



**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
ESCUELA DE GEOLOGÍA**



TESIS PROFESIONAL

**“CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONATOS TERRESTRES EN LA ZONA
DE EL SALITRAL EN EL CORREGIMIENTO DE PLAYA LEONA, PROVINCIA DE
PANAMÁ OESTE”.**

Para optar por el título profesional de:

Ingeniería Geológica

Licenciatura en Ingeniería Geológica

Preparado por: Darlenis Yaneth Saldaña Hernández, C.I.P: 2-744-1564

Isabel Adriana Gonzáles Real, C.I.P: 2-744-1211

Asesora:

Rosa Garces

PANAMÁ

2025

Agradecimientos

Queremos agradecer primordialmente al profesor Celso Jiménez, quien fue nuestro guía en este recorrido y siempre tuvo la disposición para ayudarnos y resolver nuestras dudas con paciencia y vocación; a la profesora Rosa Garces, por ser nuestra asesora y estar dispuesta a apoyarnos siempre. Al Decano Elías López, quién siempre estuvo anuente en colaborarnos en cualquier solicitud.

De igual modo, a nuestros compañeros y algunos amigos que hicimos en el transcurso de la carrera e hicieron más amenas las horas de clases. A aquellos profesores que ya no imparten clase en la facultad, pero dejaron una huella en nuestro aprendizaje, en especial al profesor Erick Chichaco y Erick Gutiérrez. A la profesora Denis Vega, por su disponibilidad cuando se le solicitó el apoyo a la facultad de química; de igual modo, al profesor Jorge Gonzáles Chan quien nos ayudó y guio en el laboratorio de química.

De la misma manera, agradecemos al Doctor de biología Darío Córdoba Gonzáles, quien nos apoyó con la descripción de los gasterópodos. Y, por último, pero no menos importante, agradecemos de manera especial a la memoria del geólogo Roberto Miranda, quien realizó las primeras menciones sobre los travertinos en Panamá y que tuvimos el honor de conocer, aunque ya no se encuentra con nosotros, valoramos profundamente su aporte y su legado en la geología del país.

Dedicatoria de Darlenis

Dedico esta tesis, primeramente, a Dios, quien me ha dado sabiduría y salud para poder culminar esta etapa. A mi mamá, Fidelina Hernández, quien ha sido un pilar fundamental en mi vida y quien siempre ha confiado en mí y me ha apoyado en cada fase de mi vida; a mis abuelos, Eusebio Hernández y Eusebia Gonzales, quienes, con su amor y apoyo, han estado siempre presentes y son la razón principal, junto a mi mamá, por la cual deseaba tanto culminar mis estudios. A mi tía, Rosa Hernández, que también fue un gran apoyo en los momentos difíciles. De igual modo, a mis hermanos Luis y Víctor por estar presentes y animarme.

A mi novio, Eduardo Rudas, quien ha sido un soporte en esta etapa y siempre confió en que terminaría esta investigación, y quien siempre estuvo a disposición para llevarme a las giras de campo y darme ánimo en los momentos difíciles. A María Teresa Mejía, quien, en pandemia me proporcionó esta laptop con la que culmino este escrito.

Y, por último, a aquellos que, con su música, llegaron en el momento correcto para darme fuerzas para seguir (BTS), quienes me acompañaron en cada hora de escritura durante todo este tiempo, cuando veía el futuro lejano y difícil de alcanzar; siempre había una frase en las letras de sus canciones que me hacía continuar: “Future’s gonna be ok.”

Dedicatoria de Isabel

Dedico este proyecto, que marca un importante logro en mi vida, primeramente, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada desafío que se presentó a lo largo de esta carrera. A mi familia, por ser mi apoyo incondicional y el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso cuando los retos parecían insuperables. A mi amada madre, Aura Real, la mujer que me dio la vida y el amor más sincero. Tu apoyo ha sido mi principal guía y motivación constante.

A mi padre, Omar González, por creer en mí desde el inicio y por brindarme el apoyo necesario para emprender el camino de esta profesión. A mi hermano, Juan Abel González, quien, además de mi hermano, ha sido un gran amigo y mi apoyo en todo momento, tanto en este proceso académico como en la vida.

Una especial dedicatoria a José Domingo Rodríguez, mi mentor, figura paterna y la fuente de mi inspiración. Su incondicionalidad y fe inquebrantables que ha depositado en mí, han sido mi motor esencial para alcanzar este logro. A Karen Valdés, más que una amiga, mi hermana. Fuiste mi pilar, acompañándome en las altas y bajas, demostrándome que el amor y el cariño se manifiestan de muchas formas.

A los demás miembros de mi familia, que formaron parte de este proceso, les ofrezco mucha gratitud por su amor, apoyo, enseñanzas y correcciones. Todo ello ha sido crucial para mi formación como profesional y en la persona que soy hoy en día. A mis amistades, quienes se han convertido en otra familia para mí, muchas gracias por el aprecio sincero, el cariño y las enseñanzas. Gracias por aceptarme tal cual soy y por acogerme en sus vidas, haciendo de este trayecto una experiencia enriquecedora.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	Introducción	1
1.1.	Descripción del problema	1
1.2.	Justificación del problema	2
1.3.	Zona de Estudio	3
1.4.	Objetivos	3
1.4.1.	Objetivo General	4
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.5.	Antecedentes	4
1.6.	Hipótesis	5
Capítulo 2.	Marco Teórico.....	6
2.1.	Origen y Definición de los Travertinos.....	6
2.1.1.	Travertinos Metéogenos o Tobas	7
2.1.2.	Travertinos Termógenos.....	8
2.2.	Proceso Químico de formación del Travertinos.....	9
2.3.	Mineralogía de los travertinos: Aragonito y Calcita	10
2.4.	Morfología de los Travertinos.....	12
2.4.1.	Travertinos en Terrazas o Presas	12
2.4.2	Travertinos en Cascadas.....	13
2.4.3	Costras Fluviales.....	15

2.4.4 Depósitos Lacustres	16
2.4.5 Crestas de Fisuras	18
2.4.6 Depósitos Palustres	19
2.5 Litofacies de los Travertinos	20
2.5.1 Costra Cristalina.....	20
2.5.2 Arbustos	21
2.5.3 Pisolitos.....	22
2.5.4 Balsas Finas Como El Papel	23
2.5.5 Travertino Laminado.....	24
2.5.6 Burbujas de Gas Revestidas.....	26
2.5.7 Travertino De Caña	27
2.5.8 Litoclastos	28
2.5.9 Paleosuelos.....	29
2.6 Play Geotérmicos	30
2.6.1 Relación de los Play geotérmicos con la formación de travertinos	31
2.7 Rocas Carbonatadas Antiguas y Su Relación Con los Sistemas Hidrotermales	33
2.8 Distribución de los travertinos	36
2.9 Importancia de los travertinos dentro de la geología	37
2.9.1 Paleoambiente	38
2.9.2 Tectonismo	40

2.9.3 Aplicación en Ingeniería Geológica.....	41
Capítulo 3. Metodología	43
3.1. Enfoque general de la investigación	43
3.2 Trabajo bibliográfico y de gabinete	44
3.2.1 Revisión bibliográfica.....	44
3.2.2 Procesamiento de información geoespacial	45
3.3 Trabajo de Campo y muestreo	46
3.3.1 Reconocimiento y mapeo geológico.....	47
3.3.2 Muestreo de Travertino y Rocas de la Zona	48
3.3.3 Muestreo y Caracterización Fisicoquímica In situ de aguas.....	50
3.3.4 Recolección de Gasterópodos	52
3.4 Fase de Laboratorio y Análisis.....	54
3.4.1 Análisis petrográfico	54
3.4.2 Análisis Biológico.....	56
3.5 Procesamiento de Datos.....	57
Capítulo 4. Resultados	58
4.1 Presentación de los Resultados	58
4.2 Cartografía geológica y Contexto de la zona de estudio.....	58
4.2.1 Nomenclatura de Puntos de Muestreos de las Litofacies de Travertino	58
4.2.2 Contexto Geomorfológico	59

4.2.3 Mapa Geológico.....	60
4.3 Descripción Macroscópica de las Rocas de la Zona.....	72
4.3.1 Basalto.....	73
4.3.2 Toba Vítreo.....	76
4.3.3 Travertino.....	80
4.4 Caracterización Morfológica del Depósito Travertino	63
4.4.1 Travertino en Terrazas o Presas	64
4.4.2 Travertino en Cascada.....	66
4. 5 Caracterización de las litofacies del Travertino	67
4.5.1 Pisolitos.....	68
4.5.2 Balsas finas como el Papel.....	68
4.5.3 Travertino Laminado.....	69
4.5.4 Burbujas de Gas Revestidas.....	70
4.5.5 Travertino de Caña.....	71
4.6 Resultado de Análisis Petrológico de las Muestras de la zona	72
4.6.1 Toba Vítreo Alterada (M2).....	81
4.6.2 Basalto (M3)	81
4.6.3 Basalto (M4)	82
4.6.4 Toba Vítreo (M5).....	83
4.6.5 Toba Vítreo (M6).....	84

4.6.6 Toba Vítrea (M7).....	84
4.6.7 Basalto (M8)	85
4.6.7 Travertino (TRA-1)↑	86
4.6.8 Travertino (TRA – Sand)	87
4.6.9 Travertino (TRA-1).....	88
4.6.10 Travertino (TRA-2-1).....	89
4.6.11 Travertino (TRA-LI)	90
4.6.12 Travertino (TRA-2).....	91
4.7 Resultado de Caracterización de las aguas	91
4.7.1 Grupo 1: Aguas del Manantial Principal (Muestras 1-6)	92
4.7.2 Grupo 2: Lago Artificial (Muestras 10-12).....	94
4.7.3 Grupo 3: Terrazas De Travertino (Muestra 9,14,15,19).....	95
4.7.4 Grupo 4: Puntos de Transición (Muestra 7,8,13,16,17,18).....	97
4.8 Gráficas de las Muestras de Agua	98
4.8.1 Grafico pH vs Conductividad Eléctrica	99
4.8.2 Grafico de Temperatura vs TDS	99
4.8.3 Grafico de Conductividad vs Salinidad	100
4.9 Resultado de la caracterización Biológica	101
4.9.1 Ellobium Stagnalis.....	101
4.9.2 Melanoides Tuberculata	102

4.9.3 Potamocorbula Amurensis	103
Capítulo 5 Discusiones.....	105
5.1 Discusión de la Hipótesis y Objetivos	105
5.2 Origen Termógeno del Travertino.....	105
5.3 Proceso de Precipitación y Fisicoquímica de las Aguas	106
5.4 Litofacies y Morfología	107
5.5 Características Petrográficas Asociadas a la Actividad Hidrotermal	108
5.6 Evidencias Ambientales a través de la Caracterización Biológica	108
5.7 Modelo Propuesto para El Salitral	109
5.8 Limitaciones del Estudio.....	111
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones.....	113
6.1 Conclusiones	113
6.2 Recomendaciones	115
Bibliografía	117
Anexos	122

Tabla de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, El Salitral de la Mitra de la Chorrera. (Mapa generado con ArcGIS Pro).	3
Figura 2. Serie de terrazas de travertino. Tomado de (Pentecost, 2005).....	13
Figura 3. Vista frontal del sistema de cascadas de travertino, mostrando las cuevas formadas detrás de la cortina de agua. Esta morfología es característica de depósitos de travertinos en ambientes de alta energía. Tomada de (Baltakova, 2023).....	14
Figura 4. Costras fluviales. Tomado de (Pedley, 2009.)	16
Figura 5. Depósito lacustre, se puede observar en el fondo de la imagen la pared de travertino producida por la precipitación de carbonato de calcio, producto de procesos de evaporación y actividad fotosintética. Tomado de (Pedley, 2009).	18
Figura 6. Travertino de cresta de fisura. Esta vista transversal muestra la cresta fracturada a través de la cual fluyó la resurgencia termal durante los periodos de actividad. Extraído de (Pedley, 2009).	19
Figura 7. Depósito palustre de travertino que consiste en material clástico suelto que se acumula en depresiones y pequeños montículos de musgosos.	20
Figura 8. En la imagen se observa, las costras cristalinas señaladas por la flecha. Tomado de (Capezzuoli, 2014).	21
Figura 9. Litofacies de arbustos bien desarrollado sobre finas capas de lodo micrítico. Tomado de (Capezzuoli, 2014).	22
Figura 10, A). Pisolito cementado bajo el agua, donde emergen y se ha formado sobrecrecimiento arborescente. B). Costra compuesta de pisolitos cementados. Tomado de (Risacher, 1979).	23

Figura 11. Balsas de calcitas, flotan sobre la superficie del agua de una poza termal, se puede apreciar que son delgadas como el papel. Tomado de (Gandin, 2014).	24
Figura 12. A) Se aprecian láminas planas de carbonatos superpuestas irregularmente. B) Se aprecias los estromatolitos, asociados a la litofacies devtravertino laminado (Gandin 2014). 26	
Figura 13. Burbujas de gas revestidas (Señalada con la flecha), alrededor se observa lodo calcáreo microcristalino. Tomado de (Gandin, 2014).	27
Figura 14. Travertino de caña., se observa los poros y la materia orgánica incrustada. Tomado de (Mancini, 2021).	28
Figura 15. Travertino litoclástico Se observan los fragmentos angulosos y subredondeados característicos de esta litofacies. Tomado de (Riding, 1998)	29
Figura 16. Se observa en la imagen la litofacies de paleosuelos, la cual yace discordantemente sobre depósitos de travertinos. Muestra colores marrones-anaranjados con características kársticas asociadas. Tomado de (Mancini, 2021).	30
Figura 17. Modelo conceptual de un sistema geotermal asociado a vulcanismo activo en un arco volcánico de subducción, la formación de travertino en superficie se muestra como indicador clave de la descarga de fluidos hidrotermales desde un reservorio geotermal profundo. Tomado de (Moeck, 2014).	32
Figura 18. Sistema geotermal no magmático o controlado por fallas.	33
Figura 19. Modelo de disolución en un sistema restringido para la formación de travertinos metéogenos. Tomado de Postma (2005).	34
Figura 20. Modelo de sistema hidrotermal abierto (origen termógeno), ilustra la interacción de los fluidos calientes con el basamento (roca carbonatada), lo que genera la	

precipitación de travertino en la superficie como resultado de la desgasificación y el enfriamiento de las aguas. Tomado de (Ballard, 1999).	36
Figura 21. Mapa temático de la distribución de los travertinos en el mundo, según Ford & Pedley (1996). Los puntos rojos indican la ubicación de los travertinos termógenos y los naranjas los travertinos metéogenos. (Mapa generado en Qgis).....	37
Figura 22. La imagen muestra una representación de los procesos tectónicos importantes en la cantera Cava Olivera en un depósito de travertino. Tomado de (Brogi et al. 2010).	41
Figura 23. A). Travertino Masivo; B). Travertino poroso laminado. Tomado de Vászárhelyi (2010).....	42
Figura 24. A) Caracterización de campo: morfología, litofacies y muestreo del depósito de travertino; B) Extracción de muestras en campos; C) Muestra obtenida para caracterizar en gabinete.	50
Figura 25. A). Sonda multiparámetros utilizada para el muestreo; B). Medición en las terrazas del travertino. C). Medición en el manantial principal.....	52
Figura 26. A). Gasterópodos que se encuentran en la zona de estudio; B). Recolección de los gasterópodos para su análisis.	54
Figura 27. Puntos de ubicación del travertino, en la zona estudio.....	60
Figura 28. Puntos de recolección de muestras	61
Figura 29. Puntos de control de las litofacies, para una mejor ubicación.....	62
Figura 30. Mapa geológico de El salitral, donde se aprecian las distintas litologías de la zona.	63
Figura 31 Terrazas activas localizadas en MP y QS. A) En esta zona se encuentran la mayor cantidad de gasterópodos y algunas algas. B) Se observa el flujo de la quebrada (QS) en el	

cual hay terrazas en algunas zonas se encuentran gasterópodos. C) Serie de terrazas cercana a MP.	66
Figura 32. Terrazas antiguas, las cuales no presentan flujo en la actualidad.	66
Figura 33. Travertino en cascada, se observan las estalactitas que se ha formado por la precipitación rápida de carbonato.	67
Figura 34. A) Pisolitos de diferentes diámetros al redor de MP. B) Costra de pisolitos formado sobre basalto.	68
Figura 35. A) Capa de la lámina fina delgadas como el papel sobre el manantial principicpal. B) Escorrentía de MP donde se observan la capa de carbonato sobre el agua. C) Capas finas como el papel sobre el sustrato.....	69
Figura 36. A) Travertino laminado localizado en TS. B) Estromatolitos identificados en el travertino laminado en TS.	70
Figura 37. A) Burbujas de gas revestidas, en el fondo se observan algunos tapetes microbianos. B) Se observa la relación de balsas finas como el papel y las burbujas de gas revestidas.....	71
Figura 38. A) Gasterópodos recubiertos de carbonato. B) Material vegetal recubierto de carbonato. C) Impresiones de hojas encontradas en las terrazas (QS y TAn) importantes para el reconocimiento del paleoclima.	72
Figura 39. Descripción de muestras recolectadas en campo.....	73
Figura 40. Muestra de Basalto masivo.....	74
Figura 41. Basalto amigdaloides con textura porfídica,	75
Figura 42. Basalto porfídico con textura afanítica.....	76
Figura 43. Toba vítrea sana, se observan algunos cristales de cuarzo y vidrio volcánico	77

Figura 44. Toba vítrea, modernamente alterada se observan pocos cristales de cuarzos.	78
Figura 45. Toba vítrea, altamente alterada se observan vesículas y no tienen cuarzo.	79
Figura 46. Toba alterada, se puede observar la atracción del imán lo que indica que tiene magnetita.....	80
Figura 47. Travertino de la zona de estudio, se ven el bandeamiento o láminas característico de este tipo de rocas.....	80
Figura 48. A) Preparación del equipo para medición. B) y C) algunos datos obtenidos en el manantial principal en el muestreo.	93
Figura 49. A) Muestreo en LA. B) Tomada de datos en punto hidrotermal cercano al lago. C) Tomada de datos en las escorrentías del punto hidrotermal cerca del lago artificial.....	95
Figura 50. A) Toma de datos en las terrazas cercanas a MP. B) Toma de datos en las terrazas de QS (Muestra 19). C) Concreciones de hierro que influyen en el dato de la muestra 9, debido a su alta conductividad y elevada resistividad.	97
Figura 51. Se observa una de las zonas de transición donde se da la precipitación de carbonato, al fonde (flecha blanca) señala el manantial principal donde el pH es un poco ácido, en comparación de las zonas distales donde el pH esta entre neutro y alcalino.	98
Figura 52. Muestra de Ellobium Stagnalis, es una especie de zonas de manglares, en el lodo y zonas intermareal.	102
Figura 53. Muestra de Melanoides Tuberculata, especie de agua dulce.....	103
Figura 54. Muestra de Potamocorbula Amurensis. Es una almeja de aguas saladas y una especie invasora.	104
Figura 55. Modelo conceptual general de un sistema hidrotermal abierto termógeno, adaptado al contexto para el caso de El Salitral modificado de (Ballard, 1999).	111

Índice de Tablas

Tabla 1. Formas fósiles en travertino. (Extraído de Pentecost, 2005)	39
Tabla 2. Tabla de nomenclatura, para la ubicación de puntos de control de las litofacies.	59
Tabla 3. Tabla de datos del muestreo puntual de las aguas en campo.	92

Capítulo 1 Introducción

1.1. Descripción del Problema

El travertino es una roca sedimentaria de tipo bioquímica, que se forma principalmente por la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), en ambientes superficiales, especialmente en zonas de emanación de aguas con alto contenido de carbonato. Este tipo de roca se desarrolla cuando el agua, al salir a la superficie, pierde dióxido de carbono (CO_2), lo que provoca la precipitación del carbonato. Geológicamente, el travertino suele estar asociado a regiones con actividad tectónica volcánica activa, fallas geológicas y circulación de aguas termales. El travertino puede formar terrazas escalonadas, depósitos estratificados o estructuras porosas. Muchas veces, contiene restos de plantas, algas que ayudan a su formación, actuando como núcleos de precipitación.

A pesar del conocimiento general sobre el origen de los travertinos, en Panamá específicamente en la zona de La Chorrera donde se realiza la investigación sobre esta roca, aún existen vacíos en la comprensión precisa de los factores que controlan su formación como el contexto geológico, composición química del agua y la influencia biológica.

Uno de los principales problemas es que los mecanismos de precipitación del travertino son altamente variables y dependen de múltiples condiciones locales o región en que se forma. Esta complejidad nos dificulta la interpretación geológica de los depósitos, especialmente cuando se pretende reconstruir paleoambientes o identificar procesos geodinámicos pasados. Así mismo, la falta de estudios detallados en determinadas regiones limita su aprovechamiento científico y potencial económico.

Por tanto, se requiere una investigación más profunda y sistemática de los procesos geológicos que intervienen en la formación de travertinos; esto permitirá entender mejor su origen, evolución y relevancia en contextos tectónicos, así como su utilidad como registros de cambios climáticos y actividad hidrotermal.

1.2. Justificación del problema

Los estudios de los travertinos son fundamental para comprender procesos geológicos vinculados a la actividad hidrotermal, la tectónica activa y la evolución del paisaje. Estos depósitos de carbonato de calcio ofrecen información valiosa sobre las condiciones ambientales del pasado, a través del análisis de parámetros como la temperatura, composición del agua y la actividad volcánica. Además, estos estudios contribuyen al entendimiento de la interpretación entre procesos geológicos y biológicos.

A pesar de su importancia, en muchas regiones del mundo, incluyendo Panamá, los travertinos no han sido suficientemente estudiados desde el punto de vista geológico. Esta falta de conocimientos limita la identificación precisa de zonas activas, la reconstrucción de condiciones paleoambientales y la interpretación de la dinámica interna de la tierra.

Esto nos lleva, a la investigación de los registros y exploraciones que se podían obtener de este tipo de roca en Panamá, como zona específica de estudio. El cual, presenta información casi escasa de este, donde solo escasos reportes de exploración como el de Recchi y Miranda (1977), han llegado a identificar presencia de carbonatos en el país. Esta falta de información resalta la necesidad de realizar estudios sobre los ambientes formadores de travertino en Panamá.

Por ello, investigar la formación y características de los travertinos permite no solo ampliar el conocimiento científico sobre los ambientes sedimentarios y procesos hidrotermales. De igual

manera, este tipo de estudios puede apoyar a la conservación de patrimonios geológicos y naturales, que muchas veces están asociados a estos depósitos.

1.3. Zona de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la Provincia de Panamá Oeste, Distrito de La Chorrera, corregimiento de Playa Leona, comunidad el Salitral con coordenadas UTM específicas 632964 - 973627. (Figura 1). Otras comunidades conocidas del área como La Mitra y Peña Blanca pueden utilizarse como referencia para una mejor ubicación y reconocimiento.

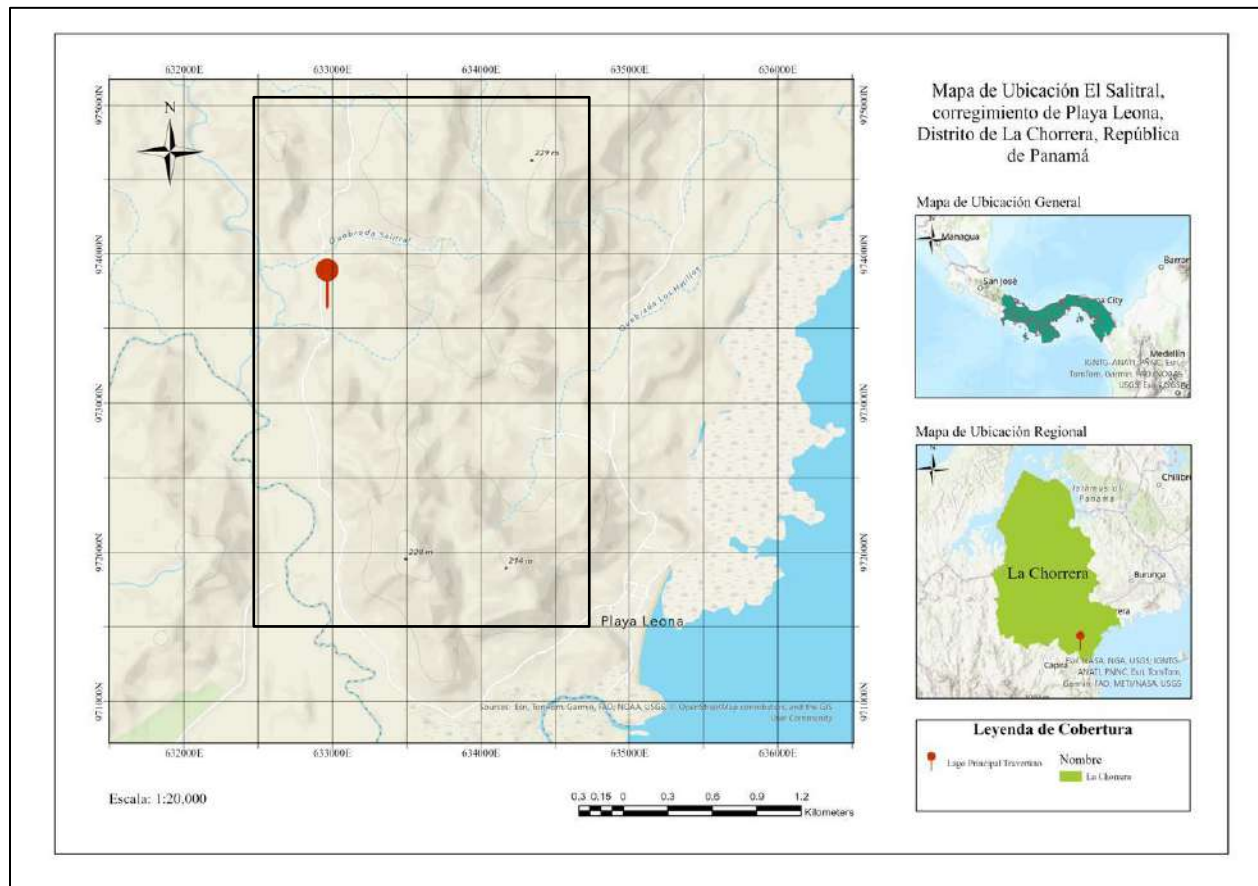


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, El Salitral de la Mitra de la Chorrera. (Mapa generado con ArcGIS Pro).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Describir y delimitar la ocurrencia de carbonatos terrestres en El Salitral de la Chorrera, provincia de Panamá Oeste por medio de mapeo geológico, análisis químicos, petrográficos; para reconocer las características de los carbonatos terrestre del lugar de estudio.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Clasificar los carbonatos continentales que se encuentren en la zona, y de acuerdo con la misma realizar una categorización de las litofacies correspondientes.
- Realizar análisis químicos para conocer la composición de los carbonatos terrestres.
- Uso de la sonda multiparámetros para conocer la composición química del agua.
- Realizar caracterización biológica de los gasterópodos que se presentan en la zona.
- Comprender el posible origen de la precipitación de los carbonatos no marinos.
- Elaborar mapa geológico de la zona a través de software de Sistemas de información Geográficas (ArcGIS Pro y Qgis).

