienes asocian dichos matices con compuestos férricos, azufrados y materia orgánica. De manera complementaria, Pentecost (2005) señala que la variabilidad de colores en los travertinos está vinculada con la presencia de impurezas metálicas y procesos de oxidación, observaciones que concuerdan con las características registradas en el área de estudio.

### 5.3 Procesos Diageneticos

Los travertinos de Málaga y Concepción muestran evidencias de una evolución diagenética compleja que afectó la textura, porosidad y mineralogía de las rocas después de su depositación. Las observaciones petrográficas revelan que la micrita original sufrió procesos de recristalización y neomorfismo agradacional, donde los cristales de calcita crecieron a expensas de los más pequeños, originando mosaicos esparíticos más estables. Este tipo de transformación indica una diagénesis temprana desarrollada bajo condiciones de aguas meteóricas con baja agresividad química y circulación limitada de fluidos, lo que permitió la reorganización progresiva del carbonato sin generar disoluciones extensas.

Los análisis SEM complementan esta interpretación al mostrar bordes aserrados, microdisoluciones y cavidades intergranulares que evidencian la generación de porosidad secundaria. Estos rasgos se asocian a la acción de aguas meteóricas que circularon por el depósito una vez consolidado, provocando la disolución parcial de los cristales de calcita y el ensanchamiento de los moldes vegetales, especialmente en los travertinos porosos. Este proceso contribuyó a aumentar la permeabilidad local y a modificar la textura original, sin alterar significativamente la composición mineral.

En la muestra DEG-09, las texturas fibrosas tipo moonmilk interpretadas como aragonito parcialmente transformado a calcita. La ausencia de picos de aragonito en los difractogramas confirma que este mineral inestable fue reemplazado por calcita durante una etapa temprana de diagénesis, probablemente bajo condiciones de baja temperatura y exposición a aguas de composición meteórica. Este cambio es común en sistemas travertínicos y representa un proceso de estabilización mineralógica que homogeniza la composición del depósito.

#### 5.4 Modelo Paleoambiental

Los resultados obtenidos en Málaga y Concepción muestran que la génesis del depósito de travertino estuvo fuertemente condicionada por la actividad tectónica asociada a la Falla del Río Servitá. La extensión del depósito, la disposición de los cuerpos y la orientación del flujo evidencian un claro control estructural y topográfico: las fracturas actuaron como conductos para el ascenso de aguas carbonatadas y facilitaron su circulación a través del relieve local. Este patrón de control tectónico y morfológico concuerda con lo documentado en otros sistemas travertíniferos, como los descritos en Europa Central (Bóna et al., 2024) y en diversas regiones termales del Valle del Rift en Kenia, Yellowstone (EE. UU.), Italia y Turquía (Jones & Renaut, 2010). En este sentido, los travertinos también pueden estar asociados a fallas inversas, que pese a originarse en un régimen compresivo, generan zonas de fracturamiento y permeabilidad que favorecen el ascenso de fluidos hidrotermales. Un caso análogo se observa en los travertinos de Baños Colina (Chile), donde la Falla Baños Colina —de carácter inverso y alto ángulo— funcionó como canal principal para el transporte de aguas meteóricas calentadas en profundidad, permitiendo su rápido ascenso y la posterior precipitación de carbonatos (Anselmo, 2017).

La morfología ondulada del depósito, junto con las minirrepresas y pozas escalonadas, refleja la interacción entre dos procesos: el aporte constante de aguas ricas en carbonatos y las variaciones en su circulación superficial. El aporte constante de agua mantiene disponible el carbonato disuelto, mientras que los cambios en el recorrido del agua —controlados por la topografía, desniveles y obstáculos locales— generan zonas de acumulación, desbordamiento y encauzamiento. Estas condiciones originaron represas naturales, pozas y pequeñas cascadas, formas típicas de sistemas termógenos, donde la desgasificación progresiva del CO<sub>2</sub> induce la

sobresaturación y la precipitación localizada de carbonato de calcio, en concordancia con lo señalado por Pentecost, 2005.