1.5. Antecedentes

La formación de carbonatos continentales, como los travertinos, están frecuentemente asociados al hidrotermalismo; Según (Merida, 1973) Panamá cuenta con tres variedades de fuentes: las hipertermales, las isotermas y las aguas isotermas saladas; las últimas mencionadas se encuentran en el Barrero y El Salitral, zonas cercanas al lugar de estudio; por lo tanto, se tomarán como referencia en cuanto a las temperaturas de las aguas (27°C). De igual modo, en dicho informe se menciona que estos 2 puntos estudiados se caracterizaban por ser isotérmicos con altas concentraciones de cloruro de sodio y carbonatos.

Posteriormente, en el año 1977 Recchi y Miranda, realizaron un estudio de calizas en la zona de Guaniquito Tonosí y dentro de su informe mencionaron a los depósitos cuaternarios en el cual hacen referencia de carbonatos terrestres, específicamente de travertinos, los mismos planteaban que los travertinos se encontraban generalmente depositados en la mayoría de las quebradas menores; las cuales provenían desde la parte alta con caliza arrecifal. De igual forma, mencionan que la precipitación y acumulación del carbonato de calcio se debe a la gran evaporación que se da en el área.

1.6. Hipótesis

Los carbonatos terrestres que se encuentran en la zona podrían ser clasificados como travertinos, los cuales se forman por una falla geológica que se encuentra cerca del sitio de estudio, dicha falla ha dado paso a la evasión de CO₂ permitiendo la precipitación de los carbonatos, por otra parte, también se considera que el hidrotermalismo de la zona está asociado a un sistema hidrotermal profundo y guarda relación a una remanencia volcánica.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Origen y Definición de los Travertinos

El término travertino proviene de lapis tiburtino, una roca que se utilizaba para la mampostería desde la época clásica que se extraía en Tívoli, antiguamente conocida como Tibur (Pentecost A, 1993). La ubicación de las canteras originales, posiblemente agotadas por la explotación, es desconocida (Pentecost A. &., 1994). La palabra travertino se utilizó originalmente para referirse a los carbonatos de manantiales termales en las cercanías de Roma, pero el término se amplió para incluir todos los depósitos de carbonato de calcio formados por manantiales (Pentecost A, 1993).

Por otro lado, el término tufa se utilizaba para cenizas volcánicas y carbonatos de agua dulce que son más blandos y poco consolidados de alta porosidad. (Pedley, 2009). Las expresiones en inglés “tuff” y “tufa” provienen del término de tophus que originalmente fue utilizado por Plinio para describir una roca porosa (Glover & Robertson, 2003; Pentecost, 2005). No obstante, *tuff* se utiliza para un contexto volcánico, mientras que *tufa* se aplica para los carbonatos de agua dulce. Algunos autores como Pentecost (1994, 2005) prefieren el término travertino metéogenos para referirse a las tufas. Es importante mencionar que el término utilizado en español para designar depósitos porosos de carbonato de calcio es “toba calcárea” (Luis Carcavilla, 2019).

Por otra parte, el término travertino termogénicos se refiere a los depósitos más duros y resistentes y que tienen relación con aguas termales. (Pentecost, 1993,1994, 2005). Aunque más adelante se mencionarán las clasificaciones del travertino, es importante recalcar que algunos autores también se enfocan en las temperaturas de las aguas para hacer una clasificación. Por ejemplo, Glover y Robert (2003) hacen referencia de que los manantiales de aguas frías son

nombrados tobas (travertinos metéogenos) y los manantiales con temperaturas superiores a 20 °C se les conoce como travertino, un término más habitual para depósitos relacionados con aguas termales.

2.1.1. Travertinos Metéogenos o Tobas

De acuerdo con Pedley (1990), estos carbonatos de agua dulce se caracterizan por ser altamente porosos o esponjosos, y son ricos en crecimientos microfíticos y macrofíticos (asociados al desarrollo de las plantas), hojas y tejidos leñosos. El autor también señala que la vegetación asociada a los depósitos de agua fría se conserva como moldes, resultado de la precipitación de espatos y micrita sobre las plantas vivas. Esto indica que los carbonatos con bajo contenido de magnesio (Mg) son producto de una mediación biológica directa o indirecta.

El CO₂ de los travertinos metéogenos se origina en el suelo y las atmósferas superficial (epigeas), lo que favorece la formación de depósitos principal en terrenos calcáreos (Pentecost A. &., 1994). Pentecost (2005) resalta que, aunque estos travertinos se encuentran en aguas frías, en algunos casos el agua puede infiltrarse profundamente en el subsuelo, calentarse y emerger como aguas termales, aunque manteniendo su origen meteórico, es decir, con el dióxido de carbono proveniente de fuentes subterráneas en contacto con rocas carbonatadas.

Pentecost (1995) menciona que los depósitos meteógenos activos se forman en aguas en equilibrio con la atmósfera del suelo, lo que resulta en concentraciones de carbono inorgánico disuelto total (TDIC) en un rango de 1-7-(10) mM/L. Asimismo, enfatiza que, aunque las temperaturas del agua del manantial suelen ser bajas, pueden ser altas si el agua ha circulado a profundidad; a estos casos se les denomina termometeógenos, un término que puede no ser del

todo adecuado por sugerir un origen termal puro. Aunque el agua de estos manantiales suele ser tibia o incluso caliente, esto no siempre se cumple (Pentecost, 2005).

Finalmente, es importante mencionar que existen dos tipos de travertinos meteógeno: los **evasivos**, donde la pérdida del CO₂ favorece la deposición de travertino, y los **invasivos**, donde los procesos inversos conducen a la precipitación. Ambos pueden subdividirse en **meteógenos ambientales**, los más frecuentes, formados en aguas a temperatura ambiente, y los **meteógenos superambientales**, asociados a aguas a temperaturas mayores debido a la circulación profundidad. No obstante, los términos ambiental y superambiental pueden emplearse sin hacer referencia a la clasificación evasivo/invasivo, ya que la mayoría de meteógenos son de origen ambiental. (Pentecost, 2005).

2.1.2. Travertinos Termógenos

Este tipo de travertinos presentan una baja contribución meteórica, ya que la mayor parte del CO₂ provienen de procesos térmicos, el dióxido de carbono de origen térmico se disuelve en aguas subterráneas bajo presiones significativas (Pentecost, 2005). Como consecuencia, estas altas concentraciones de CO₂ permiten disolver grandes volúmenes de rocas carbonatadas (Pentecost A. &., 1994). Posteriormente, estas soluciones ascienden y se manifiestan en superficie como manantiales de temperaturas elevadas y con burbujeo activo, constituyendo un ciclo hidrotermal (Pentecost A, 2005).

Las tasas de desgasificación en los depósitos de aguas termales suelen ser rápidas, lo que genera texturas características y una composición isotópica estable del carbonato entre un -4‰ y +8‰. Este enriquecimiento en $\delta^{13}\text{C}$ a menudo reflejar el carbono pesado liberado durante la descomposición de calizas marinas. No obstante, contribuciones significativas de CO₂ del manto,

pueden producir travertino empobrecido en ^{13}C . Cabe resaltar que estos travertinos tienen una distribución restringida, ya que se localizan principalmente en regiones de actividad volcánica reciente (Pentecost, 1994).

Friedman (1970) señaló que la deposición de travertinos ocurre cuando el agua emerge de los manantiales y se desplaza en forma láminas delgadas, depositándose a medida que se enfría y pierde CO_2 . Por su parte, (Pentecost, 1994) indica que el CO_2 puede provenir de diversas fuentes, como la hidrólisis, la oxidación de carbono reducido, la descarbonatación de cal y, en zonas volcánicas directamente del manto. Pentecost (1995) coincide en que estos depósitos se asocian a fallas profundas, vulcanismo reciente, metamorfismo y con frecuencia, a otros conjuntos de minerales hidrotermales.

A medida que las temperaturas disminuyen hacia condiciones superficiales, la vida en las aguas se vuelve más abundante. La química del agua, influenciada por la temperatura, determina los organismos que pueden desarrollarse en el manantial (Chafetz & Folk, 1984). El modelo de precipitación de travertino en fuentes termales biológicamente activas, propuestos por Chafetz y Folk (1984), describe que cerca del orificio de descarga hay ausencia de organismos, lo que favorece la acumulación de precipitados inorgánicos. A medida que el flujo se aleja del orificio y las condiciones ambientales mejoran, primero colonizan las bacterias, seguidas de algas verde azuladas y luego taxones superiores de plantas. Este patrón es relevante, ya que cerca de la salida del manantial predomina la formación inorgánica de travertino por desgasificación, mientras que la precipitación orgánica adquiere mayor importancia con la distancia. Aunque las aguas termales suelen mezclarse con un porcentaje de las meteóricas, su alto contenido de carbono inorgánico disuelto total (TDIC) y composición en oligoelementos permiten identificarlas (Pentecost, 1995).

2.2. Proceso Químico de formación del Travertinos

Los materiales calcáreos como calcita, aragonito y dolomita forman depósitos de travertinos a partir de soluciones acuosas que alcanzan un estado de ligera sobresaturadas con respecto a los minerales. La sobresaturación puede producirse por: (1) la pérdida de dióxido de carbono (CO₂) de la solución al entrar en contacto con la atmósfera, (2) la mezcla de dos soluciones acuosas químicamente diferentes e incompatibles, o (3) la disminución de CO₂ debido a la actividad fotosintética (Fench & Barnes, 1979).

Fench y Barnes (1979) también señalan que la evaporación no constituye un mecanismo significativo en la formación de travertino. Esta afirmación fue corroborada mediante estudios de isotopos estables hechos por Friedman (1970), quien determinó que la evaporación del agua es baja e insuficiente, y que la mayor parte de la precipitación de travertino se debe a la pérdida de CO₂. Por su parte, Pentecost (2005), indica que la formación de travertinos resulta de la desgasificación de aguas subterráneas ricas en dióxido carbono, las cuales generalmente contienen concentraciones de calcio superiores a 2 mmol/L.

En la siguiente ecuación: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ se representa el proceso de disolución: un agua subterránea con capacidad de formar travertino es aquella en la que el CO₂ disuelto reacciona con el agua formando ácido carbónico (H₂CO₃), el cual ataca las rocas carbonatas y genera una solución enriquecida en iones de calcio (Ca²⁺) y bicarbonato (HCO₃⁻). La precipitación del travertino ocurre cuando se invierte este equilibrio, liberándose CO₂ al entrar la solución en contacto con una atmósfera con una presión parcial de CO₂ menor. Algunos travertinos también pueden formarse por la reacción entre el dióxido de carbono atmosférico y aguas subterráneas hiperalcalinas, como se muestra en la ecuación $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (Pentecost, 2005).

2.3. Mineralogía de los travertinos: Aragonito y Calcita

El travertino está constituido principalmente por dos polimorfos principales del carbonato de calcio: el aragonito y la calcita. La formación de estos minerales varía en función de la composición química del agua, la temperatura, la presión y la tasa de desgasificación de CO₂, factores determinantes para reconocer sus características físicas, químicas y cristalinas (Pentecost, 2005). Estos polimorfos representan más de la mitad del volumen del carbonato total que se encuentra en la naturaleza (Suguio, 1990).

Pentecost (2005) indica que el aragonito es menos estable que la calcita a temperatura ambiente y se encuentra con mayor frecuencia en travertinos asociados a aguas termales. Asimismo, Pentecost (1993) señala que este polimorfo está vinculado a depósitos de manantiales calientes. Por su parte, Fouke et al. (2000) establecen que a temperaturas superiores de 44 °C precipita predominantemente aragonito; entre 30 a 43 °C coexisten ambos polimorfos (coprecipitación), mientras que por debajo de 30 °C solo precipita calcita.

Folk (1994) identificó que los principales factores que controlan la formación de aragonito y calcita son la temperatura y la relación Mg/Ca del agua. Según sus estudios, en el rango de 40-45°C se formaría aragonito independientemente de la composición del fluido, mientras que en aguas más frías y ricas en calcio predomina calcita. Adicionalmente, si la relación Mg/Ca es mayor a 1:1 (molar), se favorece la precipitación de aragonito sin importar que temperatura; en caso contrario, cuando Mg/ Ca es menor a 1:1, se forma calcita.

Respecto a la morfología cristalina, Pentecost (2005) menciona que los cristales de calcita en travertinos suelen ser anhedrales, mientras que los cristales euhédricos son menos comunes y se asocian a recubrimientos de cavidades en travertinos recientes. Por otro lado, el aragonito rara vez presenta caras cristalinas bien desarrolladas, y los granos suelen ser de tan reducido que dificulta su descripción incluso bajo microscopia electrónica.

Los travertinos con predominio de aragonito generalmente presentan alta porosidad y textura suave (Pentecost, 2005). Este mineral suele aparecer como cristales individuales o en agregados radiados, con hábitos fibrosos y estrellados característicos de depósitos recientes (Khoury et al., 1984). Kitano (1962) destaca que la presencia de iones de estroncio favorece la formación de aragonito, mientras que los iones de bario promueven la precipitación de calcita. No obstante, los factores más importantes para la formación de estos polimorfos en manantiales termales son: La temperatura, las concentraciones de iones de magnesio y sodio, el contenido de CO₂ y la velocidad de precipitación de carbonato de calcio. Cabe resaltar que, según (Pentecost, 2005), el hierro presente en el travertino es de origen autóctono, el cual se precipita como óxido férrico hidratado una vez que los iones ferrosos de las aguas subterráneas entran en contacto con la atmósfera.

2.4. Morfología de los Travertinos

La morfología de los depósitos de travertino, junto con la composición geoquímica de las aguas de los manantiales, es fundamental para determinar la naturaleza de cada depósito. Además, la morfología controla la existencia y abundancia relativa de subambientes, como charcas o superficies con fuertes pendientes, los cuales favorecen diferentes tipos de deposición orgánica o inorgánica (Chafetz & Folk, 1984).

2.4.1. Travertinos en Terrazas o Presas

Las terrazas se diferencian de las cascadas por presentar una acreción vertical localizada, lo que genera un embalse de agua en forma de pozas, estanques o lagos. Estas estructuras suelen formarse en serie a lo largo de los flujos de agua, a menudo con un patrón regular y predecible. Las distancias entre terrazas sucesivas varía desde pocos centímetros hasta de

un kilómetro, dependiendo principalmente de la pendiente del lecho del arroyo o caudal (Pentecost, 2005). A su vez, el travertino suele formar un borde elevado alrededor de cada poza, resultado de la precipitación de calcita cuando el agua fluye por el borde y desciende por la cara vertical de la terraza (Chafetz & Folk, 1984).



Figura 2. Serie de terrazas de travertino. Tomado de (Pentecost, 2005).

2.4.2 Travertinos en Cascadas

Pentecost (1994) describe dos tipos de cascadas en zonas activas: (1) Los depósitos de forma erosiva, de sección paraboloide y generalmente estriada, cuya morfología depende de la trayectoria del flujo de agua y son más evidentes en caídas verticales de gran altura; y (2) cascadas de acreción indefinida, que se forman cuando la tasa de deposición supera a la de erosión. Este último tipo ocurre principalmente en rocas escarpadas donde la deposición es dominante. Pentecost

(2005) señala que estos depósitos pueden presentarse a diversas escalas y construir características importantes en sistemas de deposición de travertinos.

Asimismo, los travertinos termógenos, pueden desarrollarse en laderas y alcanzar morfologías de acreción extremas. Es frecuente la formación de cuevas detrás de las cascadas, donde el travertino se acumula en acantilados dejando un espacio vacío en la parte posterior. Estas estructuras pueden formarse tanto en sistemas termógenos como metéogenos.



Figura 3. Vista frontal del sistema de cascadas de travertino, mostrando las cuevas formadas detrás de la cortina de agua. Esta morfología es característica de depósitos de travertinos en ambientes de alta energía. Tomada de (Baltakova, 2023)

2.4.3 Costras Fluviales

Las costras fluviales incluyen una serie de depósitos superficiales generalmente en arroyos pequeños y grandes ríos. Pueden desarrollarse sobre diversos sustratos y presentan dos tipos morfológicos principales: formas lisas y laminares, o formas nodulares y coraloides. Aquellas costras que se desprenden y desarrollan alrededor de núcleos de rocas o vegetación se denomina oncoides, los cuales pueden presentar morfología esféricas o esferoidales. Cabe destacar que los oncoides esferoidales oblatos y prolatos son comunes, y su forma depende generalmente de la naturaleza del núcleo (ramas, guijarro o conchas) y de las profundidades del agua (Pentecost, 1994).

El término “oncoides” se refiere específicamente a los guijarros de acreción; existen otros tipos de horizontes de suelo y sedimentos marinos. Estas costras fluviales se encuentran relacionadas con depósitos de cascadas y terrazas, y son comunes a lo largo de cauces fluviales en regiones áridas. Adicionalmente, en algunos casos, los travertinos termales forman montículos de bajo relieve alrededor del orificio del manantial (Pentecost, 1994; Pentecost, 2005). Los oncoides aumentan de tamaño activamente mediante la precipitación de carbonatos en su superficie, inducida por la actividad microbiana, por lo que diámetro suele incrementarse en dirección aguas

abajo, aunque rara vez supera los 60 cm (generalmente entre 10 y 40 cm) (Pedley, 2009).



Figura 4. Costras fluviales. Tomado de (Pedley, 2009.)

2.4.4 Depósitos Lacustres

Los lagos con aporte fluvial forman parte de los sistemas sedimentarios que pueden favorecer la formación de carbonatos. Algunos de estos depósitos carbonatados se clasifican en travertinos lacustres, asociados principalmente a procesos de desgasificación del CO_2 . No obstante, debido al lento flujo del agua en los lagos, la evasión de CO_2 es limitada. Por ello, otros procesos

como la fotosíntesis y la evaporación adquieren relevancia como mecanismo de precipitación de carbonatos (Pentecost, 2005).

Según Pentecost (2005), los depósitos de travertinos lacustres se concentran generalmente en regiones litorales someras, donde manantiales sumergidos crean ambientes propicios para precipitación. En estas zonas, la evaporación y la fotosíntesis desempeñan un papel importante en la precipitación de carbonatos. Por lo contrario, en zonas más profundas estos procesos son menos efectivos, lo que resulta en la acumulación de sedimentos finos como margas lacustres, que suelen intercalarse con capas de travertinos. Evidenciando la interacción entre ambientes someros y profundos.

Pentecost (1994) menciona que los travertinos se pueden encontrarse en lagos con salinidades que están entre <1 y $> 300\%$ TDS, y señala que tanto la evaporación como la desgasificación son factores importantes para la formación de travertinos en distintas zonas, Sin embargo, el autor se opone al uso del término “travertino salino” debido a la dificultad para

establecer límites precisos de salinidad.



Figura 5. Depósito lacustre, se puede observar en el fondo de la imagen la pared de travertino producida por la precipitación de carbonato de calcio, producto de procesos de evaporación y actividad fotosintética. Tomado de (Pedley, 2009).

2.4.5 Crestas de Fisuras

Estas estructuras se generan por las acumulaciones alrededor de los orificios de manantiales y a lo largo de fracturas como fallas y diaclasas. Las crestas pueden alcanzar entre 1 a 15 metros de alturas y hasta 0.5 Km de longitud (Pentecost, 1994). Es frecuente encontrar rocas altamente porosas en las superficies fracturadas a lo largo y en los extremos de la cresta, presentando capas delgadas e irregulares paralelas a la morfología de la superficie de deposición.

Las capas suelen tener espesores de 2 a 3 Cm y son notablemente continuas a lo largo de la cresta. En ocasiones, están compuestas de capas tanto de plantas incrustadas y costras inorgánicas, características que permiten compararlas con depósitos de cascadas. Generalmente, el travertino en las crestas de fisuras presenta textura corrugada y suelen formarse microterrazas

similares a las descritas en el apartado 2.4.1, aunque a una escala reducida en todas las dimensiones y suelen formarse en superficies inclinada (Chafetz & Folk, 1984).



Figura 6. Travertino de cresta de fisura. Esta vista transversal muestra la cresta fracturada a través de la cual fluyó la resurgencia termal durante los periodos de actividad. Extraído de (Pedley, 2009).

2.4.6 Depósitos Palustres

Estos depósitos se forman en relieves bajos con alto contenido de carbonato de calcio, generalmente en entornos pantanosos caracterizados por flujos lentos y vegetación abundante. Un aspecto importante es que se desarrollan a partir de cojines de hierba y musgo, y suelen encontrarse mezclados con margas y creta, siendo ricos en fósiles, especialmente moluscos (Pentecost, 1994).

Los depósitos palustres están presentes en varias regiones del mundo, pero los sistemas activos suelen asociarse a zonas pobladas donde el drenaje de los humedales y la disminución del nivel freático han provocado su desaparición. Son depósitos blandos y margosos, lo que explica su bajo relieve y tendencia al enterramiento por sedimentos. Esta característica hace que sean difíciles de identificar sin la realización de perforaciones (Pentecost, 2005).



Figura 7. Depósito palustre de travertino que consiste en material clástico suelto que se acumula en depresiones y pequeños montículos de musgos.

2.5 Litofacies de los Travertinos

2.5.1 Costra Cristalina

Estas formaciones se desarrollan en zonas que tienen un drenaje abierto, generalmente en laderas empinadas, se caracterizan por ser depósitos densos, de color blanco y laminados, donde se observan cristales en forma de pluma orientados perpendicularmente a la superficie

depositación, atravesados por laminas micríticas delgadas y espaciadas compuestas por agregados en forma de aguja. Estas láminas dan una apariencia corrugada o de microterrazas (Riding, 1992).

Estas costras suelen extenderse hacia otras litofacies, como tapetes de micritas, arbustos y balsas delgadas similares a el papel (Marcelle Marques Erthal, 2016). Es importante mencionar que este tipo de litofacies refleja una alta energía deposicional influenciado por procesos abióticos (Mancini, 2021).



Figura 8. En la imagen se observa, las costras cristalinas señaladas por la flecha. Tomado de (Capezzuoli, 2014).

2.5.2 Arbustos

Esta litofacies es una de las más abundante y se forma en depósitos lacustre someros, a menudo en ambientes biológicamente hostiles, como lagos alimentados por manantiales ricos en H_2S o sulfuro de hidrogeno (Chafetz & Folk, 1984). Así mismo, los travertinos arbustivos se forman en charcas de terrazas, pero suelen ser más densos y gruesos en depresiones y afloramientos

(Riding, 1998). Chafetz y Folk (1984) señalan que es poco común encontrar estos depósitos en montículos aterrazados y montículos inclinados. Además, los arbustos se forman en ambientes de baja energía (Mancini, 2021). Presentan una amplia variedad de morfologías, tamaños y agrupación, con alturas que suelen tener oscilan entre 1 y 3 cm, desde formas microscópicas incipientes de 1 mm hasta estructuras que superan los 8 cm. Un rasgo característico es que todos los arbustos de una misma capa se inclinan en la misma dirección (Chafetz & Folk, 1984).



Figura 9. Litofacies de arbustos bien desarrollado sobre finas capas de lodo micrítico. Tomado de (Capezzuoli, 2014).

2.5.3 Pisolitos

Estas estructuras son densas, pueden ser esféricas y presentan una gran variedad de tamaños, desde pocos milímetros hasta 20 cm de diámetros. Su superficie es lisa o rugosa, a menudo cubierta por protuberancias irregulares o formas similares a arbustos, siendo estas últimas más comunes en tamaños mayores. Generalmente, los pisolitos se encuentran en

depresiones someras, desde pocos centímetros hasta 10 metro de profundidad, y suelen estar asociados a manantiales termales activos o inactivos (Risacher & Eugster, 1979).

Existen dos tipos principales de pisolitos en los travertinos, diferenciados por su presencia, tamaño o forma, estructura interna y origen: los **pisolito bacterianos**, formados por colonias bacterianas dispuestas radialmente encajadas en espátos de calcita, y los **pisolitos inorganicos**, resultante de la precipitación inorgánica de carbonato. Ambos contienen calcita de bajo contenido de magnesio, aparentemente original y sin evidencia de neomorfismo (Chafetz, 1983).

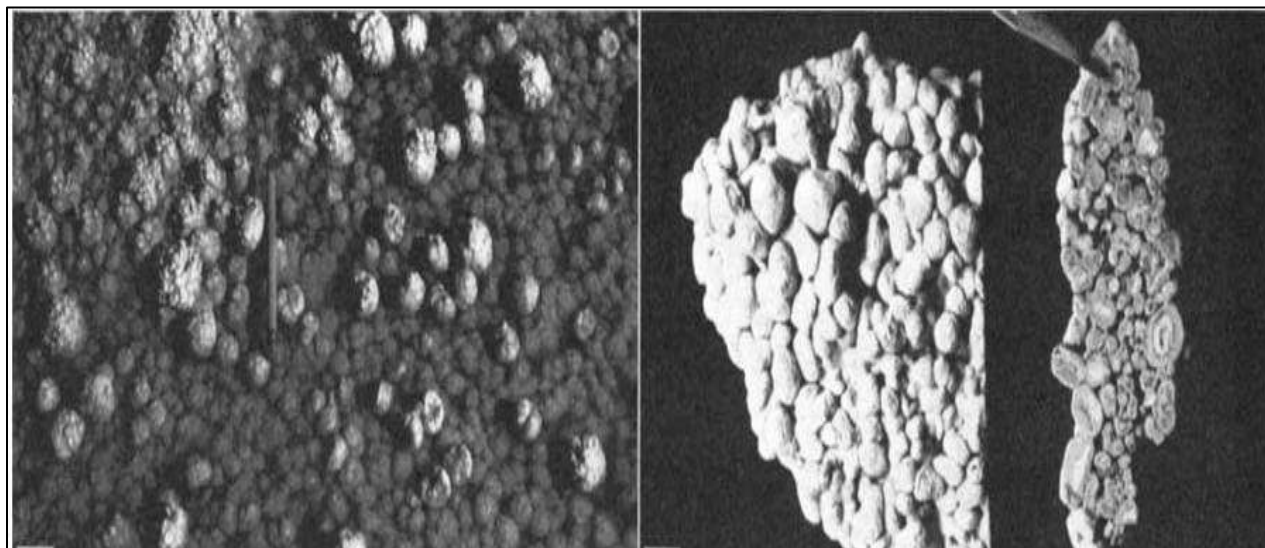


Figura 10, A). Pisolito cementado bajo el agua, donde emergen y se ha formado sobrecrecimiento arborescente. B). Costra compuesta de pisolitos cementados. Tomado de (Risacher, 1979).

2.5.4 Balsas Finas Como El Papel

Estas son capas cristalinas delgadas y quebradizas que se precipitan sobre la superficie del agua (Riding, 1998), favorecidas por la desgasificación de CO₂ en las aguas estancadas (Folk, 1985). Están compuestas principalmente por cristales de calcita y aragonito, con una extensión limitada a escala de metro y suelen ubicarse en laderas empinadas de las terrazas y cerca de los orificios de los manantiales termales. Las concentraciones densas de estas balsas suelen asociarse

a burbujas de gas recubiertas, y la coloración (blanco o marrón) depende de la composición química de las aguas termales (Özkul, 2002).



Figura 11. Balsas de calcitas, flotan sobre la superficie del agua de una poza termal, se puede apreciar que son delgadas como el papel. Tomado de (Gandin, 2014).

2.5.5 Travertino Laminado

Este tipo de travertino representan sedimentos formados en el fondo o en la superficie de cuencas o pozas muy someras, así como en los márgenes de arroyos o riachuelos de poca profundidad en áreas planas. Las condiciones fisicoquímicas del agua y las tasas de evaporación son factores críticos que regulan el desarrollo de las colonias bacterianas y, en consecuencia, la cantidad de carbonato precipitado.

La preservación de las comunidades microbianas que crecen en el fondo de estas pozas generalmente cubiertas por una capa muy delgada de agua caliente permite la sedimentación de

carbonato microcristalino. Este material es atrapado por filamentos fijados cohesivamente por sustancias poliméricas extracelulares (EPS), lo que puede llegar a enterrar los tapetes microbianos y endurecerse rápidamente, dando como resultado costras laminares y flexibles (Gandin, 2014). Esta litofacie esta asociada entornos deposicionales como pozas, estanques o pendientes y se forman en ambientes con influencia biológica que puede ser: mediana, baja y alta. Es importante mencionar que, la litofacies de depósito laminado forma cuerpos tabulares, cóncavos o convexos lenticulares, de hasta 40 m de espesor. Secundariamente, aparece como intercalaciones de centímetros a metros de espesor dentro de la asociación de litofacies de arbusto pero también puede estar presente dentro de la litofacies de costra cristalina. (Mancini, 2021).

En esta litofacie también podemos encontrar estromatolitos, los cuales se forman por tapetes bacterianos son laminitas planas compactas y enrolladas con espacios interlaminares (Gandin, 2014). Suelen presentar espesores que varían desde unos pocos milímetros hasta varios metros y se depositan en manantiales termales o filtraciones de aguas subterráneas (Pentecost,

2005).



Figura 12. A) Se aprecian lamina planas de carbonatos superpuestas irregularmente. B) Se aprecias los estromatolitos, asociados a la litofacies de travertino laminado (Gandin 2014).

2.5.6 Burbujas de Gas Revestidas

Comunes en ambientes de formadores de travertino, como las piscinas de terrazas, estas estructuras se originan por la actividad microbiológica en los sedimentos de la base de las piscinas. Las burbujas quedan atrapadas bajo las balsas debido a la desgasificación de CO_2 y entre la vegetación, recubriéndose rápidamente de carbonato de calcio. Esta litofacies suele asociarse con costras cristalinas, balsas delgadas y de travertinos de caña (Özkul, 2002). En los afluentes de manantiales termales, los sedimentos y aguas superficiales puede contener gran cantidad de burbujas de gas, con tamaños entre 2 a 3 mm (Chafetz & Folk, 1984). Estas litofacies se forman en ambientes de aguas tranquilas y de baja energía (Suhieb, 2024)



Figura 13. Burbujas de gas revestidas (Señalada con la flecha), alrededor se observa lodo calcáreo microcristalino. Tomado de (Gandin, 2014).

2.5.7 Travertino De Caña

Se forma en zonas donde hierbas y plantas actúan como barrera de flujo para las aguas, estabilizando los sedimentos y permitiendo que el material vegetal se recubra de carbonato finamente cristalino (Riding, 1998). Generalmente se depositan en charcas pantanosas, montículos y canales autoconstruidos, mientras que cañas, hiervas y plantas acuáticas similares crecen en áreas distales donde las aguas termales se enfrían y diluyen por influencia de las aguas lluvia (Özkul, 2002).

Esta litofacies suele asociarse a balsas delgadas como el papel y ambientes aguas estancadas y poco profundas, indicando un ambiente lacustre-palustre (Riding, 1998). Además, los gasteropodos y carofitos suelen estar vinculados a esta litofacies (Mancini, 2021). El contenido de

materia orgánica y la relación de poros en el travertino de caña son mucho mayores que en otro tipo de litofacies (Mehmet Özkul, 2002).

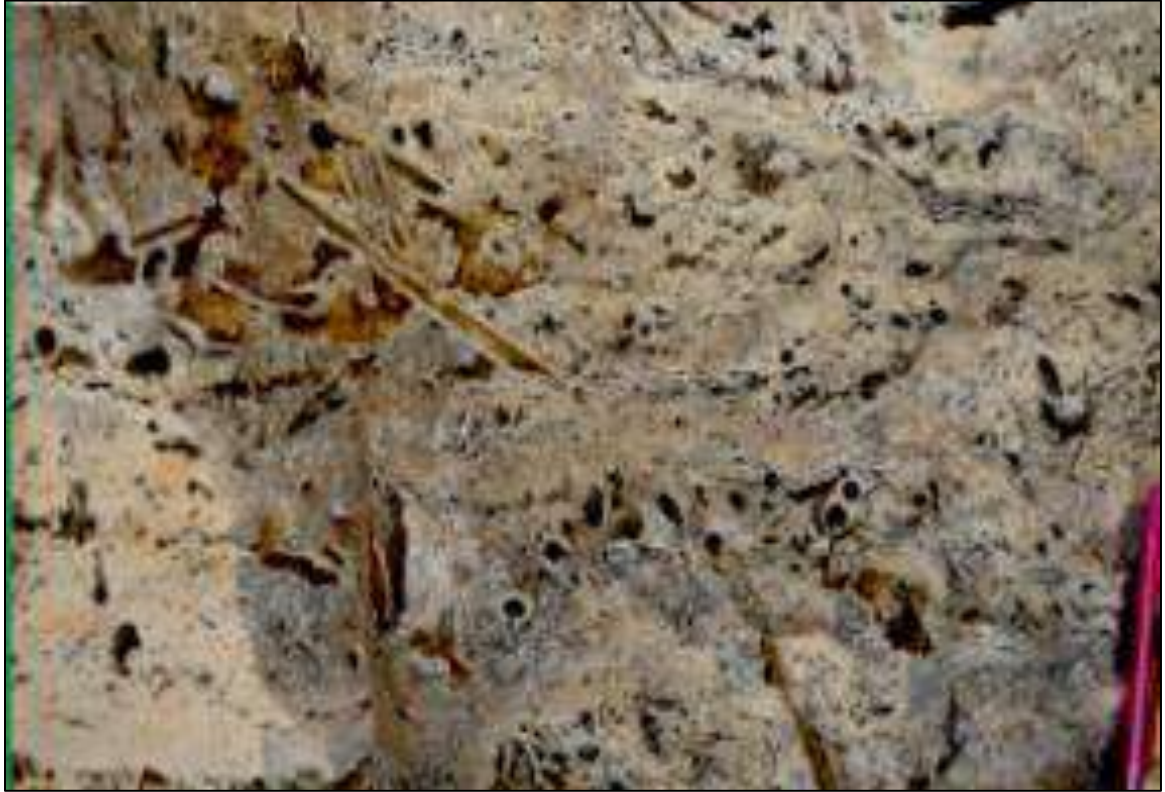


Figura 14. Travertino de caña., se observa los poros y la materia orgánica incrustada. Tomado de (Mancini, 2021).

2.5.8 Litoclastos

Compuestos por fragmentos de travertino angulosos a subredondeados de diferentes tamaños, resultantes de la erosión de laderas superiores y derrumbes de cascadas y acantilados (Özkul, 2002). El travertino litoclástico suele formar capas de decenas de Centímetros de espesor, intercaladas con travertino de color más claro en entornos de charcas y marismas. Además, contiene una proporción elevada de juncos y otros fragmentos vegetales, gasteropodos, ostracodos y material limo cuarzoso (Riding, 1998).



Figura 15. Travertino litoclástico Se observan los fragmentos angulosos y subredondeados característicos de esta litofacies. Tomado de (Riding, 1998)

2.5.9 Paleosuelos

Las aguas termales provocan una rápida exposición de los travertinos a condiciones subáreas que lo modifican, entre los principales factores de alteración se encuentran las aguas lluvias, la desecación y las actividades biológicas asociadas a la formación de los suelos, los componentes antes mencionados producen la formación de paleosuelos los cuales pueden ser calcáreos y arcillo limoso de color marrón, anaranjado o gris oscuro (Riding, 1998). Cabe mencionar que los paleosuelos de color naranja y rojos muestran las condiciones subaéreas influenciadas por los procesos de oxidación y reducción (redox) de la atmosfera (Suhieb, 2024).

Esta litofacie se caracteriza por tener un espesor maximo de 1.5 metro con una geometría tabular y lenticular, suele estar relacionado con zonas basales erosivas (Alessandro Mancini,

2021). Los travertinos relacionados a los paleosuelos muestra una textura de láminas porosas, las capas estan compuestas principalmente por carbonato de calcio (calcita y aragonito) y hierro. Hay que mencionar, ademas que el travertino rico en hierro en este tipo de litofacies es el resultado de deposiciones procedentes de aguas termales mineralizadas (Suhieb, 2024).

También, es importante resltar que los paleosuelo no son directamente una litofacie en sí, pero está relacionada con los travertinos precipitados en depresiones o laderas bajas y el espesor del mismo guarda relación con el tiempo de exposición del travertino (Mehmet Özkul, 2002).

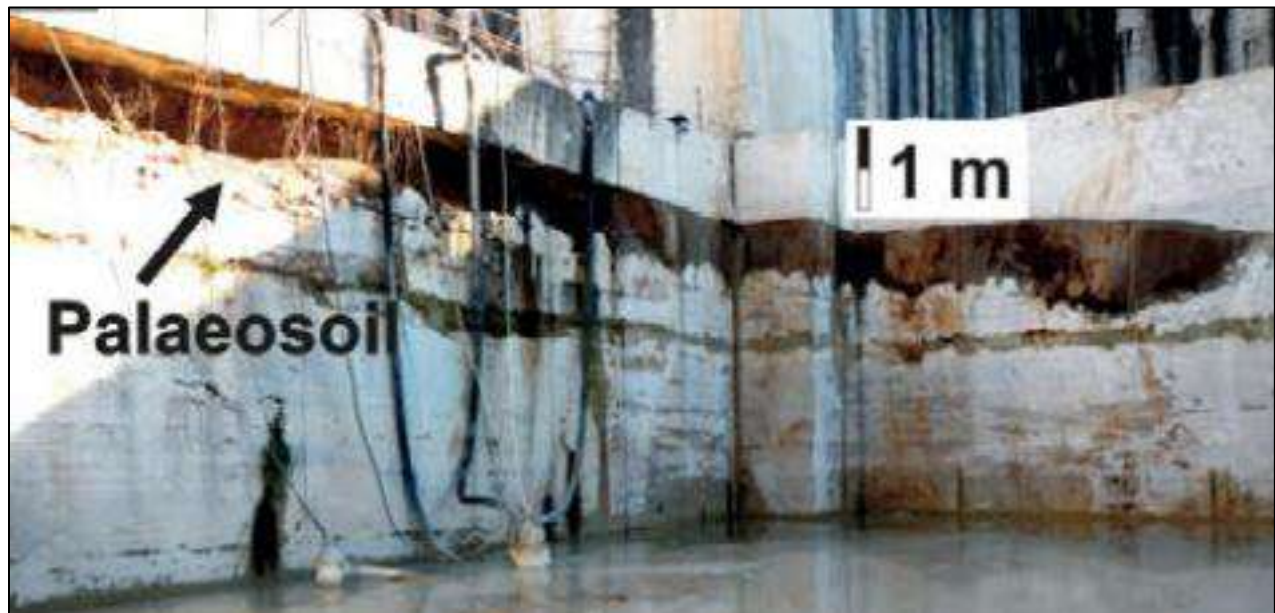


Figura 16. Se observa en la imagen la litofacies de paleosuelos, la cual yace discordantemente sobre depósitos de travertinos. Muestra colores marrones-anaranjados con características kársticas asociadas. Tomado de (Mancini, 2021).

2.6 Play Geotérmicos

Los play geotérmicos, son importantes para clasificar como se desarrollan la energía geotérmica, según la fuente de calor y el contexto tectónico que controla la circulación de fluidos. A su vez, se pueden encontrar dos clasificaciones de los play geotérmicos la cual ha sido planteada por Moeck (2014): los sistemas dominados por la convección, en los cuales se incluye los **tipos magmáticos, plutónico y controlado por fallas en dominio extensionales**; y los sistemas

dominados por la conducción, entre los que se encuentran, los play de cuencas intracratónicas, cinturones orogénicos con cuenca de antepaís adyacentes y los asociados a rocas cristalinas o de basamento.

La importancia de esta clasificación se debe a que encada tipo de play no solo involucra las condiciones térmicas y estructurales distintas, sino también las manifestaciones en la superficie. En este contexto, los travertinos se consideran un indicador importante, ya que suelen formase en zonas de descarga de fluidos hidrotermales que se encuentran vinculados a estos sistemas. Su presencia ofrece una información valiosa para la identificación de play geotérmicos.

2.6.1 Relación de los Play geotérmicos con la formación de travertinos

Según Moeck (2014), los depósitos de travertinos, tema principal de esta investigación, se relaciona principalmente con los play magmáticos volcánicos, dichos sistemas suelen estar asociados a un vulcanismo activo (basáltico, andesítico o dacítico), puede encontrarse en regiones como Islandia, Java, los Andes sudamericanos y Taiwán. En estos depósitos, la cámara magmática alimenta la zona de ascenso de alta temperatura (upflow), la cual suele manifestarse en la superficie mediante manantiales ácidos y rocas alteradas termoquímicamente.

Por otro lado, **la zona de descarga (outflow)** corresponde a un reservorio secundario de temperaturas de media a bajas. Esta zona generalmente está en sectores de bajo relieve, en donde los fluidos transportados afloran a la superficie como manantiales termales y se encuentran con Ph cercano a neutro lo que generalmente permite la formación de depósitos de travertinos, lo que es una evidencia de la precipitación de carbonato debido al enfriamiento y desgasificación de las aguas termales. Es importante mencionar que estas descargas no siempre reflejan la existencia de

un sistema de alta temperatura a profundidad.

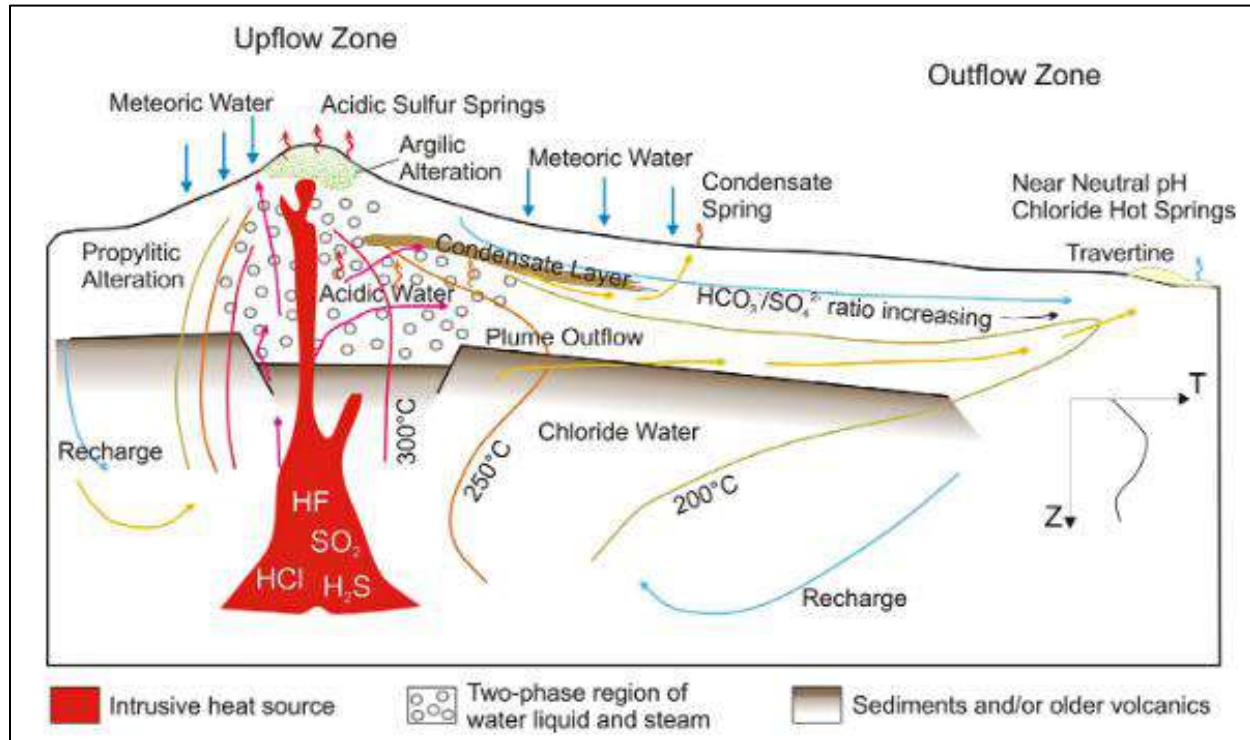


Figura 17. Modelo conceptual de un sistema geotermal asociado a vulcanismo activo en un arco volcánico de subducción, la formación de travertino en superficie se muestra como indicador clave de la descarga de fluidos hidrotermales desde un reservorio geotermal profundo. Tomado de (Moeck, 2014).

En cuanto a los sistemas no magmáticos dominados por la convección se desarrollan generalmente en dominios extensionales, donde circulan los fluidos y se encuentran dominados por un sistema de fallas. Estos pueden clasificarse en dos categorías: los controlados estrictamente por fallas y la convección ocurre a lo largo de ellas y se combina con la infiltración de las aguas meteóricas; Los controlados por filtración de fallas, en estos play generalmente los fluidos circulan a través de fallas permeables, las cuales transportan calor hacia la superficie. La mayoría de estos fluidos son de origen meteórico y la litología de los reservorios se caracterizan por una gran diversidad de rocas, que pueden ser volcánicas, plutónicas o sedimentarias. Por otro lado, la precipitación de travertino y sílice en manantiales termales en superficie compone un indicador importante de la presencia de reservorios geotérmicos a profundidad, lo cual proporciona

información sobre los procesos de enfriamiento, desgasificación y mezcla de aguas termales con meteóricas (Moeck, 2014).

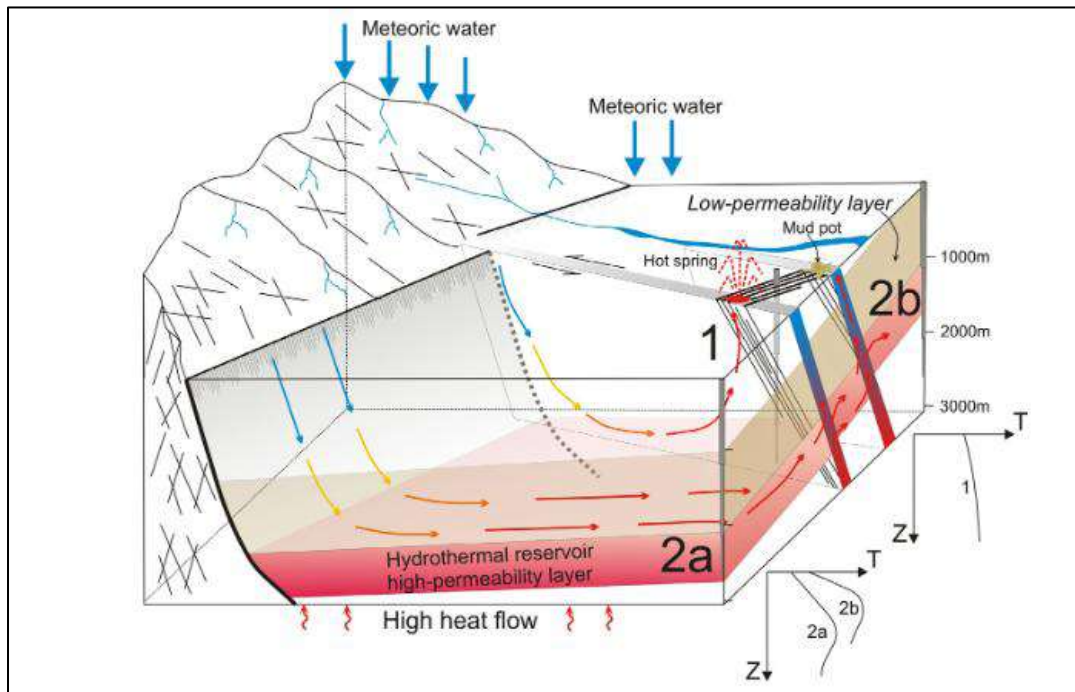


Figura 18. Sistema geotermal no magmático o controlado por fallas.

2.7 Rocas Carbonatadas Antiguas y Su Relación Con los Sistemas Hidrotermales

Las rocas carbonatadas son aquellas que están formadas de origen biogénico, las cuales están constituidas por restos esqueléticos de diferentes organismos. Pero existen algunas excepciones como el travertino el cual es de origen químico. En cuanto a las rocas carbonatadas antiguas hay que tomar en cuenta los procesos diagenéticos ligados al enterramiento, así como la variación de temperatura, presión y composición de los fluidos debido a que estos factores favorecen la recristalización, el cual es un proceso que puede borrar o alterar los rasgos deposicionales originales, pero no borra su origen orgánico (POSTMA, 2005).

La interacción entre las rocas carbonatadas antiguas y los sistemas hidrotermales pueden ocurrir bajo dos marcos conceptuales distintos, determinados por la fuente de CO₂ y los fluidos:

A. Modelo de Disolución en Sistema restringido (Metéogenos)

Postma (2005), describe un sistema aplicable a contextos kársticos someros, donde el agua meteórica enriquecida de CO₂ de origen biogénico se infiltra y alcanza un nivel freático bajo el cual se encuentra una capa de calcita. En esta zona que está saturada, la calcita se disuelve. Sin embargo, en este ambiente confinado el CO₂ consumido en la reacción no se puede reponer fácilmente debido a que tiene una lenta difusión a través del agua, lo que produce que el sistema trabaje de manera semicerrada y limite la disolución. Este sistema es fundamental para la karstificación y da lugar a travertinos metéogenos.

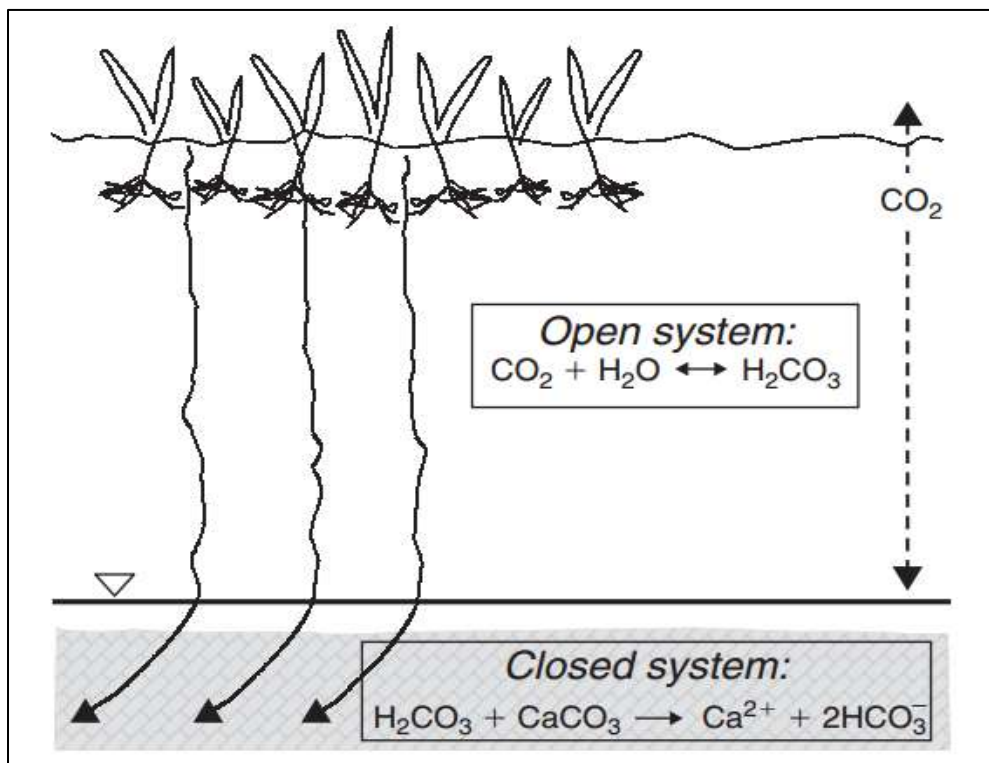


Figura 19. Modelo de disolución en un sistema restringido para la formación de travertinos metéogenos. Tomado de Postma (2005).

B. Modelo de Sistema Hidrotermal Abierto (Termógeno)

Este es el contexto más aplicable a la zona de estudio, el cual se caracteriza por actividad volcánica y ausencia de rocas carbonatadas en superficie, el modelo aplicable es el de sistemas hidrotermales abiertos. Pentecost (2005) describe cómo se comportan estos sistemas, donde los fluidos profundos y las aguas meteóricas se combinan, acidificados por CO_2 de origen magmático y calentado por una fuente térmica a profundidad (cámara magmática). Ascenden e interactúan rocas carbonatadas antiguas alojadas en el basamento. A diferencia del modelo anterior, la fuente de CO_2 es agresiva es profunda, constante y activa, lo que permite que se dé una disolución extensiva y continua. El fluido es enriquecido en iones de calcio y bicarbonato, asciende mediante convección a través de fracturas, fallas o zonas porosas. Durante este ascenso, la disminución de presión provoca la desgasificación de CO_2 , lo que finalmente produce la precipitación de travertino en la superficie.

Un ejemplo de este tipo de sistemas es Mammoth Hot Springs, donde el agua que forma travertino es de origen meteórico, pero circuló a grandes profundidades donde alcanzó temperaturas de 340-370 °C, esta agua circuló a través de rocas carbonatadas, antes de ascender y

precipitar, en este caso utilizaron isótopos de Pb y Sr para comprobarlo (Leeman & Whelan, 1977).