A escala litológica, la diferenciación observada entre TRV2 (travertino cristalino) y TRV1 (travertino poroso) señala la coexistencia de ambientes depositacionales contrastantes dentro del mismo sistema. El TRV2 se caracteriza por fábricas compactas y cristalinas, con mayor cohesión y menor influencia biológica, lo que sugiere condiciones de sobresaturación sostenida y desgasificación intensa en zonas de surgencia directa. Este tipo de fábricas densas ha sido documentado en contextos donde predominan procesos hidroquímicos estables y con escaso control biótico (Gandin & Capezzuoli, 2014; Okumura et al., 2011). En contraste, el TRV1 muestra abundancia de moldes de hojas, raíces y estructuras livianas, junto con elevada porosidad, lo que evidencia una fuerte participación de biopelículas y vegetación en la nucleación del carbonato. Estas características permiten interpretarlo como una toba calcárea vinculada a aguas estancadas o de flujo lento, en concordancia con lo descrito en otros sistemas dominados por la actividad biológica (Capezzuoli & Gandin, 2005; Jones & Renaut, 2010).

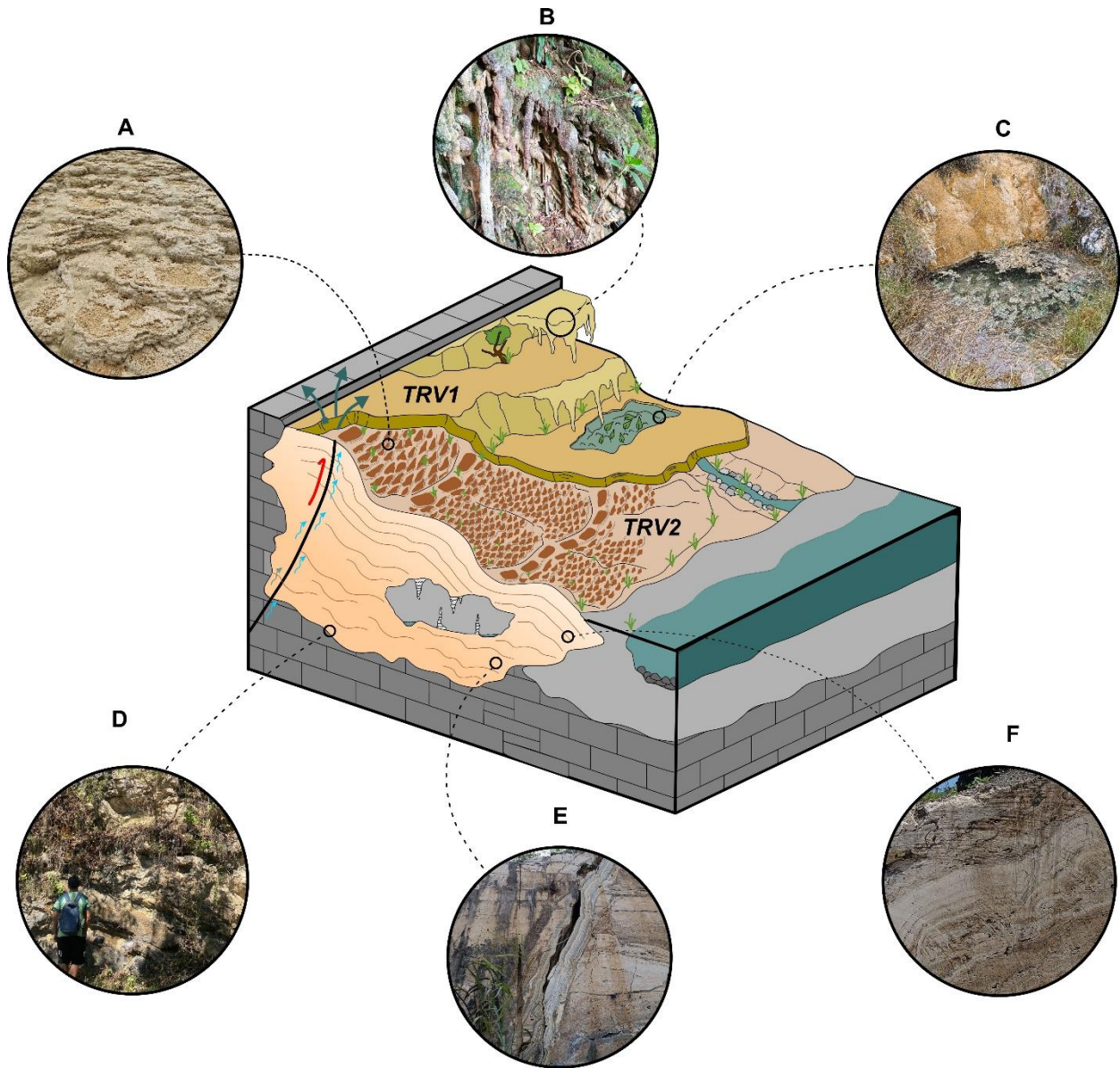
La disposición estratigráfica de las unidades sugiere que las diferencias entre el travertino cristalino (TRV2) y el poroso (TRV1) responden a variaciones en las condiciones de formación a lo largo del tiempo, lo que evidencia un sistema altamente dinámico en el que el equilibrio entre aportes endógenos (aguas hidrotermales profundas) y epigénicos (escorrentía superficial) fue cambiando gradualmente a lo largo de la evolución del depósito. Esta sucesión refleja una evolución en el sistema deposicional, en la que las condiciones iniciales favorecieron la formación de un depósito cristalino y compacto (TRV2), mientras que en etapas más recientes se desarrolló un travertino marcadamente poroso (TRV1).