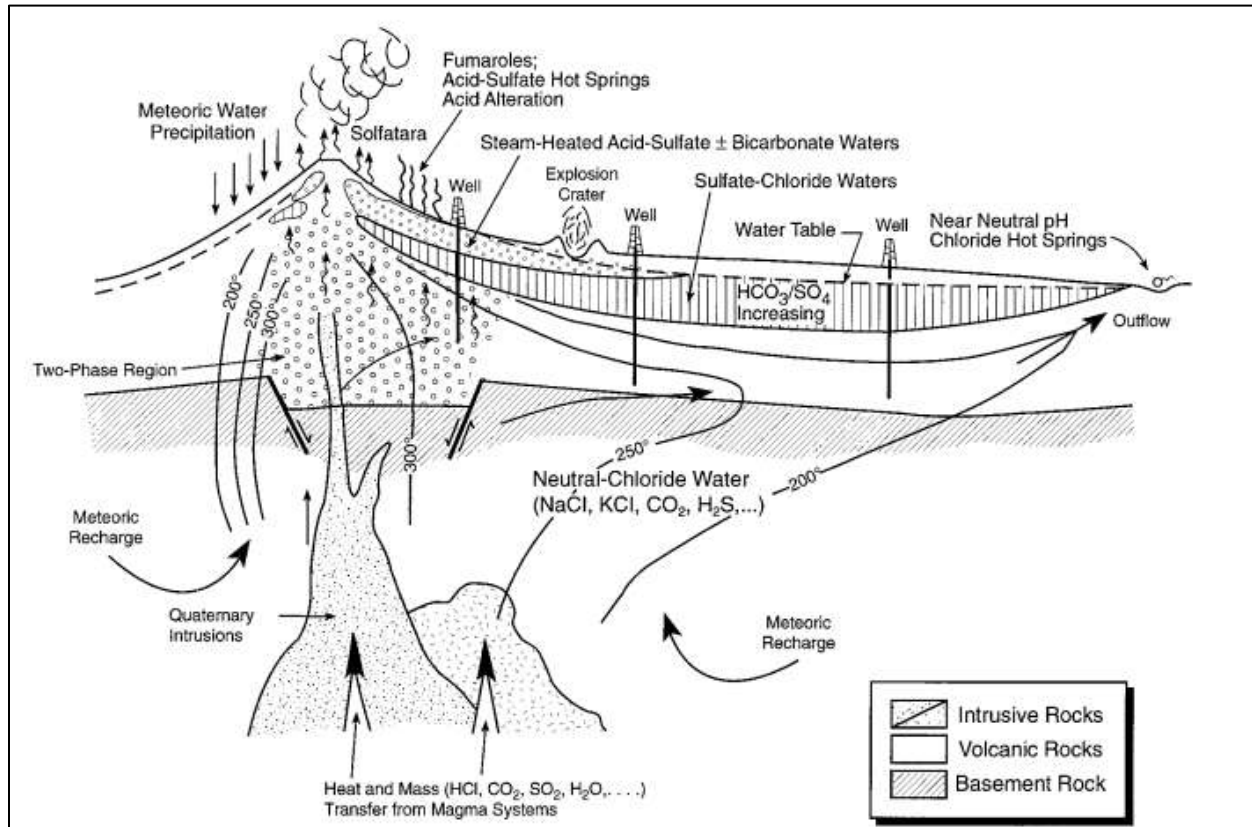


Figura 20. Modelo de sistema hidrotermal abierto (origen termógeno), ilustra la interacción de los fluidos calientes con el basamento (roca carbonatada), lo que genera la precipitación de travertino en la superficie como resultado de la desgasificación y el enfriamiento de las aguas. Tomado de (Ballard, 1999).

2.8 Distribución de los travertinos

Los depósitos de travertino son formaciones geológicas de distribución global, presente en todos los continentes bajo una amplia variedad de contextos geológicos y climáticos. Su (Denyer, 2012) (Anaya, 2014) estudio a nivel mundial ha permitido comprender los mecanismos que controlan su precipitación, así como las particularidades asociadas a cada región. A escala continental, en América se han documentado numerosas ocurrencias. Ford & Pedley (1996), en una amplia compilación, registraron importantes depósitos en regiones como Dakota del Sur, Colorado, California y Nevada, entre otros estados de Estados Unidos. Estos depósitos suelen estar asociados a sistema hidrotermales que favorecen la precipitación de carbonatos.

En la región centroamericana, un aporte significativo lo constituye el trabajo de Denyer & Kussmaul (2012), quienes documentan y describen varios sitios con presencia de travertino en Costa Rica. De igual modo, en Colombia, Anaya (2014) realizó una caracterización geológica detallada del travertino, contribuyendo al conocimiento de estas rocas. El caso de Panamá la literatura científica específica de carbonatos terrestres y travertinos en el país es escasa. No obstante, existen referencias, como el informe de Recchi y Miranda (1977), que menciona la presencia de travertino en la localidad de Guanaquito (Tonosí). Esta referencia constituye un punto de partida histórico importante, a la vez que resalta importancia de estudios actualizados que caractericen estos depósitos en el territorio panameño, como el que se presenta en esta investigación.



Figura 21. Mapa temático de la distribución de los travertinos en el mundo, según Ford & Pedley (1996). Los puntos rojos indican la ubicación de los travertinos termógenos y los naranjas los travertinos meteógenos. (Mapa generado en Qgis).

2.9 Importancia de los travertinos dentro de la geología

Los depósitos de travertino tienen un interés geológico excepcional, ya que su estudio proporciona información crucial para comprender diversos procesos geológicos, tanto del pasado como actuales. Su análisis contribuye de manera fundamental ofreciendo perspectivas sobre climas antiguos y ambientes de formación.

2.9.1 Paleoambiente

Los travertinos preservan tres tipos principales de fósiles que sirven como indicadores paleoambientales: Impresiones, incrustaciones y restos orgánicos (Tabla 1). Las impresiones consisten en moldes dejados por material vegetal descompuesto, mientras que las incrustaciones, que son complementarias, pueden proporcionar suficiente detalle externo para permitir la identificación de la biota circundante. Estos depósitos contienen una flora diversa que incluye impresiones de hojas, incrustaciones alrededor de cojines de musgos, ramitas, semillas y polen.

Particularmente, las impresiones de hojas proporcionan el registro más importante, ya que permiten identificar especies y tipos de vegetación que existía durante la depositación. El conocimiento de la flora, especialmente de árboles, puede utilizarse para complementar y reforzar la evidencia paleoambiental obtenida de fuentes como la fauna o registros isotópicos. Por otro lado, muchos travertinos contienen una variada fauna de moluscos, en la que predominan los gasterópodos, que conservan caracteres taxonómicos después del enterramiento.

Tanto moluscos acuáticos como terrestres pueden encontrarse en los depósitos de travertino, proporcionando información crucial sobre el entorno antiguo local. Los depósitos sueltos y pocos consolidados en áreas pantanosas ofrecen el mejor material de estudio, ya que permiten una extracción más sencilla de los gasterópodos para su análisis (Pentecost, 2005). La integración del estudio de la flora fósil y la melacofauna en los travertinos es una herramienta importante para la

reconstrucción paleoclimática, especialmente cuando no se pueden realizar métodos analíticos como la datación absoluta y la geoquímica de isótopos estables.

Tabla 1. Formas fósiles en travertino. (Extraído de Pentecost, 2005)

Tipo	Ejemplos	Morfologías/facies	Condiciones especiales
Partes mineralizadas	Huesos y dientes Conchas	Depósitos palustres y de relleno lacustre, cuevas de travertino	Turbulencia reducida para evitar abrasión y trituración
Partes no mineralizadas	Madera/turba Semillas	Depósitos palustres y clásticos. El polen se ha recuperado de la mayoría de los tipos	Saturación de agua - preserva estructuras orgánicas en depósitos del Holoceno
Moldes y galerías	Hojas y ramitas Plumas	Cascadas, presas, costras fluviales y depósitos palustres	Matriz de grano fino y deposición rápida
Incrustaciones	Juncos y cañas Ramas y ramitas Almohadillas de briófitos Algas	Cascadas, presas, costras fluviales, depósitos litorales de lagos	Deposición rápida, normalmente en flujo rápido

Pertificación

Ramitas, algas

Costras fluviales

Desconocido y
raramente
documentado

2.9.2 Tectonismo

La presencia de depósitos de travertino, tanto activos como inactivos, en una misma región constituyen un indicador de una actividad tectónica constante a lo largo de miles de años. Esto se debe a que los travertinos pueden preservar en su interior estructuras tectónicas formadas durante su precipitación, lo que proporciona información importante sobre la dirección y la cronología de las fuerzas tectónicas que actúan durante y después de su formación. (Altunel, 1996).

El análisis de la morfología, distribución espacial y edad de estos depósitos permiten estudiar la deformación frágil y definir la geometría, cinemática y edad de las fallas. Generalmente, los registros tectónicos más claros se preservan en depósitos de travertino de varios metros de espesor. Un caso conocido es el de la cantera Cava Olivera en Italia, donde el depósito tiene un espesor de unos 25 a 30 metros y una ocurrencia de deformación sindeposicional la cual está registrada dentro de la sucesión de travertino, lo cual convierte la cantera en un área importante para la investigación neotectónica basadas en la relación entre la deposición de travertino y la falla

(Brogi et al. 2010).

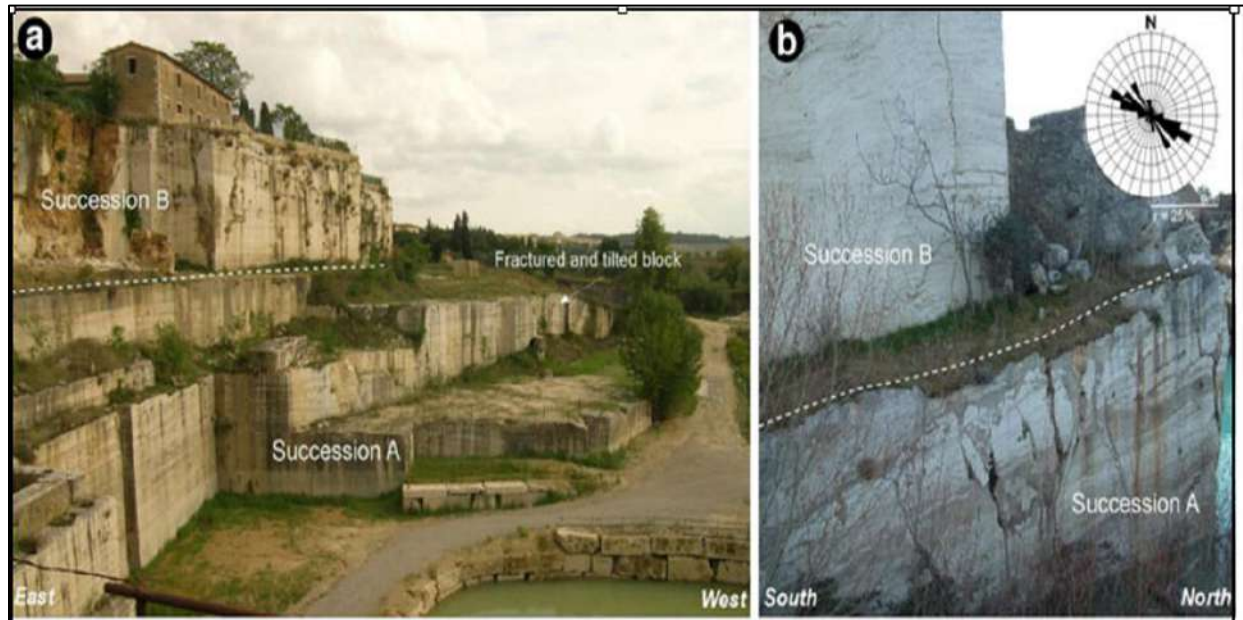


Figura 22. La imagen muestra una representación de los procesos tectónicos importantes en la cantera Cava Olivera en un depósito de travertino. Tomado de (Brogi et al. 2010).

2.9.3 Aplicación en Ingeniería Geológica

Las características de los depósitos de travertinos son fundamental para la ingeniería geológica, ya que su naturaleza heterogénea y porosa plantea desafíos específicos para la estabilidad de obras civiles. Como fue demostrado por (Çelik, 2012), en su estudio donde las propiedades como la resistencia a la compresión simple (UCS) puede variar enormemente incluso en una misma área, convirtiéndolo en materiales de cimentación impredecibles. Los ensayos de laboratorio realizados por (Vásárhelyi, 2010), comprobaron que la fábrica y la porosidad son factores claves que controlan las propiedades físicas y mecánicas de los travertinos. La fábrica está directamente relacionada con la porosidad, ya que las facies masivas y menos porosas proporcionan un mejor comportamiento mecánico que las facies laminadas y porosas.

Por lo tanto, la identificación de litofacies en el estudio de Vásárhelyi (2010) no es solo una descripción, sino una herramienta de pronóstico geotécnico para delimitar zonas de potencial

de baja capacidad de carga y alta susceptibilidad a la infiltración. En ambos estudios citados miden la reducción de la resistencia ante la saturación de agua, comparando la resistencia a la compresión simple seca y saturada. Además, Çelik & Çobanoğlu (2012) encontraron que la resistencia es 1.44 veces mayor cuando la carga se aplica de forma paralela que cuando se aplica de forma perpendicular. Este hecho, sumado a la reducción de resistencia por la saturación, tiene implicaciones directas en la estabilidad de taludes naturales o cortes artificiales, donde la dirección de los planos de laminación y la infiltración de agua lluvia pueden crear condiciones para generar fallas.

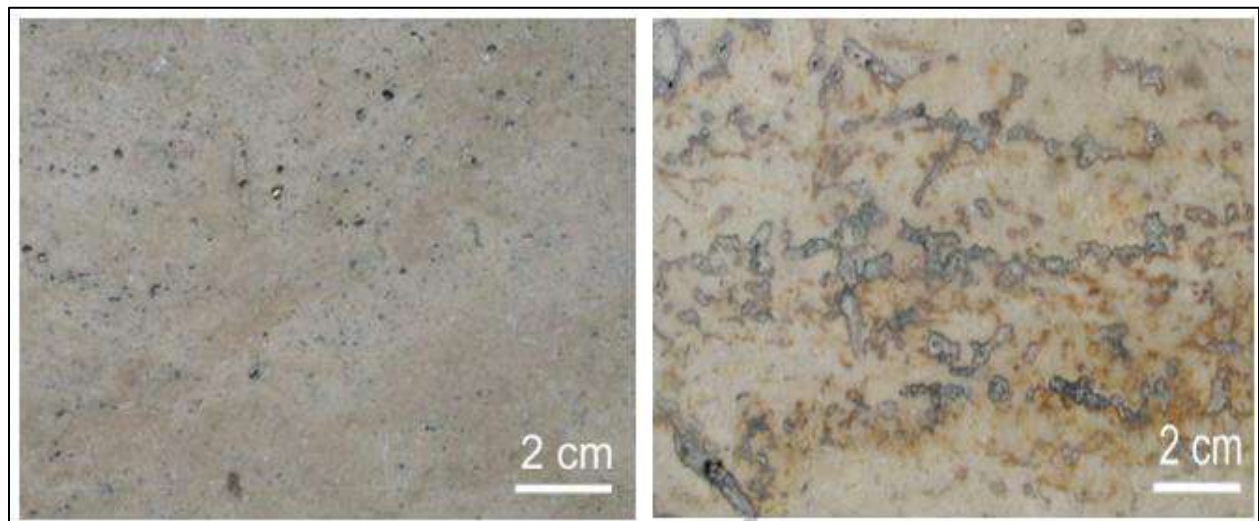


Figura 23. A). Travertino Masivo; B). Travertino poroso laminado. Tomado de Vásárhelyi (2010).

Capítulo 3. Metodología

3.1. Enfoque general de la investigación

El presente estudio es una investigación de tipo descriptivo y analítico, en el cual, el diseño metodológico se estructura de forma secuencial en tres fases principales para caracterizar la formación de travertino en la zona de estudio. El enfoque general está dirigido a integrar evidencia geológica, hidrogeológico y biológico, permitiéndonos tener una comprensión de los posibles procesos formadores de travertino.

La investigación se desarrollará bajo la siguiente metodología:

1. **Fase preliminar (trabajo bibliográfico y de gabinete):** En esta sección se realiza una revisión exhaustiva de la literatura científica y especializada sobre la formación de travertinos, la búsqueda de información de mapas de la zona. con el fin de realizar una contextualización del área de estudio dentro del marco geológico regional y planificación de las actividades de campo, asegurando que la recolección de datos sea eficiente.
2. **Fase de campo (Trabajo de Campo y Muestreo):** En esta etapa de recolección de datos. Incluye el reconocimiento y mapeo geológico, la descripción de las litofacies, también el muestreo de rocas, agua y gasterópodos que se encuentren en la zona. Esta fase está diseñada para hacer la mayor recolección de datos en campos para comprender la formación de travertino. De igual modo, se utilizará esta información para generar una base de datos geoespacial con las coordenadas registradas en campo, para elaboración del mapa geológico de la zona de estudio.

3. **Fase de procesamiento de datos:** Aquí se realizará, una revisión de las muestras recolectadas en campo, a las mismas se les dará una descripción de las muestras de manos con el uso de la lupa, HCl, en donde se identificará su dureza y color; por otro lado, se realizarán análisis de las láminas delgadas de las rocas con el uso del microscopio para conocer la composición mineralógica y texturas de las rocas de la zona. Adicionalmente, a las muestras de gasterópodos se les hará una clasificación taxonómica que se llevará a cabo con la colaboración de un profesor especializado del área de biología.

Este enfoque en fases nos permitirá cumplir con los objetivos específicos planteados, desde la descripción de las rocas de la zona, hasta la comprensión de los posibles procesos formadores de los depósitos de travertino, en el Salitral de la Mitra de la Chorrera.

3.2 Trabajo bibliográfico y de gabinete

Esta fase inicial de investigación se organizó con respecto a la recopilación de literatura especializada sobre travertinos y la compilación de cartografía base, con el fin de establecer un conocimiento sobre estos aspectos antes y durante la recopilación de datos en campo.

3.2.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se realizó con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar la información de los depósitos de travertinos para construir un marco teórico sólido que respaldara la investigación. Dada la escasez de información específica en Panamá, fue importante la recopilación de informes de la Dirección de Recursos Minerales sobre travertinos en Panamá, los cuales, aunque limitados, proporcionaron un contexto local crucial.

La búsqueda de información consideró estudios publicados entre 1970 y 2024, priorizando investigaciones sobre depósitos de travertinos, características de carbonatos continentales, hidrotermalismo y geología de Panamá. La literatura recopilada fue organizada y analizada, identificando y tomando en cuenta aspectos claves como la génesis de la formación del travertino, los criterios de clasificación de litofacies y los datos contextuales de la región. Se dio especial consideración a autores fundamentales como Pentecost y Chafetz & Folk, cuya amplia literatura permitió establecer comparaciones, para así dar una explicación sobre la formación de travertinos en el contexto de la zona de estudio.

Para ofrecer una explicación sólida sobre el origen de los travertinos termógenos, se integró información específica de hidrotermalismo y rocas carbonatadas antiguas. Esto permitió conectar la formación de travertino con estos sistemas y comprender el origen del calcio, utilizando como apoyo diagramas conceptuales de fuentes como Encyclopedia of Volcanoes. Finalmente, esta revisión bibliográfica exhaustiva no solo permitió realizar el marco teórico con los conceptos sobre la formación, sino que también orientó el diseño metodológico y la interpretación de resultados. Este proceso permite que la investigación se desarrolle con el rigor científico y la contextualización adecuada, permitiendo la selección de métodos de caracterización de litofacies apropiados y el establecimiento de parámetros de comparación de depósitos de otras regiones a nivel internacional.

3.2.2 Procesamiento de información geoespacial

El procesamiento de información geoespacial constituyó una etapa metodológica y estratégica fundamental para la conceptualización, planificación y ejecución de la investigación. Su objetivo principal fue generar una base cartográfica sólida que permitiera no solo la visualización de los datos de campo, sino también el análisis espacial de las relaciones entre la distribución de los depósitos de travertino y los puntos de muestreo. Para ello, se emplearon

Sistemas de Información Geográficas (SIG) como la plataforma tecnológica principal. La integración de los datos se realizó en varias fases:

Integración de datos Geoespaciales y de Teledetección: Se recopilaron datos espaciales de diversas fuentes y la topografía general. El análisis de estas imágenes satelitales permitió delimitar las zonas de estudio con precisión antes de iniciar la campaña de campo, optimizar el tiempo y los recursos.

Integración de Datos de Campo: Los puntos de muestreo, que contenían información detallada de cada muestra, se importaron a los sistemas de información geográfica (Qgis y Arcgis). La integración de estos datos primarios con la cartografía base proporcionó un contexto espacial detallado, permitiendo visualizar la distribución exacta de los travertinos y la ubicación de las muestras.

Análisis Espacial de la Formación de Travertinos: se implementaron técnicas de SIG para la elaboración de un mapa geológico y el análisis de las características topográficas del área, utilizando como base cartográfica las curvas de nivel.

Planificación de Acceso a Zonas Remotas: el aporte de los SIG para superponer información topográfica y de acceso (rutas o caminos) fue fundamental para la planificación logística del trabajo de campo, esto facilitó identificar rutas viables a zonas de difícil acceso y terrenos más altos y la eficiencia en la recolección de muestras.

Los resultados de esta fase fueron esenciales para contextualizar los hallazgos geológicos y biológicos, constituyendo significativamente a la comprensión de la zona de estudio.

3.3 Trabajo de Campo y muestreo

La fase de campo se diseñó para obtener datos primarios mediante el reconocimiento directo del área de estudio, el mapeo y la recolección sistemática de muestras. Las actividades se planificaron sobre la base de la revisión en la fase de gabinete y se realizaron al redor de 20 giras de campo en la zona de El Salitral, distrito de La Chorrera.

3.3.1 Reconocimiento y mapeo geológico

El reconocimiento de campo inicio con un recorrido general del área para verificar y ajustar las interpretaciones realizadas a partir del mapa geológico. Las actividades incluyeron:

- **Georreferenciación** de puntos de interés utilizando un GPS, para registrar las coordenadas UTM.
- **Descripción y delimitación** de las litologías presentes en la zona, incluyendo la formación de travertino.
- **Identificación de procesos geológicos activos** como la meteorización, erosión, transporte, sedimentación y actividad hidrotermal que pueden influir en la formación de travertino.
- **Documentación fotográfica** de las rocas de la zona y las litofacies de travertino, así como de la presencia del hidrotermalismo.
- **Verificación in situ:** la presencia de estructuras geológicas (fallas, fracturas) mediante observación y topografía del área.
- **Designación de Nombre a los Puntos de Muestreo:** para el registro de las litofacies en campo, se estableció un sistema de codificación para los puntos de muestreo. A cada punto se le asignó un identificador único que permite reconocer cada ubicación de la litofacies.

Todos estos datos (coordenada UTM y observaciones) se registraron en la libreta de campo. Este mapeo detallado permitió generar una base de datos para elaborar el mapa geológico final.

3.3.2 Muestreo de Travertino y Rocas de la Zona

El muestreo de travertino y las rocas de la zona se hizo orientado a reconocer las morfología y litofacies del depósito de Travertino y su contexto geológico. Para este procedimiento de muestreo se siguieron los siguientes pasos:

Colecta de muestras: Se recolectaron fragmentos de rocas de 10 Cm aproximadamente, las cuales son utilizadas para elaborar láminas delgadas y descripciones macroscópicas.

Equipo utilizado: Se empleo el uso de martillo geológico, para la obtención de las muestras de rocas, bolsas ziploc, cinta adhesiva (para etiquetar), marcador permanente, ácido clorhídrico, GPS para la toma de coordenadas de cada punto, mapa topográfico en físico de la zona y cámara fotográfica para hacer una documentación de cada muestra y registrar las características de la morfología y la litofacies del depósito de travertino.

De esta manera, se garantizó la obtención de un conjunto de muestras representativas, para hacer la documentación adecuada durante los análisis en gabinetes adecuados.



Figura 24. A) Caracterización de campo: morfología, litofacies y muestreo del depósito de travertino; B) Extracción de muestras en campos; C) Muestra obtenida para caracterizar en gabinete.

3.3.3 Muestreo y Caracterización Fisicoquímica In situ de aguas

Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas de los fluidos asociados al sistema travertínico, debido a la lejanía del área de estudio y a que la Facultad de Ingeniería no contaba con el equipo necesario, se estableció una colaboración con la Facultad de Química para realizar una gira de campo conjunta. Durante esta gira, se hizo un muestreo puntual utilizando una sonda multiparámetros Hanna (modelo HI98194), la cual se encontraba debidamente calibrada para garantizar la calidad de los datos.

El equipo permitió la medición directa in situ de los siguientes parámetros: temperatura, Ph, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, potencial de óxido- reducción, salinidad y presión barométrica. El procedimiento de medición consistió en la inmersión directa de la sonda en cada punto de muestreo, se esperó a que se estabilizará entre 3 a 5 minutos antes de registrar los datos. En total, se recolectaron 20 muestras distribuidas en toda la zona de interés, abarcando puntos clave como el manantial principal, manantial secundario, cursos de agua asociado a los travertinos y pozas de retención en las terrazas.

Cabe mencionar que no fue posible realizar un monitoreo continuo o mediciones diarias debido a dos factores principales: Lo alejado de la zona y que no se contaba con una sonda multiparámetros en nuestra facultad para su uso recurrente. Para compensar esta limitación, se implementó una estrategia de muestreo intensivo durante la gira de campo, asegurando la toma de datos de los puntos de interés. Esta metodología permitió obtener una caracterización representativa de las condiciones hidroquímicas durante el periodo de estudio, proporcionando información valiosa para la interpretación de los procesos de formación del travertino.



A.



B.



C.

Figura 25. A). Sonda multiparámetros utilizada para el muestreo; B). Medición en las terrazas del travertino. C). Medición en el manantial principal.

3.3.4 Recolección de Gasterópodos

La recolección de gasterópodos se realizó con el objetivo de caracterizar la fauna asociada a los ambientes travertínicos de la zona de estudio y evaluar su potencial como indicadores de paleoambientes. Esta fase se desarrolló con el asesoramiento de un biólogo de la Facultad de Biología, quien dirigió las técnicas de recolección e hizo una visita a campo para una identificación *in situ*.

Las muestras se depositaron en viales, aplicando un protocolo de preservación, los gasterópodos vivos se preservaron en alcohol al 90% para evitar la descomposición de sus tejidos blando, mientras que los ejemplares sin tejido blando (caparazones) se conservaron en alcohol al 70%. Esta metodología, fue desarrollada en colaboración con la Facultad de Biología, lo que permitió obtener una colección representativa y bien conservada de gasterópodos, facilitando realizar un análisis taxonómico para fortalecer los resultados de nuestra investigación.



Figura 26. A). Gasterópodos que se encuentran en la zona de estudio; B). Recolección de los gasterópodos para su análisis.

3.4 Fase de Laboratorio y Análisis

Una vez concluida las actividades de campo y la recolección de muestras, se procedió a la fase de laboratorio y análisis, orientada a procesar y examinar las muestras tomadas para obtener datos que permitan caracterizar con mayor detalle el sistema travertínico estudiado. En esta fase se realizó análisis petrológico y mineralógico de las rocas; así como la revisión taxonómica de los gasterópodos. Los análisis realizados, tuvieron como finalidad complementar y validar las observaciones de campo, aportando información crucial para la discusión de los procesos de formación y las condiciones ambientales asociadas a los depósitos de travertinos de la zona de estudio.

3.4.1 Análisis petrográfico

El análisis petrográfico se realizó mediante la técnica de láminas delgadas con el objetivo de caracterizar las texturas, componentes y estructuras de las muestras de travertinos y rocas volcánicas de la zona, para inferir los procesos de formación del travertino y su relación con el contexto reológico regional. Para ellos, se eligieron 7 muestras de rocas volcánicas y 6 muestras de travertinos para la elaboración de láminas delgadas, las cuales se analizaron en un microscopio petrográfico de luz transmitida

La observación se realizó utilizando la técnica de nicols paralelos (PPL) y, (XPL) lo que permitió identificar minerales basándose en sus propiedades ópticas como birrefringencia, relieve y maclas con especial enfoque en la calcita y aragonito en la muestra de travertino, se caracterizaron los hábitos cristalinos (micrítico, espático, fibroso) y fábrica de la roca. También se observó la porosidad y estructuras sedimentarias a escala microscópica y se verificó si había moldes de macroorganismos y evidencia de influencia orgánica.

En la descripción petrográfica de las láminas delgadas de travertino se utilizaron las clasificaciones de Folk (1962) y Dunham (1962). La clasificación de Folk se basa en la composición granular, combinando el tipo de grano predominante (como aloquímicos: intraclastos, ooides, fósiles) con la naturaleza de la matriz (micrita o esparita). Por su parte, la clasificación de Dunham se centra en la textura deposicional y en la proporción entre partículas (aloquímicos) y matriz micrítica, distinguiendo entre mudstone, wackestone, packstone y grainstone según la abundancia y soporte de los granos.

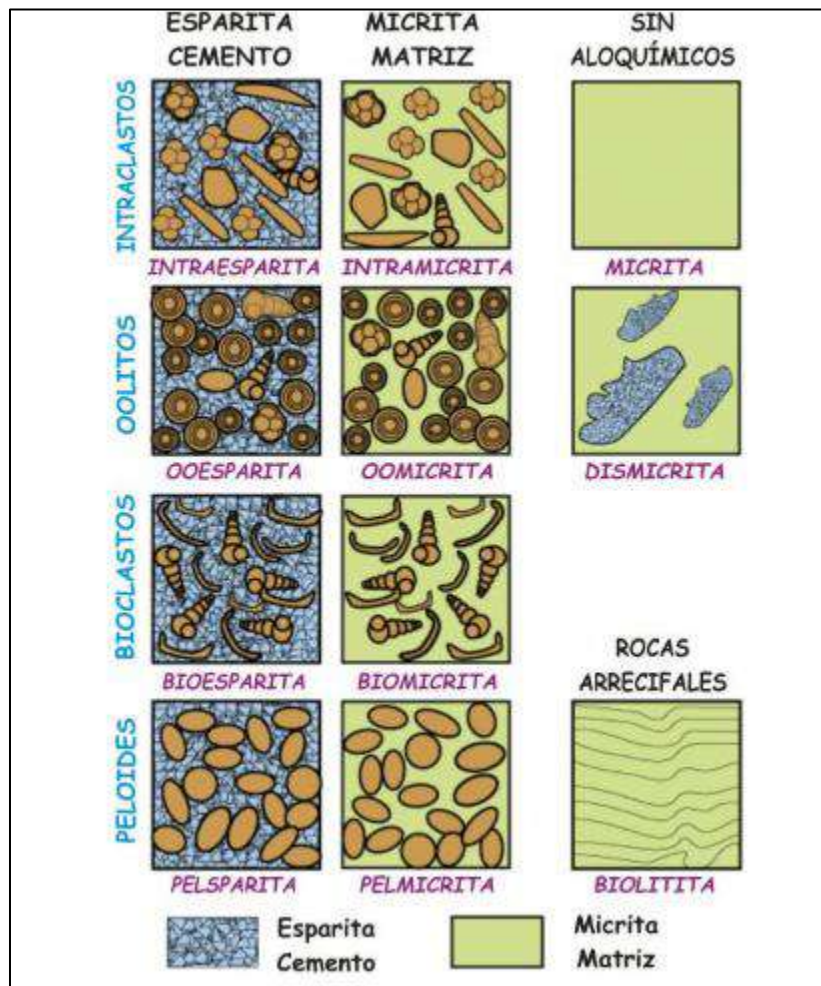


Figura 27. Clasificación de Folk, imagen tomada de (Benavente García, et al., s.f).

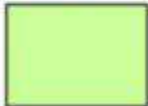
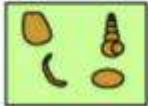
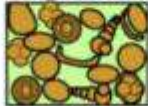
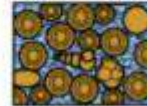
Componentes originales no unidos durante la sedimentación				Componentes originales unidos durante el desarrollo de una bioconstrucción
Con barro micrítico		Sin barro micrítico		
Matriz-soportado		Grano-soportado		
<10% granos	>10% granos			
MUDSTONE	WACKESTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE
				

Figura 28. Clasificación de Dunham, imagen tomada de (Benavente García, et al., s.f).

Para las muestras de rocas volcánicas, el análisis se centró en identificar sus texturas, composición mineralógica y la presencia de minerales secundarios que evidenciaran procesos de alteración hidrotermal. Este análisis petrográfico proporcionó una base fundamental para la interpretación genética del depósito de travertino en su contexto geológico, el cual está vinculando los procesos de sedimentación química con el vulcanismo regional.

3.4.2 Análisis Biológico

El análisis biológico se realizó con el objetivo de determinar la composición taxonómica de los gasterópodos asociados a los depósitos de travertino, para establecer su relación con los ambientes de formación y su potencial como indicadores de paleoambientes. Este análisis fue realizado por el biólogo especialista de la Facultad de Biología, quien proporcionó los resultados de la identificación taxonómica basándose en los viales con alcohol al 70 y 90% con los diferentes tipos de gasterópodos; el biólogo especialista realizó observación macroscópica y microscópica de las características morfológicas de los ejemplares.

Con este análisis se nos proporcionó información de su clasificación taxonómica (familia, subfamilia, subgénero), descripción de la morfología de la concha, características de la abertura y zonas de habital preferencial de cada taxon. La información taxonómica proporcionada por el especialista permitió una interpretación general acerca de las diferentes especies que pueden habitar los depósitos de travertino, enriqueciendo favorablemente esta investigación.

3.5 Procesamiento de Datos

El uso del software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcGIS Pro y Qgis, fue un componente indispensable para la elaboración y presentación de los mapas de ubicación y muestreo del área de estudio. La base de este proceso fue la construcción de una geodatabase centralizada, en la cual se integraron diversas fuentes de datos espaciales. Este enfoque estructurado no solo permitió organizar y gestionar la información, sino que también aseguró la unificación de los datos bajo un mismo sistema de referencia espacial.

Las capas de referencia que se integraron en la geodatabase incluyeron el shapefile oficial de la división política de la República de Panamá, fallas geológicas, ríos y quebradas de la zona; el mapa base detallado proporcionado por el software para contextualización geográfica y los datos de mapeo georreferenciados recolectados durante la fase de campo. Este procedimiento de procesamiento geoespacial permitió aplicar simbología personalizada, etiquetar puntos y áreas con precisión, adicionalmente realizar el mapa geológico de la zona de estudio.

El uso de ArcGis Pro y Qgis es esencial porque convierte datos geoespaciales dispersos en mapas claros y analíticamente útiles, permitiendo organizar información compleja en un mismo entorno y transmitir información en un lenguaje visual.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Presentación de los Resultados

En este capítulo se presentan de manera organizada los resultados obtenidos durante las fases de campo y laboratorio, correspondientes al estudio de los depósitos de travertino en el área del Salitral en Playa Leona distrito de La Chorrera. Los datos se han realizado para responder a los objetivos específicos, integrando evidencia geológica, petrológica, hidrogeoquímica y biológica. La información se presenta a través de un mapa geológico de la zona, descripciones macroscópica de las litofacies, datos fisicoquímicos de aguas, descripción macroscópica y microscópica de las muestras de travertino y rocas adyacentes de la zona, y registros de los gasterópodos.

4.2 Cartografía geológica y Contexto de la zona de estudio

La cartografía geológica de la región El Salitral, se genera a partir de la recopilación de datos de campo para un mayor análisis espacial de la distribución los depósitos de travertino y los puntos de muestreo, permitiendo una interpretación detallada y aproximada de la geología local. El área de estudio que abarca, delimitando sus coordenadas y extensión, secciona y describe el marco geomorfológico, de las características del relieve, el patrón de drenaje, la geología y el monitoreo de cambios realizados en su relieve. Estos estudios nos proporcionan la base fundamental para la interpretación geológica.

4.2.1 Nomenclatura de Puntos de Muestreos de las Litofacies de Travertino

En el área de estudio se identificaron múltiples puntos de deposición de travertino. En la Tabla 2. Se presenta la nomenclatura asignada y las coordenadas georreferenciadas de cada

estación de muestreo, las cuales constituyen puntos de control representativos de cada zona de deposición. cuya descripción detallada se desarrolla en el apartado 4.5.

Tabla 2. Tabla de nomenclatura, para la ubicación de puntos de control de las litofacies.

Nombre	Nomenclatura	Coordenada UTM
Manantial principal	MP	632964- 973627
Tanque Azul	TA	632839- 974066
Lago Artificial	LA	633010-973788
Terrazas Antiguas	TAn	632869-973569
Quebrada Travertino MP	QT	632857-973611
Quebrada el Salitral	QS	632771-973950

4.2.2 Contexto Geomorfológico

El Salitral se ubica en una zona geomorfológica de transición, caracterizada por elevaciones de medias a bajas que descienden hacia planicies litorales cercanas al nivel del mar. El sistema fluvial dominante es el río Perequetesito, el cual recibe el aporte de numerosas quebradas antes de desembocar en el Océano Pacífico. Si bien la mayor parte del relieve montañoso adyacente mantiene una cobertura vegetal densa, la actividad ganadera ha provocado la deforestación en ciertas áreas, incrementando la susceptibilidad a la meteorización y erosión del suelo. La litología de la zona de estudio está dominada por rocas ígneas de origen volcánico y piroclásticos (basaltos y tobas), junto con unidades de origen sedimentario, tal como se verificó

mediante muestreos realizados. También, se evidencia la presencia de antiguos ecosistemas de manglar ya que se encuentra a proximidad de la costa.

4.2.3 Mapa Geológico

En el siguiente mapa se presentan los puntos de travertino de El Salitral, en donde el punto color rojo muestra la ubicación específica del manantial, conocido como manantial principal. Los puntos de color marrón representan pequeños manantiales y terrazas de formación de travertino.

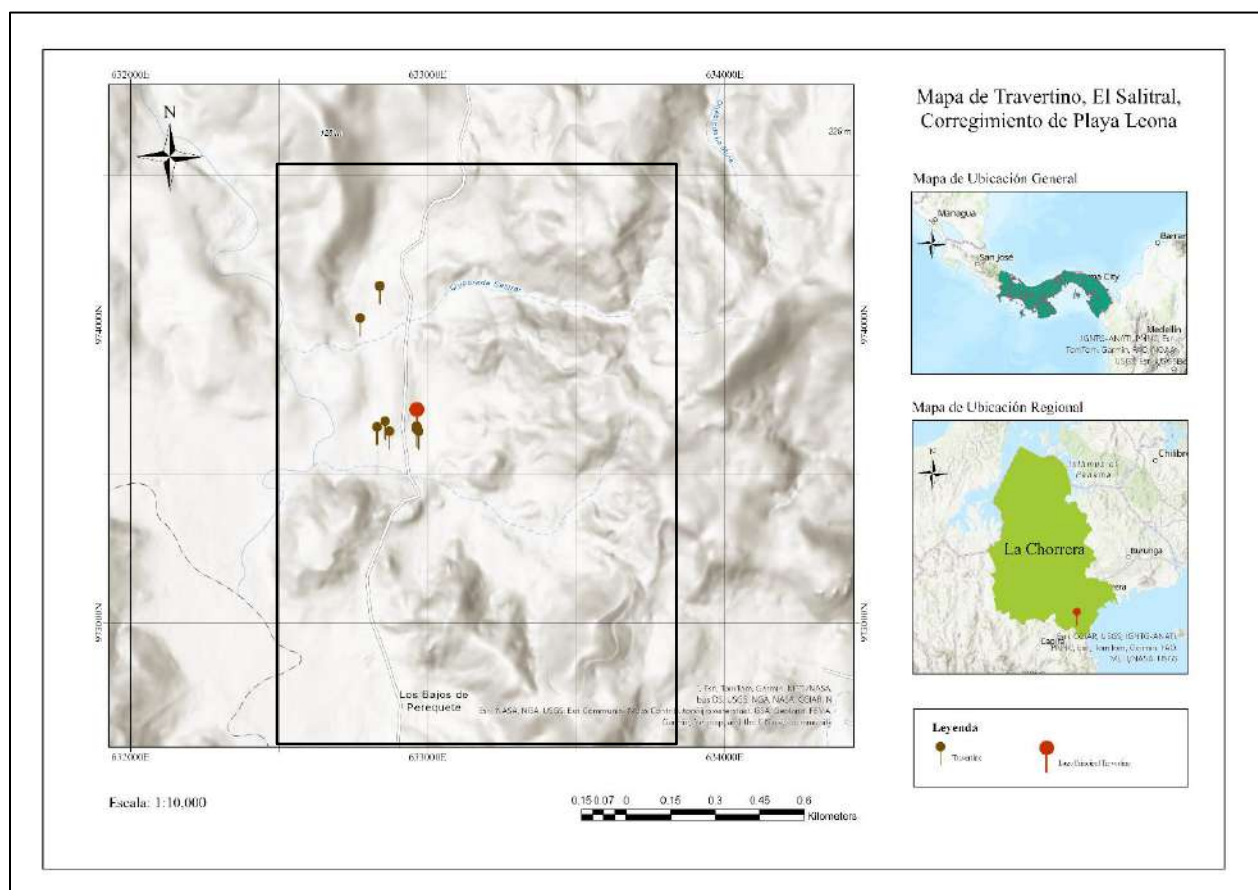


Figura 29. Puntos de ubicación del travertino, en la zona estudio.

El mapa general que se muestra posee todos los puntos de muestreo que se realizó en el área con el fin de exponer todo el recorrido realizado. A su vez, se presenta la geología de la zona

predominan las rocas ígneas como basaltos y tobas con diferentes composiciones.

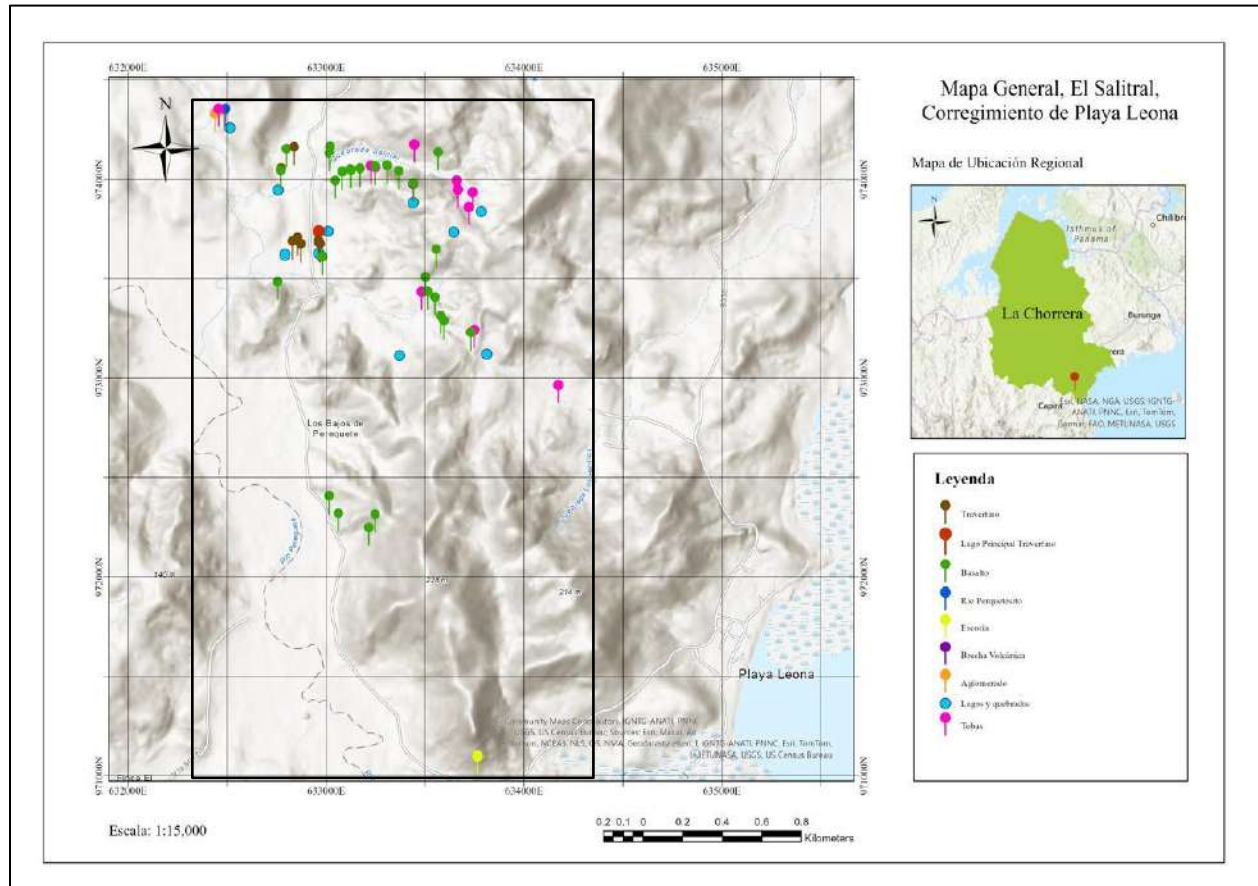


Figura 30. Puntos de recolección de muestras

Mapa de distribución de litofacies que muestran los puntos de control georreferenciados donde se identificaron y describieron litofacies de travertino en el área de estudio.

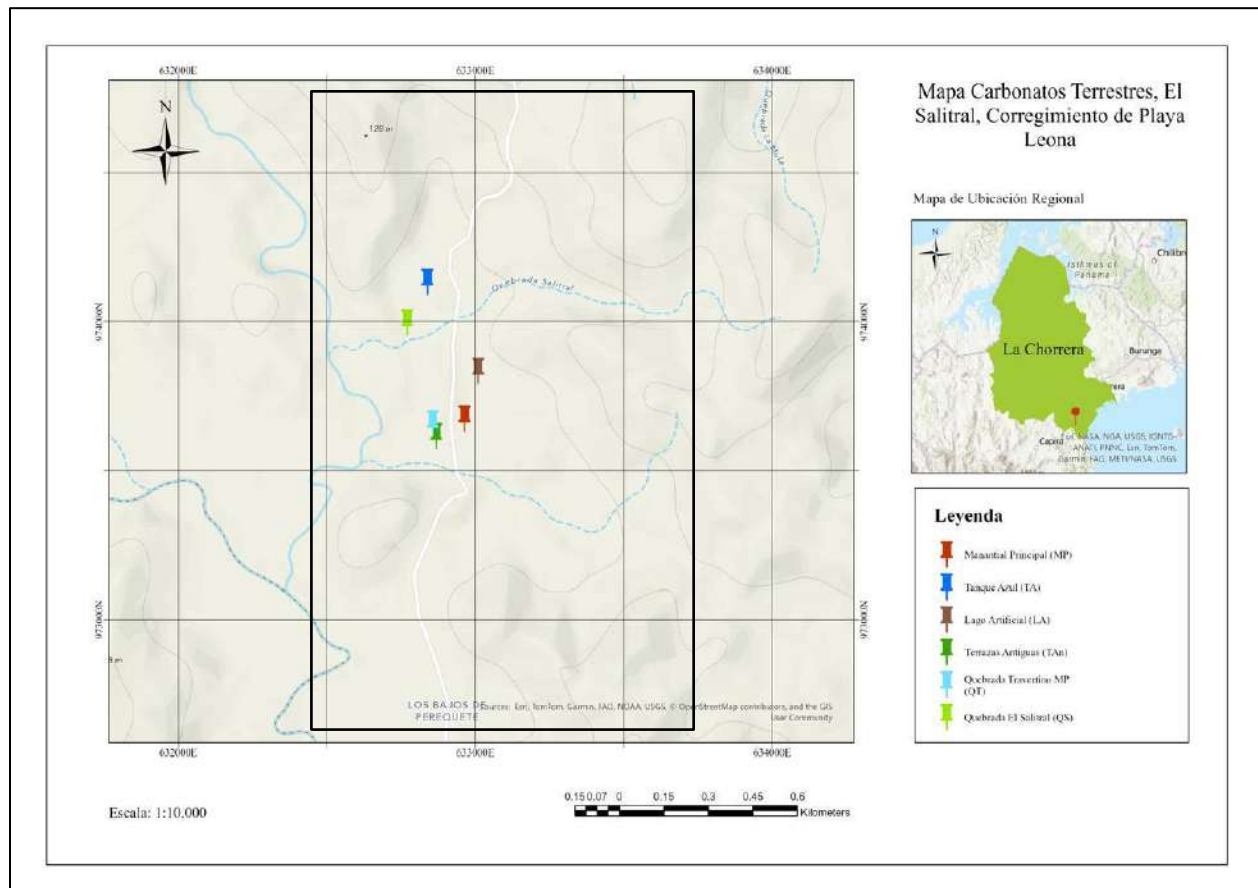


Figura 31. Puntos de control de las litofacies, para una mejor ubicación.

Mapa geológico El Salitral, presenta la geología aproximada del área según el muestreo realizado, mostrando diferentes colores que indican las diferentes rocas que se encuentran y los

posibles contactos que pueden tener.

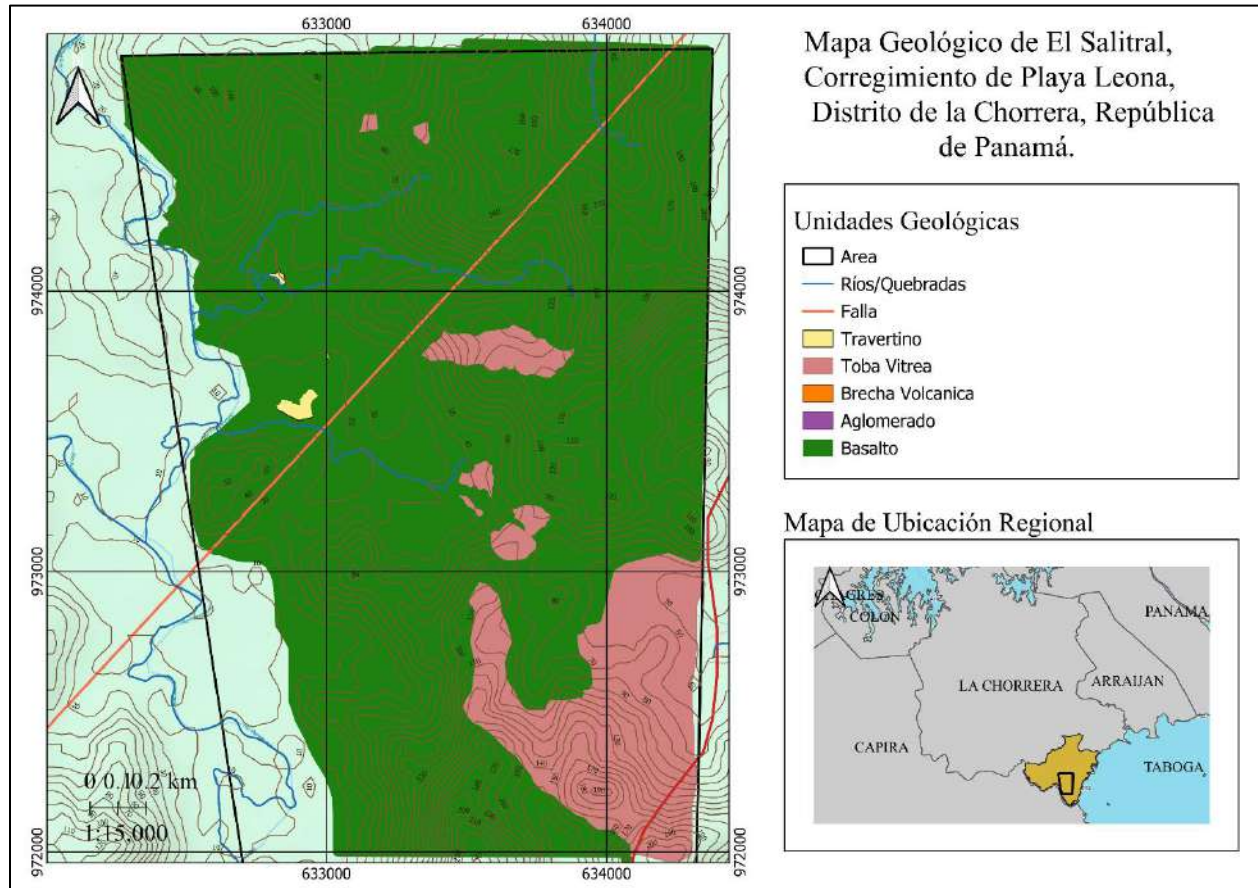


Figura 32. Mapa geológico de El Salitral, donde se aprecian las distintas litologías de la zona.

4.3 Caracterización Morfológica del Depósito Travertino

Los depósitos de travertino tienen diferente morfología de acuerdo con la interacción que hay entre el recorrido de los fluidos hidrotermales, la topografía de la zona y la precipitación; ya sea química o bioquímica, y cómo los agentes erosivos intervienen. En consecuencia, en esta sección se hará una descripción de la morfología del depósito estudiado en El Salitral.

4.3.1 Travertino en Terrazas o Presas

4.3.1.1 Travertino en Terrazas Activas

En la zona se observaron terrazas, se reconocieron por su forma escalonada en distintas zonas, algunas se encontraban cercana al manantial y otros se encontraban a medida que el flujo del agua seguía su curso, como se aprecia en la imagen 36. En estas terrazas se encontraban gran cantidad de musgo o alga, al igual que gasterópodos.