Este cambio pone en evidencia una transición desde un régimen dominado por la precipitación fisicoquímica en condiciones estables hacia un ambiente más variable, con mayor influencia biológica y variaciones hidrodinámicas. Estas fluctuaciones pueden deberse a diferentes factores, una primera hipótesis apunta a cambios en la química del agua: en las etapas iniciales, condiciones de sobresaturación elevada y desgasificación estable habrían favorecido la formación de un depósito compacto y cristalino, mientras que en etapas más recientes, la menor concentración de solutos y las variaciones en la sobresaturación habrían generado estructuras irregulares y altamente porosas. Asimismo, es posible que la dinámica del flujo jugara un papel decisivo, ya que un régimen estable propició la precipitación ordenada, mientras que la mayor turbulencia y las fluctuaciones estacionales del caudal habrían incrementado la porosidad. Finalmente, la colonización progresiva de organismos como musgos, algas y bacterias en las capas más superficiales pudo intensificar la formación de moldes y cavidades, reforzando el carácter poroso de las facies más jóvenes.

En conjunto, la evidencia estratigráfica, textural y morfológica obtenida en este estudio permite interpretar el depósito travertínífero de Málaga–Concepción como un sistema controlado simultáneamente por factores estructurales, hidrológicos y biológicos. Estos resultados permiten proponer un modelo de formación (Figura 10) que integra: (i) el rol de la Falla del Río Servitá en el ascenso de aguas carbonatadas, (ii) la interacción con la topografía local en la generación de cascadas y represas naturales, y (iii) la diferenciación litológica entre TRV1 y TRV2 como respuesta a la alternancia entre fases de precipitación biogénica y abiótica.

**Figura 10**

*Modelo propuesto para la formación del Travertino.*



*Nota.* (A) Formación de minidams. (B) Desarrollo de geoformas tipo cascada. (C) Pozas con acumulación de carbonato de calcio y materia orgánica. (D) Contacto erosivo con la Formación Tibú-Mercedes. (E) Fracturas y venas rellenas de carbonato de calcio. (F) Variaciones en los niveles y en la precipitación del travertino.

## 6. Conclusiones

1. El análisis macro y microscópico permitió reconocer litofacies cristalinas y porosas cuya disposición estratigráfica evidencia una evolución en las condiciones de formación. Las facies cristalinas reflejan un régimen inicial dominado por procesos fisicoquímicos, mientras que las facies porosas corresponden a etapas más recientes con mayor influencia biológica e hidrológica. Estos resultados confirman que la evolución del sistema estuvo controlada por la transición de un dominio fisicoquímico hacia uno con fuerte impronta biogénica.
2. El análisis mineralógico y geoquímico mostró el predominio de calcita (>99%) en la mayoría de facies, con presencia subordinada de aragonito y minerales detríticos (cuarzo, arcillas y siderita). Estas asociaciones revelan que, aunque el sistema estuvo dominado por la precipitación química de carbonato de calcio, existieron episodios con aportes terrígenos y condiciones reductoras locales.
3. La reconstrucción de la distribución de facies permitió establecer que la evolución del depósito de travertino respondió a una transición ambiental clara: de un régimen inicial, dominado por aportes endógenos profundos y condiciones químicas estables que favorecieron la cristalización, hacia un escenario posterior más variable, controlado por escorrentía superficial, fluctuaciones hidrológicas y mayor influencia biológica. Esta dinámica demuestra que la génesis del travertino en Málaga y Concepción estuvo regulada por la interacción entre estabilidad hidrodinámica, composición química del agua y actividad biológica, lo que confirma el carácter altamente dinámico de estos sistemas y resalta su valor como registros sensibles de cambios ambientales en contextos continentales.