Figura 33 Terrazas activas localizadas en MP y QS. A) En esta zona se encuentran la mayor cantidad de gasterópodos y algunas algas. B) Se observa el flujo de la quebrada (QS) en el cual hay terrazas en algunas zonas se encuentran gasterópodos. C) Serie de terrazas cercana a MP.

4.3.1.1 Travertino en Terrazas Antiguas

Se identificaron de igual modo terrazas donde ya no hay un flujo activo en la actualidad, lo que evidencia un sistema hidrotermal que ha evolucionado en el área. Estas terrazas indican que en el pasado existió una descarga de fluidos geotermales que permitió la precipitación de carbonatos, pero que posteriormente cesó.



Figura 34. Terrazas antiguas, las cuales no presentan flujo en la actualidad.

4.3.2 Travertino en Cascada

En esta litofacies se observan las estalactitas las cuales se forman por la precipitación rápida de travertino cuando el agua fluye por la pendiente. Detrás de la cascada se está formando una

cueva, lo cual es característico de esta morfología.



Figura 35. Travertino en cascada, se observan las estalactitas que se ha formado por la precipitación rápida de carbonato.

4. 4 Caracterización de las litofacies del Travertino

En este apartado se presenta la descripción de las litofacies que se encontraron en la zona de estudio, se realizará una descripción macroscópica de las observaciones de campo. Esta caracterización permite identificar los tipos de litofacies presentes en el depósito de travertino del Salitral en Playa Leona de la Chorrera. Esta información constituye una base de referencia para la identificación de litofacies de travertino en Panamá y permite futuras comparaciones con investigaciones en otros lugares del país.

4.4.1 Pisolitos

Se identificaron pisolitos de diámetros variables en las proximidades del manantial punto MP y TA (Tabla2). Morfológicamente, los pisolitos de mayor tamaño pueden tener una forma globular y una superficie irregular que da la apariencia de un arbusto. Su origen es debido predominantemente a la precipitación de carbonato inorgánico de calcio. Como se menciona en la sección 2.5.3, esta litofacies es característica de sistemas de travertinos termógenos, donde la desgasificación activa de CO_2 y la agitación del agua o pozas someras favorece la formación de estas esferas. Asimismo, se encontraron costras de pisolitos cementadas, sobre el basalto que se encuentra en la zona de precipitación activa del travertino.



Figura 36. A) Pisolitos de diferentes diámetros al redor de MP. B) Costra de pisolitos formado sobre basalto.

4.4.2 Balsas finas como el Papel

Esta litofacies se identificó en el punto MP, LA, TA y QT (Tabla 2), donde la desgasificación de CO_2 es más activa. Consiste en láminas delgadas y quebradizas de carbonato

que flotan en la superficie del agua. En algunas terrazas adyacentes donde el agua esta empozada también se observaron acumulaciones de estas láminas de color blanco depositadas en el suelo.



Figura 37. A) Capa de la lámina fina delgadas como el papel sobre el manantial principal. B) Escorrentía de MP donde se observan la capa de carbonato sobre el agua. C) Capas finas como el papel sobre el sustrato.

4.4.3 Travertino Laminado

Se identificó la litofacies laminada en las zonas MP, QS y QT. En estas zonas son visibles las láminas de travertino, y en la zona MP se observan, además, tapetes microbianos asociados al proceso de deposición de esta litofacies. De igual modo, se reconocieron estromatolitos

asociados a esta facies, identificables por su morfología risada.

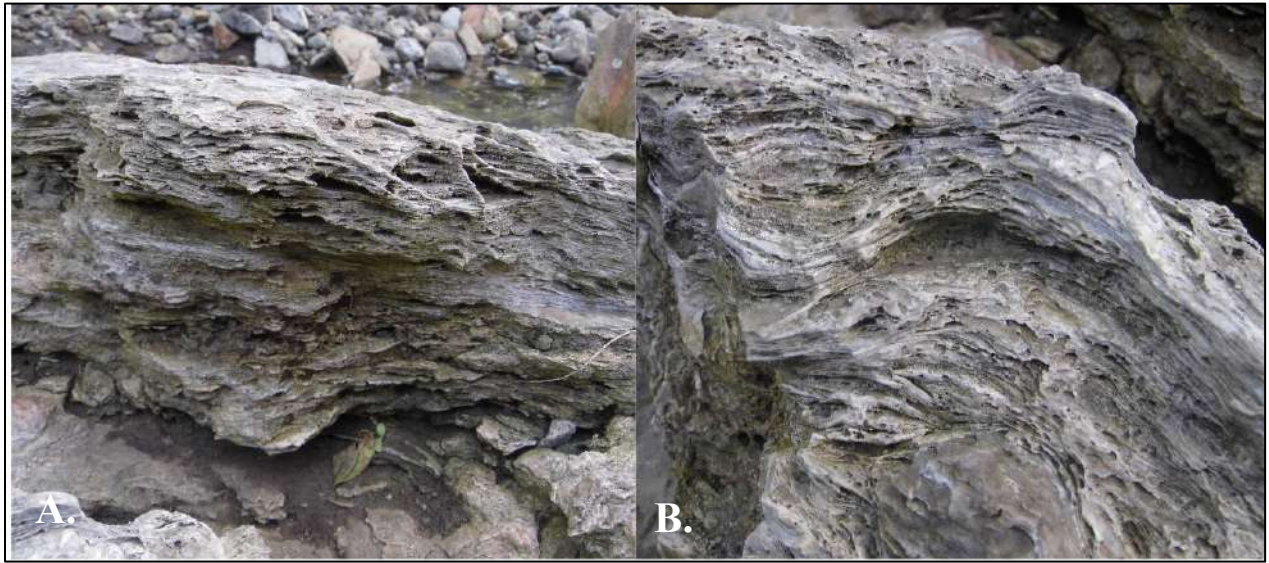


Figura 38. A) Travertino laminado localizado en TS. B) Estromatolitos identificados en el travertino laminado en TS.

4.4.4 Burbujas de Gas Revestidas

Se identificaron burbujas de gas revestidas por carbonato en las zonas MP, TA y LA, asociadas a ambientes de terrazas y aguas estancadas. Estas estructuras se encontraron en asociación con láminas delgadas como el papel lo que confirma su relación con esta litofacies.

Adicionalmente, en estas zonas se observaron tapetes microbianos y gasterópodos.



Figura 39. A) Burbujas de gas revestidas, en el fondo se observan algunos tapetes microbianos. B) Se observa la relación de balsas finas como el papel y las burbujas de gas revestidas.

4.4.5 Travertino de Caña

Esta litofacies se identificó en las zonas MP, QT, TA y QS (Tabla 2). Se caracteriza por la presencia de impresiones de tallos vegetales y gasterópodos, todos ellos recubiertos o reemplazados por carbonato de calcio.



Figura 40. A) Gasterópodos recubiertos de carbonato. B) Material vegetal recubierto de carbonato. C) Impresiones de hojas encontradas en las terrazas (QS y TAn) importantes para el reconocimiento del paleoclima.

4.5 Descripción Macroscópica de las Rocas de la Zona

Se realizó la descripción macroscópica de cada muestra de roca recolectadas en campo, la descripción incluye muestras representativas de las diferentes litologías del área de estudio, con el fin de determinar las relaciones con el depósito de travertino y comprender el contexto geológico local.



Figura 41. Descripción de muestras recolectadas en campo

4.5.1 Grupo Basalto

En la zona se encontraron diferentes tipos basaltos de diversas texturas, que varían entre masivos y amigdaloides; esta última relacionada a procesos hidrotermales que generaron la formación de minerales secundarios como la calcita que se encuentran relleno de las vesículas y fracturas.

4.5.1.1 Basalto Masivo

El basalto masivo se presenta de un color gris oscuro a negro, tiene una textura afanítica, se observan pequeños cristales de plagioclasa, algunas vesículas pequeñas. La roca posee un brillo mate y baja porosidad.



Figura 42. Muestra de Basalto masivo.

4.5.1.2 Basalto Amigdaloides

Este grupo se caracteriza por presentar una textura tipo amigdaloides. Algunas muestras exhiben además una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, amígdalas rellenas de zeolita y escasas vesículas. En ciertos sectores, la matriz se encuentra alterada a óxido de hierro.



Figura 43. Basalto amigdaloides con textura porfídica,

En otros tipos de muestras se encuentran basaltos con amígdalas rellenas de calcita y calcedonia. Su textura es parcialmente afanítica, aunque se logran observar escasos cristales de piroxeno, y se observa de igual forma cierta vesicularidad. Su color es negro.



Figura 44. Basalto porfidico con textura afanítica.

4.5.2 Toba Vítreo

En el área de estudio se identificaron depósitos de tobas vítreo que presentan diferentes grados de alteración hidrotermal. Según esto, se pueden clasificar en tres tipos principales.

4.5.2.1 Toba Vítreo Sana a Levemente Alterada

Esta muestra presenta una composición mineral en la que se observan algunos cristales de cuarzo, plagioclasa y piroxenos. Exhibe una porosidad moderada, con vesículas visibles en algunas áreas. Asimismo, se aprecia meteorización en ciertas zonas, con alteración a zeolita y una matriz de coloración rojiza.

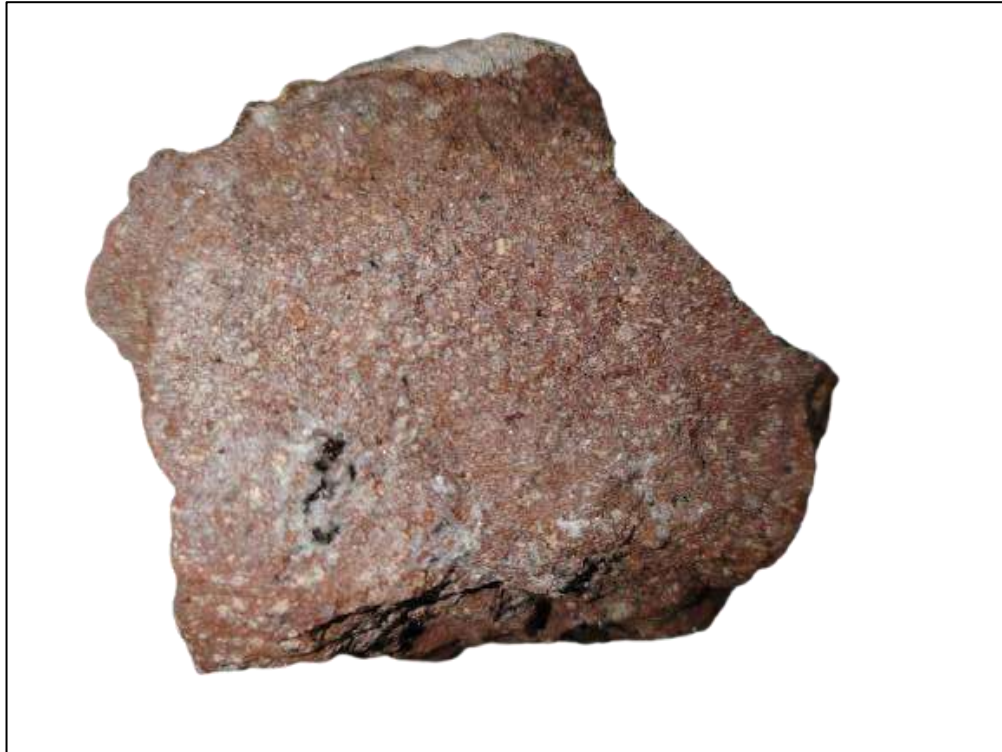


Figura 45. Toba vítrea sana, se observan algunos cristales de cuarzo y vidrio volcánico

4.5.2.2 Toba Vítreo Moderadamente a Intensamente Alterada (Vesicular)

En esta muestra se identifican cristales de cuarzo, así como algunas amígdalas rellenas de cuarzo y zonas con alteración a zeolita. Presenta un alto grado de meteorización. Adicionalmente, se distinguen fragmentos de aspecto vítreo y color negro, los cuales podrían corresponder a restos de vidrio volcánico poco alterado, dentro de una matriz de color rojizo.

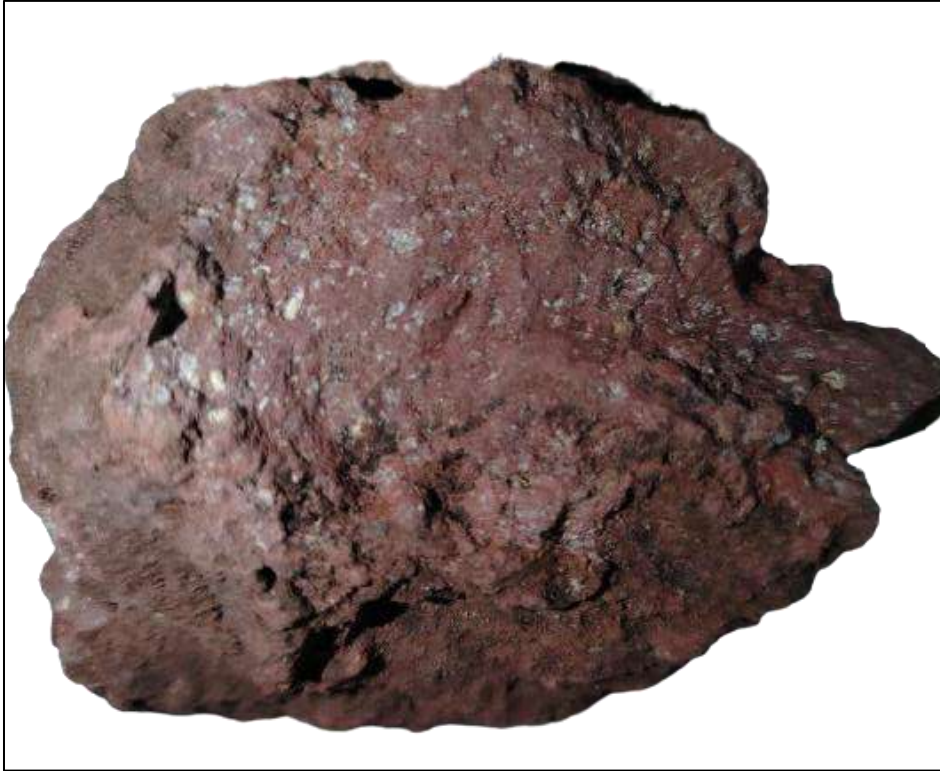


Figura 46. Toba vítrea, modernamente alterada se observan pocos cristales de cuarzos.

La segunda muestra corresponde a una toba vítrea que presenta una porosidad notable y carece de cristales de cuarzo, a diferencia de las muestras anteriores. Se observan amígdalas rellenas de zeolita, asociadas a la presencia de hierro. La roca presenta una coloración negra.



Figura 47. Toba vítrea, altamente alterada se observan vesículas y no tienen cuarzo.

4.5.2.3 Toba Vítre Brechificada e Intensamente Alterada

La muestra presenta una textura fragmentada o brechiforme, compuesta por fragmentos líticos angulosos de basalto. Los cuales se encuentran cementados por una matriz probablemente compuesta por óxidos, producto de alteración hidrotermal. Se observan algunas vesículas y amígdalas rellenas de zeolita. A la vez, se identifican sectores con tonalidades rojizas similares a la toba vítrea no brechificada observada en muestras anteriores (ver figura 48). Los cristales de plagioclasa son escasos dentro del material alterado, y se evidencia la presencia de óxidos de hierro como producto del proceso de alteración. La roca presenta una coloración amarillenta.

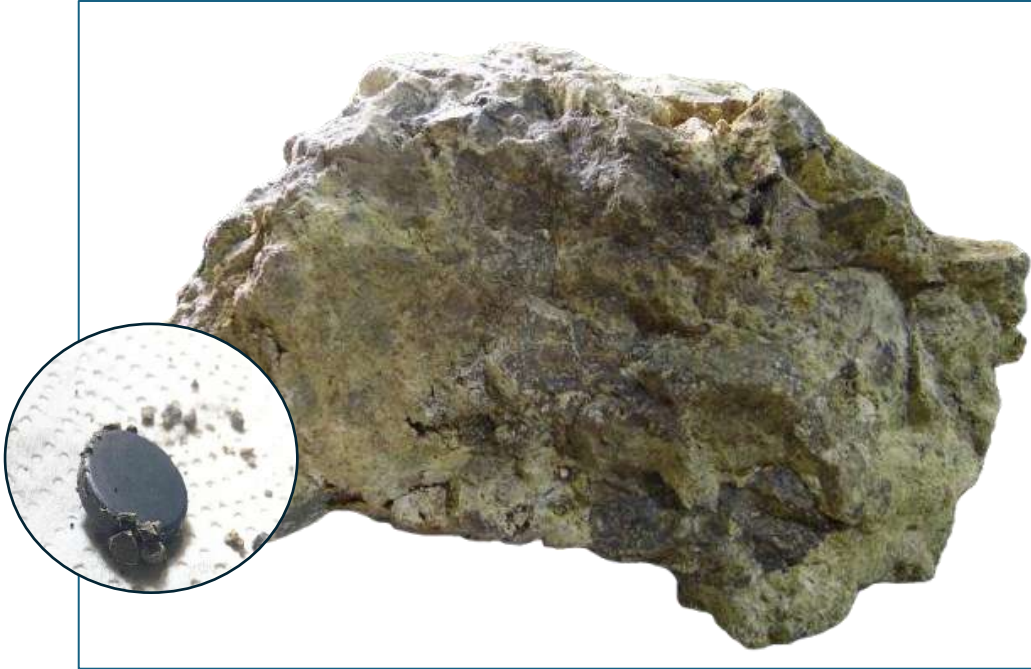


Figura 48. Toba alterada, se puede observar la atracción del imán lo que indica que tiene magnetita.

4.3.3 Travertino

Esta muestra de travertino presenta una textura bandeada y laminada, con una porosidad variable. Su coloración principal es beige. Esta muestra fue recolectada en el punto principal de descarga del sistema hidrotermal activo de la zona de estudio.



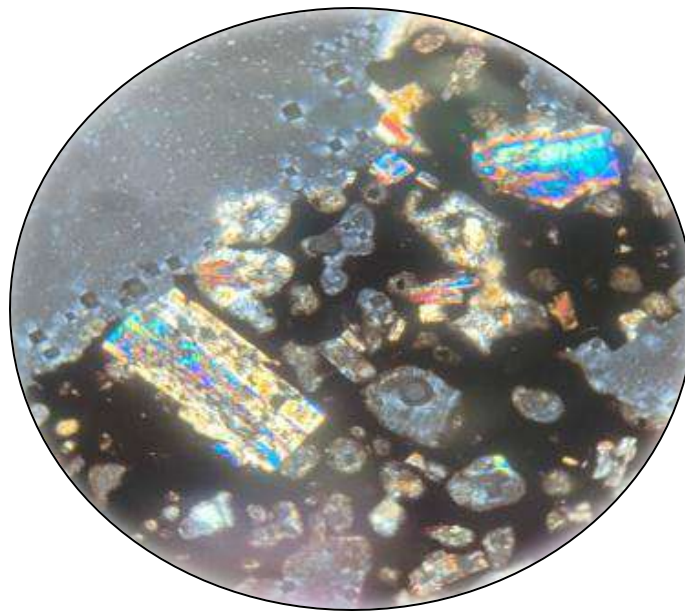
Figura 49. Travertino de la zona de estudio, se ven el bandeamiento o laminas característico de este tipo de rocas.

4.6 Resultado de Análisis Petrológico de las Muestras de la zona

Este apartado presenta los resultados del análisis petrológico de las muestras de la zona, especialmente en el Travertino. La caracterización mineralógica y textural de esta roca, junto con el estudio de las rocas volcánicas asociadas, permite entender los procesos hidrotermales que controlan su formación.

4.6.1 Toba Vítreo Alterada (M2)

La roca presenta alta porosidad y una matriz de vidrio volcánico que se alteró a hierro. Se observan cristales limpios con rayas negras que son cuarzo, junto con cristales de plagioclasas. Se identificó cuarzos secundarios relleno de las amígdalas.

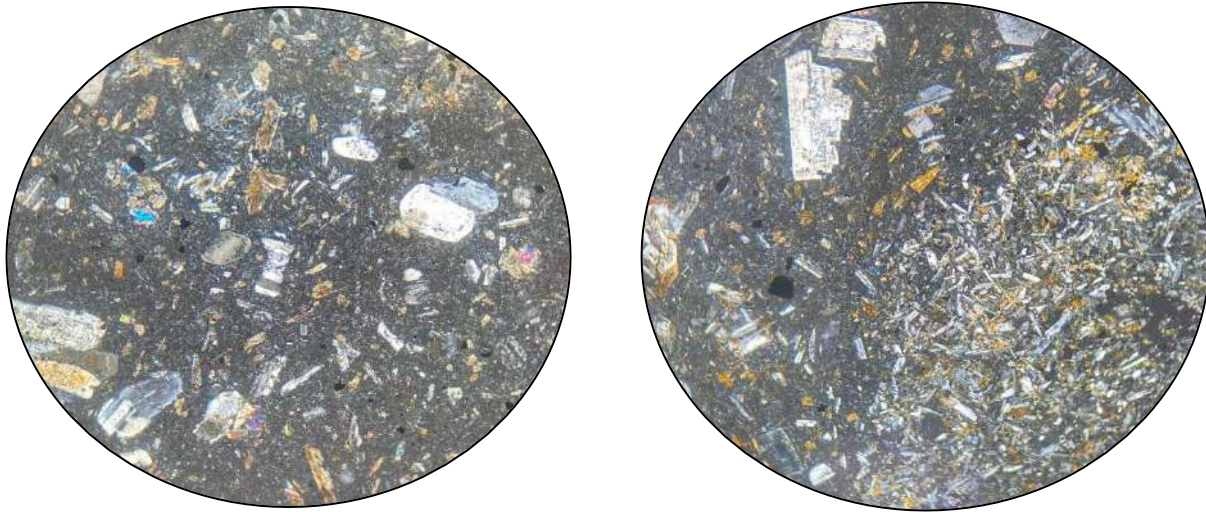


4.6.2 Basalto (M3)

La roca presenta una textura porfídica, con fenocristales inmersos en una matriz microcristalina a vítrea. Mineralógicamente, se compone de microfenocristales de plagioclasa (labradorita) y presencia de fenocristales de piroxeno (augita). La matriz presenta la misma

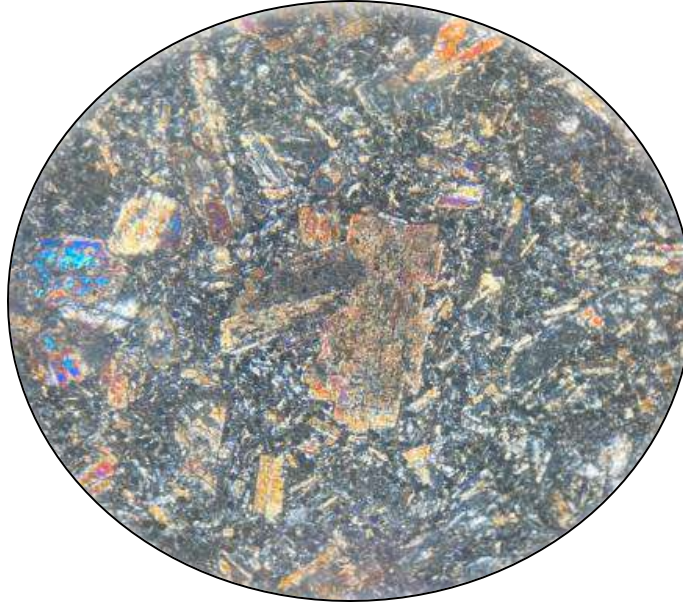
composición, con predominio de plagioclasa, piroxeno y una proporción menor de vidrio volcánico.

Se observa la intrusión de otro flujo de basalto. En cuanto a los procesos de alteración, se identifican minerales transformados a arcilla de color marrón. Adicionalmente, se presenta biotita secundaria, asociada a actividad hidrotermal. Finalmente, la muestra contiene magnetita diseminada en aproximadamente 5% y plagioclasa en similar proporción.



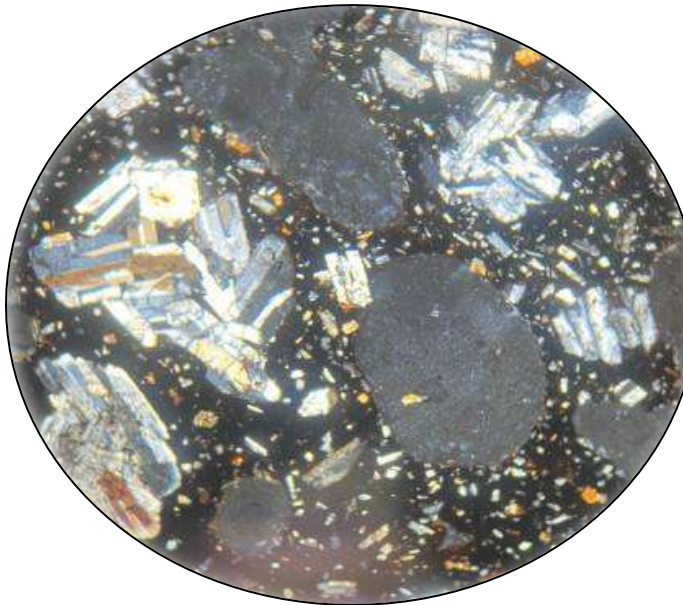
4.6.3 Basalto (M4)

La roca presenta una textura microporfídica, caracterizada por fenocristales de plagioclasa. Mineralógicamente, se identifica la presencia de ferromagnesianos, específicamente piroxeno (augita). En la matriz se observan laminillas de plagioclasa, junto con presencia de magnetita y pirita en aproximadamente 5%. Estos minerales se encuentran ligeramente hidrotermalizados. Simultáneamente, se observa olivino en proceso de meteorización a óxidos de hierro, lo cual es evidente en unas partes específicas de la muestra.



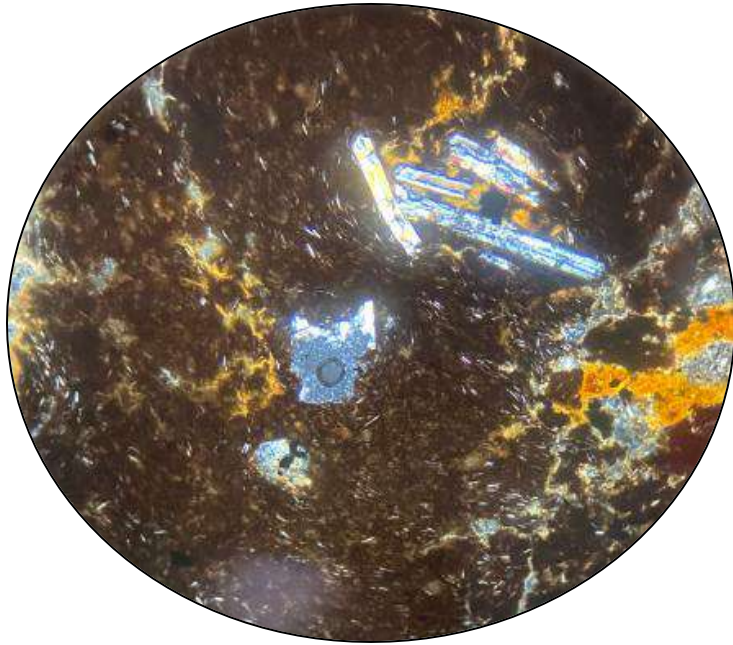
4.6.4 Toba Vítrea (M5)

La muestra corresponde a una toba vítrea de composición basáltica, caracterizada por una matriz vítrea porosa que muestra alteración a óxidos de hierro. Se observan fenocristales de plagioclasa dispersos en la matriz. Cabe destacar la ausencia de cuarzo en la composición mineralógica.



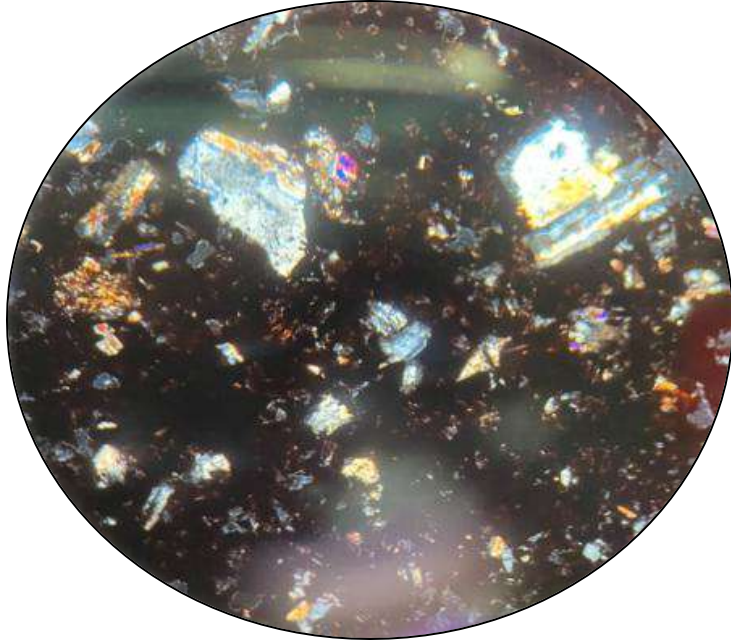
4.6.5 Toba Vítreo (M6)

La matriz de vidrio volcánico se presenta en estado relativamente fresco, permitiendo la identificación de fragmentos vítreos y fenocristales de plagioclasa. Se observan texturas de flujo en el material vítreo. La muestra contiene además fragmentos líticos, una proporción muy escasa de plagioclasas y presencia de óxido de hierro.



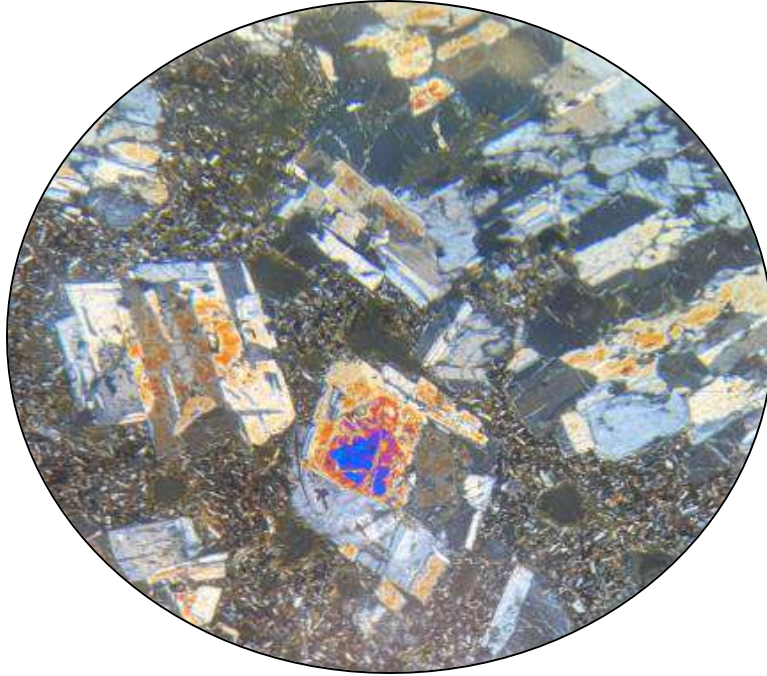
4.6.6 Toba Vítreo (M7)

La muestra presenta idéntica composición a la anteriormente descrita (M6), caracterizada por una matriz de vidrio volcánico que incluye fragmentos vítreos y fenocristales de plagioclasas. Se evidencia escasez de plagioclasas y la presencia de hematita como óxido de hierro predominante.



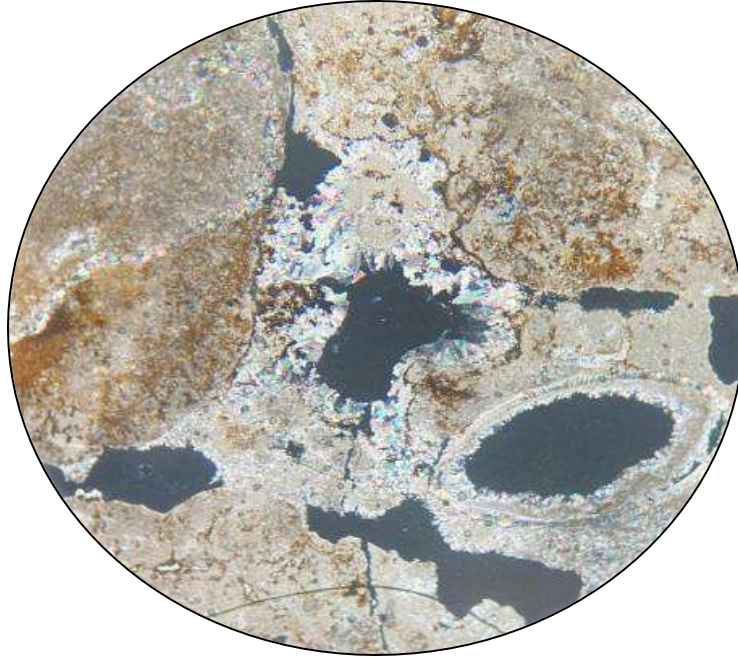
4.6.7 Basalto (M8)

La muestra corresponde a una intrusión de grano medio que presenta fenocristales de plagioclasa en una matriz que incluye vidrio volcánico. Petrográficamente, se observa alteración de olivino a arcilla, evidenciada por las coloraciones marrones. Adicionalmente, se identifican texturas que sugieren la posible interacción de diferentes magmas durante el proceso de formación.



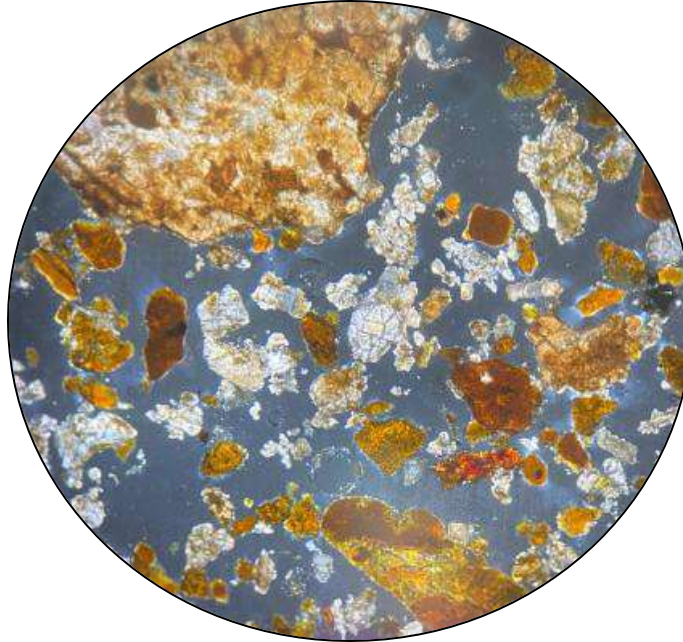
4.6.7 Travertino (TRA-12)

La muestra presenta una porosidad elevada con desarrollo de cristales de calcita y aragonito en los poros. Está compuesta por una base de carbonato con predominio de micrita y calcita de relleno. Se identifican estructuras en forma de óvalo correspondientes a moldes de gasterópodos. Se observan cristales de cuarzo, interpretados como producto de escorrentía, junto con presencia de intraclastos carbonatados. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como wackestone y según Folk como biomicrita (ver imágenes 27 y 28).



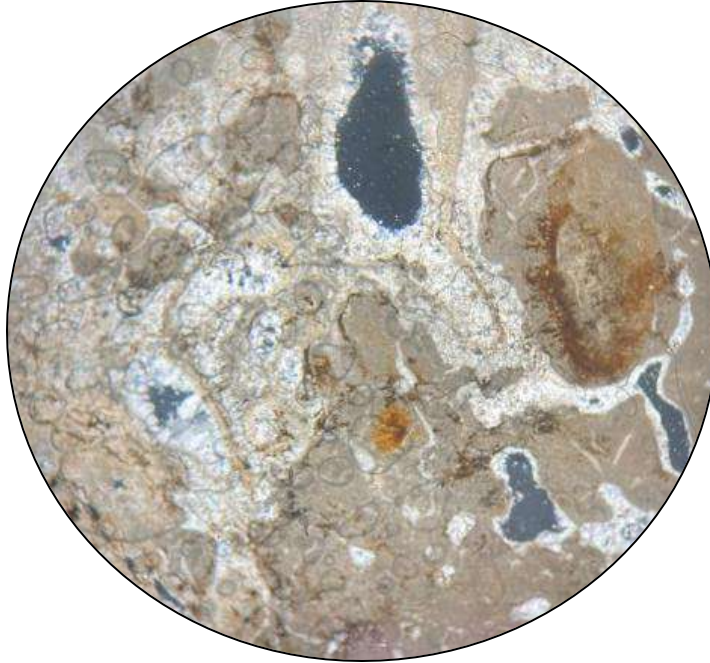
4.6.8 Travertino (TRA – Sand)

La muestra presenta hidróxidos de hierro como minerales de alteración predominantes. Contiene fragmentos de roca compuestos por cristales de plagioclasa. Se identifican cristales de calcita y aragonito. Esta muestra corresponde a sedimentos obtenidos directamente del manantial principal. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como mudstone y según Folk como micrita (ver imágenes 27 y 28).



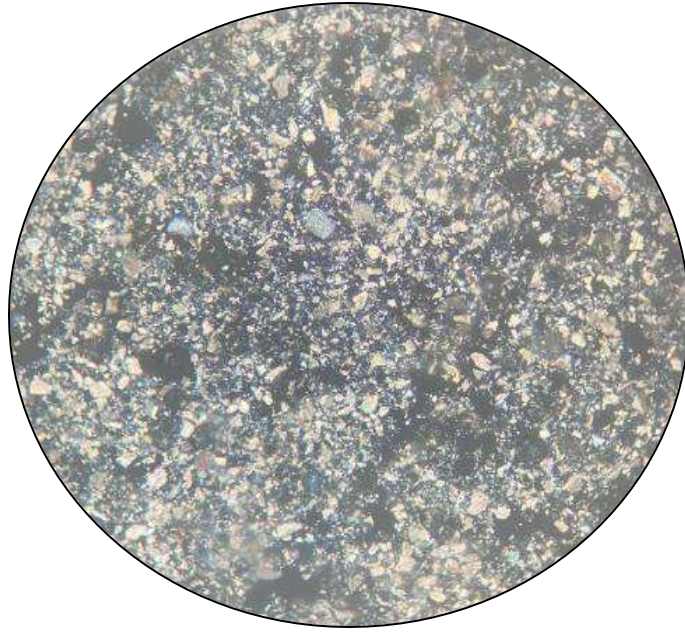
4.6.9 Travertino (TRA-1)

En la muestra presenta micrita y moldes de cristales de calcita y aragonito, junto con lodo micrítico; además, se observan moldes de gasterópodos y cristales de cuarzo. Esta muestra presenta similitudes significativas con las características previamente descritas en la muestra TRA-12. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como wackestone y según Folk como biomicrita (ver imágenes 27 y 28).



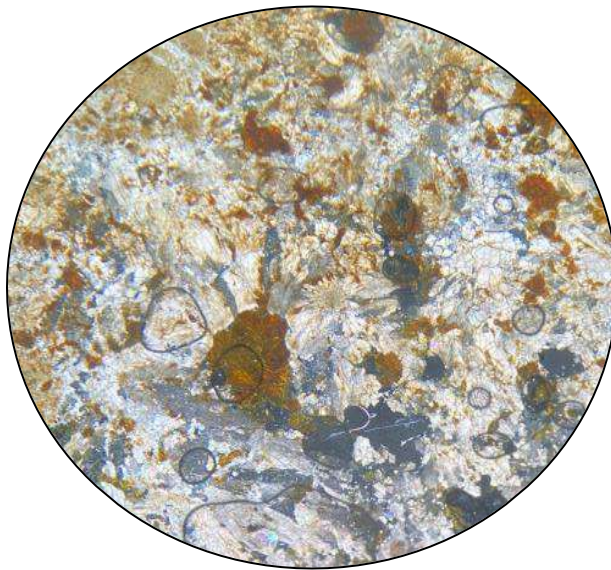
4.6.10 Travertino (TRA-2-1)

La muestra corresponde a sedimentos carbonatados compuestos por fragmentos de calcita con textura de arena compactada y algunos cristales de cuarzo. Presenta alta porosidad con desarrollo de microporos; también, presenta micrita, en donde predominan minerales de cuarzo. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como mudstone y según Folk como micrita (ver imágenes 27 y 28).



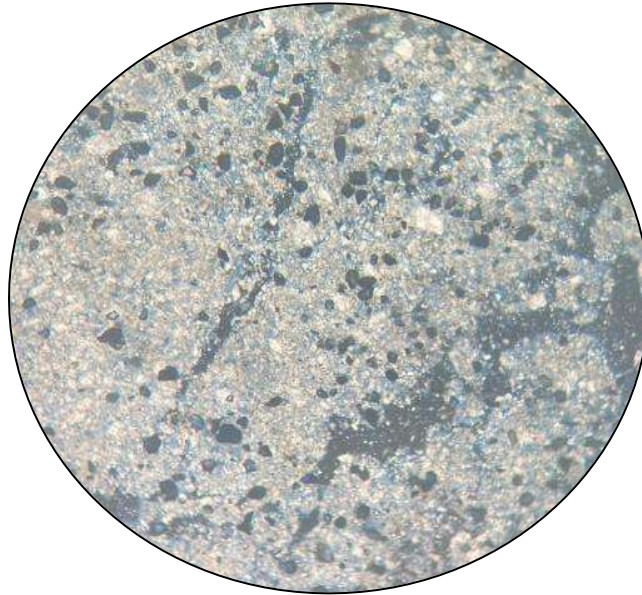
4.6.11 Travertino (TRA-LI)

La muestra presenta, cristales de calcita y aragonito con fragmentos de óxidos y fibras que son aragonito. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como mudstone y según Folk como micrita (ver imágenes 27 y 28).



4.6.12 Travertino (TRA-2)

La muestra presenta, micrita, porosidad alta, compuesta de cristales de calcita y el 2 y 1% de cristales de cuarzo. Según la clasificación de Dunham esta muestra fue clasificada como mudstone y según Folk como micrita (ver imágenes 27 y 28).



4.7 Resultado de Caracterización de las aguas

Para la caracterización de las aguas a partir de los datos obtenidos in situ con la sonda multiparamétrica, se identificaron cuatro grupos hidrogeoquímicos distintos, que representan diferentes etapas en la evolución del fluido geotermal desde su descarga hasta su deposición en forma de carbonato.

Tabla 3. Tabla de datos del muestreo puntual de las aguas en campo.

Datos de la Sonda Multiparametros	Temperatura (°C)	pH	Conductividad (Ms/cm)	TDS (ppm)	ORP (mV)	Salinidad (PSU)	Resistividad (MQ. cm)
1	34.61	5.9	21.58	6114	-126.4	6.89	0
2	32.5	5.83	19.19	9592	-146.7	11.27	0.0001
3	35.2	6.7	19.69	9827		11.52	0.0001
4	34.53	6.6	11.88	5923		6.66	0.0001
5	31.96	5.96	20.08	10.04	-155.7	11.86	0.0001
6	35.62	5.97	20.83	10.42	-109.5	12.28	0
7	40.14	6.71	16.06	8038	-134.8	9.19	0.0001
8	28.38	7.67	20.92	10.36		12.47	0
9	39.76	6.69	312	7095	-64.1	8.03	0.0032
10	29.03	6.29	1367	683	-135.8	0.68	0.0007
11	30.16	6.93	1362	681	-134.7	0.67	0.0007
12	29.03	6.29	1367	683	-135.8	0.68	0.0007
13	41.89	7.6	14.64	7326	-19.9	8.28	0.0001
14	29.37	7.53	18.44	9271		10.92	0.0001
15	30.8	7.78	19.91	9802		11.57	0.0001
16	35.76	6.26	21.01	10.51		12.4	0
17	30.11	6.39	22.39	11.21		13.41	0
18	30.55	5.71	22.42	11.22	-3.3	13.41	0
19	32.52	7.13	2698	1351	49.6	1.38	0.0004

4.7.1 Grupo 1: Aguas del Manantial Principal (Muestras 1-6)

Estas muestras fueron tomadas en el manantial principal y las zonas de drenaje cercanas, este grupo presentó temperaturas entre 31-36 °C, pH ligeramente ácido (5.8-6.7), conductividad alta (19-25 mS/cm), sólidos disueltos totales entre 5923-1042 ppm, potencial redox negativo

(-126 a -156 mV), salinidad alta (6.7-12.3 PSU) y resistividad baja (0-0.0001 M Ω ·cm).

Este grupo representa el fluido hidrotermal no diluido.

La combinación de alta temperatura, alta salinidad y condiciones reductoras indican un origen profundo debido a la interacción agua-roca. El pH ligeramente ácido es ideal para el transporte de minerales antes de su precipitación en la superficie.



Figura 50. A) Preparación del equipo para medición. B) y C) algunos datos obtenidos en el manantial principal en el muestreo.

4.7.2 Grupo 2: Lago Artificial (Muestras 10-12)

Este grupo corresponde a el lago artificial, donde se observaron puntos de ebullición activos y precipitación de carbonatos en las cercanías del lago. Se caracterizó por temperaturas ambientales (29-30°C), pH neutro (6.3-6.9), la conductividad eléctrica es bastante alta (1367mS/cm), los TDS es bajo (683 ppm), potencial redox es negativo (-135 mV), la salinidad también es baja (0.67-0.68 PSU) y su resistividad de igual modo es baja (0.0007 MΩ·cm).

El hecho de tener una conductividad bastante alta y al mismo tiempo una salinidad y sólidos disueltos totales bajos, puede indicar la presencia de sílice disuelta, de igual modo, los puntos de ebullición en los alrededores del lago nos indican una presencia hidrotermal activa, mientras que

el pH neutro favorece a la precipitación de carbonatos observadas cerca de la zona del lago.



Figura 51. A) Muestreo en LA. B) Tomada de datos en punto hidrotermal cercano al lago. C) Tomada de datos en las escorrentías del punto hidrotermal cerca del lago artificial.

4.7.3 Grupo 3: Terrazas De Travertino (Muestra 9,14,15,19)

Este grupo comprende terrazas de travertino a diferentes distancias del manantial, incluyendo las terrazas en quebradas que tenían exposición al sol (muestra 19), tuvieron temperaturas (29-40 °C), pH alcalino (6.7-7.8), una conductividad muy variable (18-2698

mS/cm), los TDS variables (7095-1351 ppm), el potencial redox variables (-64 a + 50 mV), la salinidad es variable (8.0-13.4 PSU) y resistividad baja (0.0001-0.0032 M Ω ·cm).

Este grupo evidencia un proceso de deposición activa. El pH alcalino es el punto importante para la precipitación de travertino. La muestra 19 al igual que el grupo anterior nos indica la presencia de sílice disuelta debido a la alta conductividad con baja salinidad. Por su parte, la muestra 9 presenta una conductividad alta, pero una la resistividad más elevada del estudio, lo que sugiere una composición iónica diferente, posiblemente dominada por hierro. Esto es

compatible con las concreciones de hierros y coloraciones rojizas y naranjas observadas en campo.

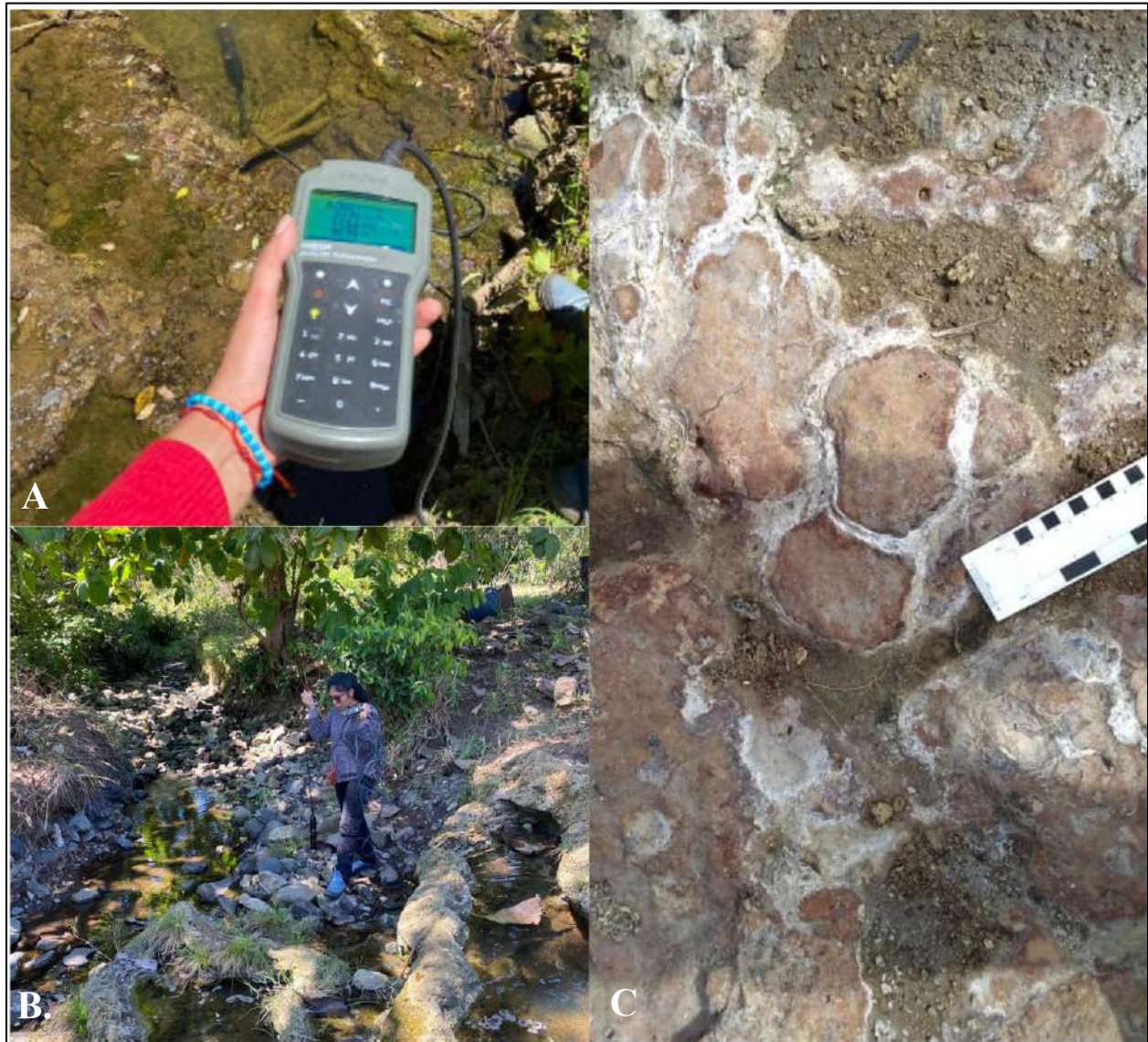


Figura 52. A) Toma de datos en las terrazas cercanas a MP. B) Toma de datos en las terrazas de QS (Muestra 19). C) Concreciones de hierro que influyen en el dato de la muestra 9, debido a su alta conductividad y elevada resistividad.

4.7.4 Grupo 4: Puntos de Transición (Muestra 7,8,13,16,17,18)

Estas muestras corresponden a puntos intermedios entre la descarga principal y las zonas de deposición. Presentó temperaturas distintas (28-42°C), el pH esta entre neutro y alcalino (6.7-7.8), la conductividad eléctrica es intermedia (15-22 mS/cm), los sólidos disueltos totales entre

7326-11.22 ppm, el potencial redox (-135 a -20 Mv) es menos reductor que el grupo 1, la salinidad esta entre (8.3-13.4 PSU) y la resistividad es muy baja (0.0- 0.0001 MΩ·cm).

Estas muestras indican la transición química activa del fluido, mostrando procesos iniciales de desgasificación, enfriamiento y mezcla antes de alcanzar las condiciones para la precipitación.



Figura 53. Se observa una de las zonas de transición donde se da la precipitación de carbonato, al fonde (flecha blanca) señala el manantial principal donde el pH es un poco ácido, en comparación de las zonas distales donde el pH esta entre neutro y alcalino.