**Referencias Bibliográficas**

- Andrews, J. E., & Brasier, A. T. (2005). Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: Short review and future prospects. *Journal of Quaternary Science*, 20(5), 411–421. <https://doi.org/10.1002/jqs.927>
- Anselmo Miranda, A. N. (2017). *Génesis de travertinos en Baños Colina y Baños Morales, Cajón del Maipo, Región Metropolitana* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147739>
- Árnason, K., Eysteinnsson, H., & Hersir, G. P. (2010). Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics*, 39(1), 13–34. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.01.002>
- Arenas, C., Vázquez, A., & Pérez, A. (2010). Environmental factors controlling modern travertine precipitation in the main springs of the River Mesa (Iberian Chain, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 229(3–4), 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.07.002>
- Bóna, J., Gallay, M., Macková, A., Bónová, K., Littva, J., & Hók, J. (2024). Travertine and calcareous tufa occurrences as an indicator of the ongoing tectonic activity of the Central Slovak Fault System inferred from airborne laser scanning data, geomorphometric, and structural analysis (Northern Slovakia). *Geomorphology*, 466, 109420. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109420>
- Capezzuoli, E., & Gandin, A. (2005). Facies distribution and microfacies of thermal-spring travertine from Tuscany. *Italian Journal of Quaternary Sciences*, 18(1), 25–32. \*

- Capezzuoli, E., Gandin, A., & Pedley, H. M. (2014). Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art. *Sedimentology*, *61*(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/sed.12075>
- Chafetz, H. S., & Folk, R. L. (1984). Travertines: Depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, *54*(1), 289–316. <https://doi.org/10.1306/212F8404-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Chamley, H. (1989). *Clay sedimentology*. Springer.
- Della Porta, G., Capezzuoli, E., & De Bernardo, A. (2017). Facies character and depositional architecture of hydrothermal travertine slope aprons (Pleistocene, Acquasanta Terme, Central Italy). *Marine and Petroleum Geology*, *87*, 171–187. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.03.014>
- Drever, J. I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Erthal, M. M., Capezzuoli, E., Mancini, A., Claes, H., Soete, J., & Swennen, R. (2017). Shrub morpho-types as indicator for the water flow energy: Tivoli travertine case (Central Italy). *Sedimentary Geology*, *353*, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.001>
- Gandin, A., & Capezzuoli, E. (2014). Travertine: Distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems. *Sedimentology*, *61*(1), 264–290. <https://doi.org/10.1111/sed.12085>
- Guo, L., & Riding, R. (1998). Hot-spring travertine facies and sequence, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*, *45*(1), 163–180. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1998.00141.x>

- Guo, L., & Riding, R. (1999). Rapid facies changes in Holocene fissure ridge hot spring travertines, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*, 46(6), 1145–1158. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1999.00263.x>
- Jones, B., & Peng, X. (2012). Intrinsic versus extrinsic controls on the development of calcite dendrite bushes, Shuzhishi Spring, Rehai geothermal area, Tengchong, Yunnan Province, China. *Sedimentary Geology*, 249, 45–62. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.12.005>
- Jones, B., & Renaut, R. W. (2010). Calcareous spring deposits in continental settings. *Developments in Sedimentology*, 61, 177–224.
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014, diciembre). Compilación de la cuenca de la Cordillera Oriental (Anexo G). Bogotá, Colombia: Tectónica – Geociencias Básicas.
- Luo, L., Capezzuoli, E., Vaselli, O., Wen, H., Lazzaroni, M., Lu, Z., Meloni, F., & Kele, S. (2021). Factors governing travertine deposition in fluvial systems: The Bagni San Filippo (central Italy) case study. *Sedimentary Geology*, 426, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.106023>
- Minissale, A., Kerrick, D. M., Magro, G., Murrell, M. T., Paladini, M., Rihs, S., Sturchio, N. C., Tassi, F., & Vaselli, O. (2002). Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): Structural, hydrologic and paleoclimatic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1), 709–728. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00844-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00844-7)
- Munsell Color (Firm). (2009). *Munsell soil color charts: With genuine Munsell color chips* (Revised ed.). Munsell Color.
- Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Nishida, S., Yukimura, K., Naganuma, T., Koike, H., Arp, G., & Kano, A. (2011). Microbial processes forming daily lamination in an

aragonite travertine, Nagano-yu hot spring, Southwest Japan. *Geomicrobiology Journal*, 28(2), 135–148. <https://doi.org/10.1080/01490451003743275>

Okumura, T., Takashima, C., Shiraishi, F., Akmaluddin, & Kano, A. (2012). Textural transition in an aragonite continental carbonate formed under various flow conditions at Pancuran Pitu, Central Java, Indonesia. *Sedimentary Geology*, 265–266, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.02.004>

Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer.

Riding, R. (2000). Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47(Suppl. 1), 179–214. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.47.s1.8.x>