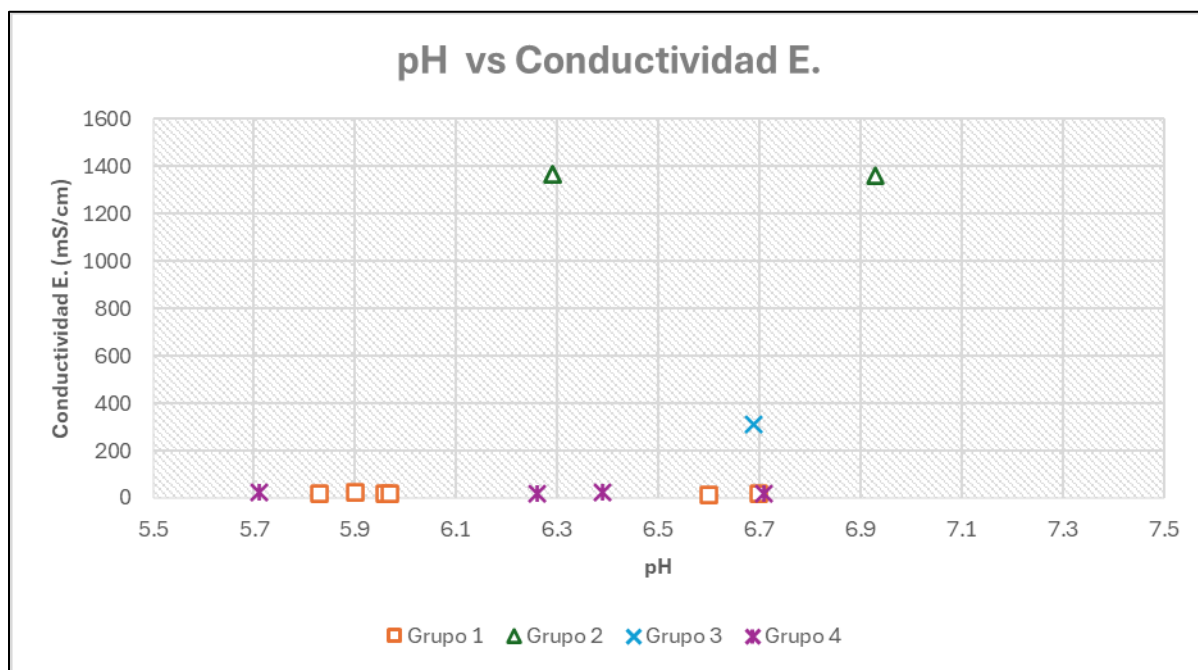
4.8 Gráficas de las Muestras de Agua

Para visualizar la relación entre los parámetros medidos y la evolución del fluido hidrotermal a medida que se aleja de la zona de descarga, se elaboraron gráficas que permitieron identificar la tendencia y agrupamiento de cada uno de los puntos medidos in situ con la sonda

multiparámetros, permitiendo comprender visualmente la fisicoquímica de las aguas de la zona de estudio.

4.8.1 Gráfico pH vs Conductividad Eléctrica

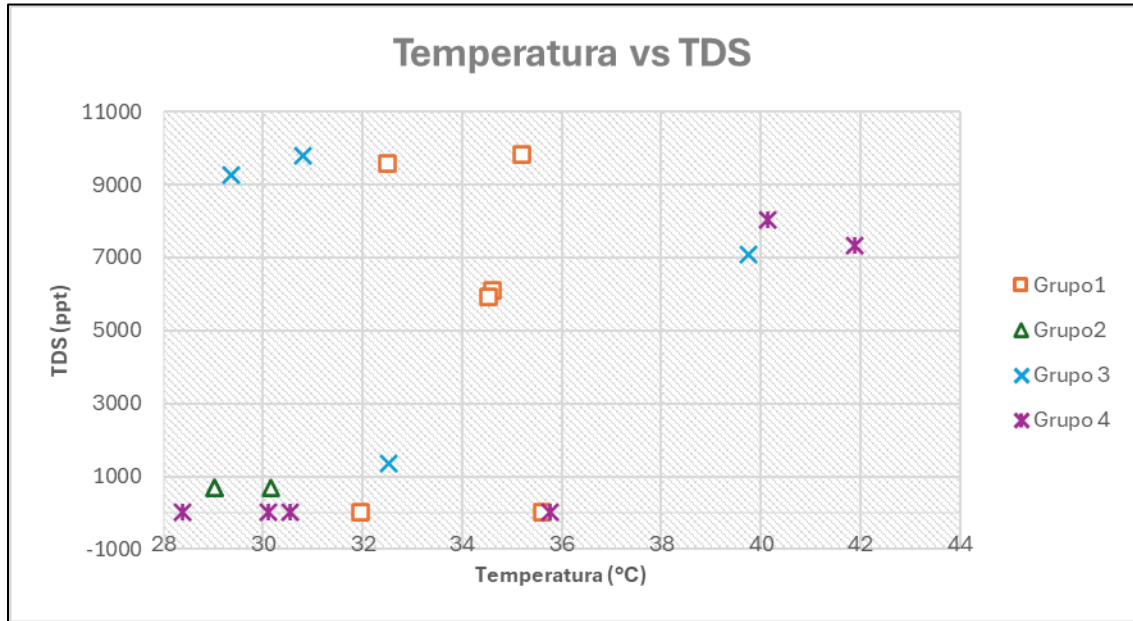
En esta gráfica podemos observar la transición desde las aguas ácidas y mineralizadas (Grupo 1) hacia las aguas con un pH más alcalino donde ocurre la precipitación activa de travertino (Grupos 3 y 4), lo que confirma que a medida que se aleja del punto de descarga se produce un aumento de pH, lo que favorece la deposición de carbonatos. La variabilidad en los valores de conductividad entre los diferentes grupos indica los distintos procesos de concentración mineral.



4.8.2 Gráfico de Temperatura vs TDS

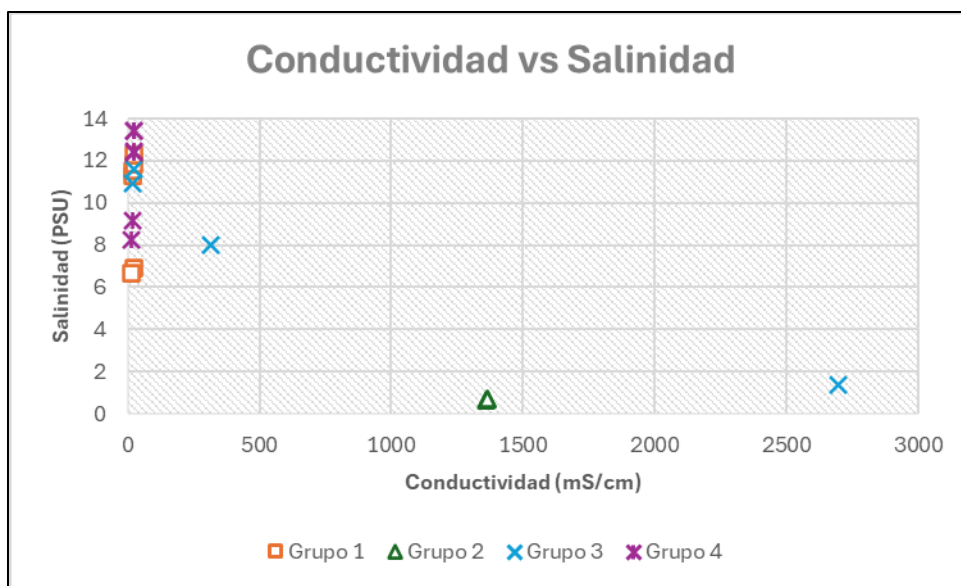
Esta gráfica permite entender la relación entre la temperatura y mineralización en los grupos 1, 3 y 4, donde a mayor temperatura, mayor contenido de TDS. Sin embargo, el grupo 2 presenta una diferencia destacable, ya que muestra valores bajos de TDS en comparación de los demás grupos, a pesar de presentar alta conductividad eléctrica. Esta diferencia confirma la

posiblemente presencia de sílice disuelta, ya que la sílice contribuye a la conductividad, pero no es determinada como salinidad para la sonda.



4.8.3 Gráfico de Conductividad vs Salinidad

Esta gráfica nos evidencia que la mayoría de los grupos siguen la tendencia de alta conductividad y salinidad, sin embargo, el grupo 2 y la muestra 19 rompen este patrón, presentando una conductividad alta junto con una salinidad baja. Esto indica que la alta conductividad en estos puntos no se debe a cloruros u otras sales comunes, sino muy probablemente a la presencia de sílice disuelta, lo que respalda lo presentado en la gráfica anterior.



4.9 Resultado de la caracterización Biológica

En esta sección, los resultados se obtuvieron por el análisis de un biólogo marino especialista de la Facultad de Biología, quien hizo los respectivos estudios a los ejemplares mediante observación macroscópica y microscópica de las características morfológicas. Esta identificación proporcionó datos sobre la clasificación, morfología y zonas de hábitat, que contribuyen en la información clave para la interpretación de las especies que habitan estos depósitos.

4.9.1 Ellobium Stagnalis

En la zona se encontró esta primera especie, la cual tiene como características una concha alargada con abertura más amplia en la parte anterior; columela con dos pliegues y labio externo liso; escultura con estrías longitudinales y finas pústulas en hileras espirales, bajo la sutura de la vuelta corporal; coloración blanco-cremosa. Longitud, 18,5 mm. Vive en las zonas de manglar, en las raíces de los mangles y en el lodo, en un ambiente intermareal. Está adaptado a respirar aire, pero en un entorno muy húmedo y con influencia marina (Cruz y Jiménez., 1994).



Figura 54. Muestra de Ellobium Stagnalis, es una especie de zonas de manglares, en el lodo y zonas intermareal.

4.9.2 Melanoides Tuberculata

Esta segunda especie, Es un caracol con una concha cónica alargada, dextrógira, con hasta 12 vueltas, con una abertura estrecha y un ápice puntiagudo; a menudo las primeras vueltas de la concha se pierden por erosión y corrosión. La concha puede alcanzar hasta 36 mm, presenta costillas verticales, estrías espirales y pequeños tubérculos y es de color marrón claro, con una banda espiral rojiza oscura. Poseen un opérculo córneo de color castaño oscuro sobre la parte posterior del pie.

Respiran mediante una branquia interna, a través de la cual obtienen oxígeno disuelto en el agua; no tienen sifón. En cuanto a su habitat, es un caracol de agua dulce pero capaz de soportar altas salinidades y también altas temperaturas (Vogler, et.al., 2012).



Figura 55. Muestra de Melanoides Tuberculata, especie de agua dulce.

4.9.3 Potamocorbula Amurensis

Esta última especie también conocida como almeja asiática o almeja del río Amur, es una especie invasora de almejas que se ha establecido en Panamá, especialmente en áreas de manglares con fondos lodosos. Se caracteriza por ser una pequeña almeja de hasta 2-3 cm de longitud, de color blanco, beige o amarillento, con valvas delgadas y suaves. También conocida como almeja asiática, es una pequeña almeja de agua salada que puede alcanzar hasta 2-3 cm de longitud. Sus valvas son típicamente blancas, beige o amarillentas, con una superficie lisa y una escultura concéntrica tenue.

La valva derecha es más grande y se superpone ligeramente a la izquierda. Vive en ambientes estuarinos y de agua salobre (Smithsonian Environmental Research Center, s. f.).



Figura 56. Muestra de Potamocorbula Amurensis. Es una almeja de aguas saladas y una especie invasora.

Capítulo 5 Discusiones

El presente capítulo tiene como fin interpretar los resultados obtenidos en las fases de campo, laboratorio y gabinete, comparándolo con el marco teórico establecido. Se analizarán de forma conjunta las evidencias petrológicas, los parámetros fisicoquímicos medidos in situ, morfológicas y fauna asociada, para finalmente evaluar la hipótesis inicial que plantea un origen termógeno para el travertino de El Salitral, asociado a un sistema hidrotermal profundo controlado por fallas y con posible remanencia volcánica. Esta discusión permitirá situar el depósito de travertino dentro de un contexto geológico, destacando sus similitudes con otros sistemas mencionados en el marco teórico.

5.1 Discusión de la Hipótesis y Objetivos

La hipótesis de trabajo propuso que los carbonatos continentales de El Salitral de la Chorrera corresponden a travertinos termógenos, dicha formación está controlada por una falla geológica que facilita la evasión de CO₂ y está asociada a un sistema hidrotermal profundo con remanencia volcánica. Los resultados obtenidos dan indicios importantes para apoyar esta hipótesis. El cumplimiento de los objetivos específicos, desde la clasificación de la litofacies, la caracterización de las aguas y la identificación de la fauna adaptada a estas aguas cálidas.

Finalmente, la elaboración de un mapa geológico y el análisis petrológico permitieron comprender el contexto geológico y la relación con rocas volcánicas alteradas hidrotermalmente, abordando así el objetivo general de describir y comprender el origen de estos carbonatos.

5.2 Origen Termógeno del Travertino

Los parámetros fisicoquímicos medidos in situ en el manantial principal (Grupo 1) son adaptables con un fluido de origen termógeno. Las temperaturas entre 31 y 36 °C superan las

temperaturas de 20-30°C propuestas por Pentecost (2005) y Glover y Robertson (2003), esto es una diferencia notable de los manantiales termales de los de agua fría (meteógenos). El pH ligeramente ácido (5.8-6.7) sugiere que el agua emerge cargada de CO₂ de origen profundo, ya sea magmático o resultante de la interacción agua-roca a alta temperatura, en este proceso el CO₂ disuelto reacciona con el agua, para formar ácido carbónico (Pentecost 2005).

La alta conductividad eléctrica (19-25 mS/cm) y los sólidos disueltos totales (5923-10.42 ppm) indican una intensa interacción agua- roca durante la circulación profunda del fluido y enriqueciéndolo de distintos minerales disueltos. Además, el potencial redox negativo (-126 a -156 mV) confirma las condiciones reductoras, típicas de un ambiente aislado de la atmosfera oxigenada. Esta combinación de alta temperatura, alta salinidad es un distintivo de los sistemas hidrotermales termógenos (Pentecost, 2005). Estos datos proporcionan, para este sitio una caracterización detallada que corrobora los reportes históricos isotermales en la zona (Mérida, 1973).

5.3 Proceso de Precipitación y Fisicoquímica de las Aguas

La fisicoquímica de las aguas medidas in situ indican los factores responsables de la precipitación de travertino. La transición desde el manantial principal (Grupo 1: aguas ácidas, calientes y reductoras) hacia las terrazas de travertino (Grupo 3: aguas alcalinas, pH 6.7-7.8) es importante, ya que este incremento en el pH se debe a la desgasificación de CO₂ al entrar el fluido en contacto con la atmósfera, provocando la sobresaturación y precipitación de carbonato de calcio (Pentecost, 2005).

Lo antes mencionado es compatible con lo propuesto por French y Barnes (1979) y Friedman (1970), quienes descartaron la evaporación como proceso principal. La presencia de litofacies como burbujas de gas revestidas y balsas finas como el papel es una evidencia directa de

esta desgasificación activa (Özkul, 2002; Riding, 1998). Un dato importante es la irregularidad del Grupo 2 (Lago Artificial) y la muestra 19, que presentan una conductividad eléctrica muy alta (1367-2698 Ms/cm) pero una salinidad y TDS bajos. Esta diferencia sugiere la presencia de sílice disuelta, un factor común en fluidos hidrotermales que contribuye a la conductividad, pero no es medida como salinidad. Esto indica que el sistema tiene el potencial para formar depósitos de sílice, un indicador más de un sistema hidrotermal activo (Moeck, 2014).

5.4 Litofacies y Morfología

Las litofacies identificadas son características de un sistema travertínicos termógenos. Los pisolitos encontrados cerca de los manantiales (MP, TA) se forman generalmente en pozas someras con agitación y desgasificación activa, donde la precipitación inorgánica de carbonato genera esferas (Chafetz, 1983; Risacher y Eugster, 1979). Las balsas finas como el papel son el resultado directo de la precipitación de calcita/ aragonito en la interfaz aire -agua, favorecida por la desgasificación en aguas estancadas (Riding, 1998). El travertino laminado con estructuras estromatolíticas evidencia la interacción entre la precipitación abiótica y la intervención microbiana en ambientes de poca profundidad (Gandin, 2014).

Las morfologías constructivas, como las terrazas y cascadas activas, indican que la precipitación de carbonato lo cual es típico de sistemas termógenos con alta descarga de carbonato disuelto (Pentecost, 2005). La presencia de terrazas antiguas inactivas sugiere que el sistema hidrotermal ha tenido cambios en su actividad o en los niveles freáticos a lo largo del tiempo, lo que tiene implicaciones para estudios neotectónicos futuros, ya que los travertinos pueden registrar dicha actividad (Altunel 1996; Brogi et al. 2010).

5.5 Características Petrográficas Asociadas a la Actividad Hidrotermal

El análisis petrográfico confirma el contexto geológico propuesto en la hipótesis. La identificación de basaltos y tobas vítreas en el área de estudio sustenta la remanencia volcánica como fuente probable de calor para el sistema. Por otro lado, la evidencia petrográfica indica una interacción de los fluidos hidrotermales con estas rocas volcánicas (M2, M3, M4, M5 y M8), debido a la presencia de zeolita, calcita secundaria, clorita y óxido de hierro, la alteración de minerales ferromagnesianos a arcilla y la presencia de pirita (M4), es un indicador clave de condiciones asociadas a sistemas hidrotermales.

Mineralógicamente, la identificación de aragonito y calcita en las láminas delgadas de travertino es consistente con la formación en un rango de temperaturas. La coexistencia de ambos polimorfos, como señala Fouke et. al (2000), es típica de 30 a 43°C, el cual coincide con las temperaturas tomadas en campo en las zonas de precipitación activa. La textura porosa y la presencia de moldes de gasterópodos e intraclastos observadas en las láminas de travertino indican un ambiente deposicional, influenciado por la desgasificación y procesos bióticos.

5.6 Evidencias Ambientales a través de la Caracterización Biológica

La caracterización biológica realizada por el especialista (ver sección 4.9) proporciona información valiosa para interpretar las condiciones ambientales del sistema. De acuerdo con los resultados del análisis taxonómico, la presencia de *Melanoides tuberculata* identificada como un caracol de agua dulce con alta tolerancia a temperaturas elevadas constituye un bioindicador de las térmicas del sistema travertínico actual.

La convivencia de especies de diferentes ambientes, reportadas en el mismo análisis *Ellobium stagnalis* (asociada a manglares) y *Potamocorbula amunensis* (ambiente de aguas salobre), sugiere dos escenarios ambientales del sitio:

1. **Mezcla de aguas o influencia marina pasada:** la presencia de estas especies costeras en un ambiente actualmente continental podría reflejar una fase de influencia marina o estuario en el pasado, cuyos restos han quedado preservados en los depósitos de travertino.
2. **Transporte:** Alternativamente, estas especies pudieron ser transportadas desde sus ambientes originales costeros (ubicado a pocos kilómetros) mediante eventos de escorrentías, crecidas o incluso actividad antrópica y posteriormente incorporada al sedimento de carbonato.

La asociación de esta fauna documentada por el biólogo corrobora la existencia de una interacción de agua dulce y cálida en el sistema actual a través de *M. tuberculata*, pero también revela una complejidad e historia ambiental importante de este depósito de travertino. Este hallazgo resalta el valor de la zona de estudio (El Salitral) no solo como registro de actividad hidrotermal, sino también como indicador de paleoambiente en la región, como ha sido documentado en otros depósitos de travertino (Pentecost, 2005).

5.7 Modelo Propuesto para El Salitral

El modelo para la formación de travertino en El Salitral, está vinculado procesos profundos y superficiales que fueron identificados en la zona de estudio. Este modelo presenta una adaptación específica de los modelos de sistema hidrotermal abierto termógeno (Pentecost, 2005;

Ballard,1999) y sistemas controlados por estructuras (Moeck, 2014) al contexto geológico particular del área de estudio.

La fuente de calor proviene de la remanencia volcánica de una cámara magmática antigua, el cual proporciona el gradiente geotérmico necesario. Las aguas meteóricas se infiltran y circulan a profundidad, siendo calentadas por este sistema. Las tobas vítreas identificadas en el área representan depósitos volcánicos extrusivos, piroclásticos que forman parte de la secuencia volcánica suprayacente.

Durante la circulación profunda, los fluidos se enriquecen de CO₂ de origen profundo y en iones de calcio (Ca²⁺). Este enriquecimiento ocurre predominantemente mediante la interacción con roca carbonatada antigua en el basamento y con minerales cálcicos en las rocas volcánicas.

Al alcanzar la superficie, los fluidos emergen como manantiales termales (MP, TA, LA). La desgasificación del CO₂, provoca el aumento de pH y la sobresaturación del carbonato de calcio, produciendo la precipitación de travertino. Este proceso construye las morfologías observadas (terrazas y cascadas) y las litofacies características (pisolitos, balsas y laminaciones).

Si bien no se identificaron fallas expuestas durante el trabajo de campo, los puntos hidrotermales sugieren un posible control estructural con orientación NW-SE. El manantial principal (MP) y los puntos del lago artificial (LA) presentan una alineación en este sentido, compatible con el sistema regional de fallas documentados en el mapa Geológico de Panamá (Dirección de Recursos Minerales, 1990). La posición del Tanque Azul fuera de esta alineación podría explicarse principalmente por la intersección con fracturas secundarias.

Por otro lado, la presencia de terrazas antiguas inactivas junto a las activas indica que el sistema hidrotermal ha experimentado variaciones en su actividad, posiblemente relacionadas con

cambios en los niveles freáticos o la evolución del sistema de fracturas. Por lo tanto, este modelo de sistema hidrotermal abierto (Termógeno), resume todas las observaciones de campo y laboratorio, confirmando que los depósitos de El Salitral son travertinos termógenos formados por un sistema hidrotermal profundo, asociado al contexto volcánico regional de Panamá Oeste.

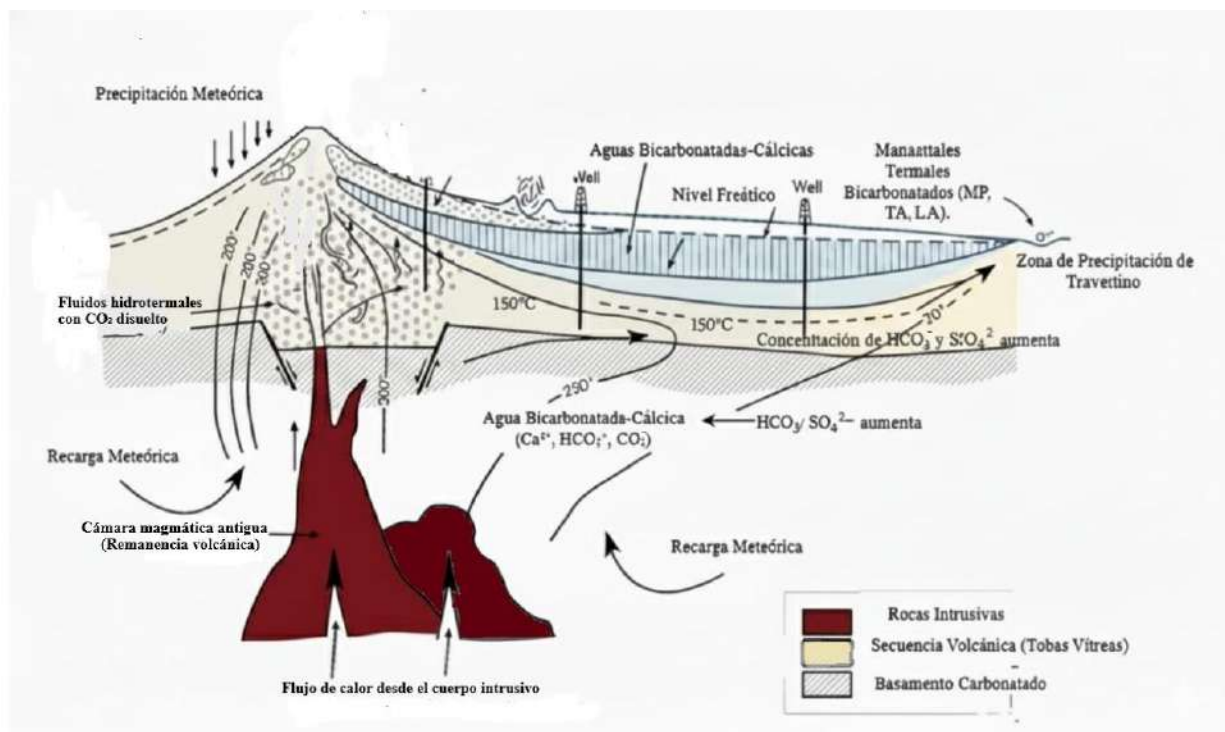


Figura 57. Modelo conceptual general de un sistema hidrotermal abierto termógeno, adaptado al contexto para el caso de El Salitral modificado de (Ballard, 1999). Se observa la circulación de aguas meteoricas que, al interactuar con el basamento volcánico y carbonatado, generan fluidos bicarbonatados-cálcicos ricos en CO₂. Estos ascienden mediante fracturas NW-SE hasta la superficie, donde la desgasificación del CO₂ produce el aumento de pH y la consecuente precipitación de carbonato de calcio, construyendo las terrazas activas e inactivas documentadas en el área de estudio.

5.8 Limitaciones del Estudio

Las evidencias presentadas sustentan de manera sólida el modelo termógeno propuesto, pero es importante mencionar las limitaciones de esta investigación para contextualizar sus hallazgos y orientar a futuros trabajos. El mapeo geológico se realizó mediante puntos de afloramientos georreferenciados y en la fase de gabinete se extrapola la distribución de las litologías, esto debido a la lejanía y difícil acceso de las zonas montañosas aledañas a la zona de

estudio. Por lo tanto, esta limitación introduce una incertidumbre interpretativa en los contactos entre las litologías.

La caracterización físicoquímica del agua se realizó en muestreos puntuales. La falta de registro continuo o monitoreo en estaciones secas y lluviosas impide evaluar la variabilidad del sistema hidrotermal con respecto a los factores climáticos. Este estudio se centró en las manifestaciones superficiales del sistema. La ausencia de métodos geofísicos limita la comprensión de la geometría, profundidad y extensión real del sistema geotermal, el espesor del depósito de travertino y las estructuras que lo controlan en el subsuelo.

De igual modo, no se realizaron análisis de isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) en el travertino, los cuales hubieran permitido conocer con mayor precisión el origen del CO_2 (magmático u orgánico) y los procesos de precipitación.

De igual modo, no se analizó la relación Mg/Ca en las aguas para comprobar los hallazgos petrográficos. Adicionalmente, la ausencia de análisis isotópicos de plomo (Pb) y estroncio (Sr) impidió caracterizar con mayor detalle las fuentes de calcio y los procesos de interacción aguas-roca en el sistema profundo. El análisis de los gasterópodos se limitó a la identificación taxonómica. Estudios como isótopos en sus conchas, podrían refinar las interpretaciones paleoambientales.

A pesar de estas limitaciones, la integración de distintas metodologías (mapeo geológico, petrografía, caracterización hidrogeoquímica in situ y análisis biológico) proporcionan una base de evidencias que validan el modelo conceptual planteado. Estas limitaciones, en lugar de invalidar los resultados proporcionan el camino para investigaciones futuras que permitan profundizar el entendimiento de este depósito de travertino y sistema hidrotermal complejo.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Luego del desarrollo de la presente investigación, que integró metodologías de campo, gabinete y laboratorio, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Los depósitos de carbonatos continentales en la zona de El Salitral, corregimiento de Playa Leona, se clasifican como travertinos termógenos. Esta clasificación se sustenta en la identificación de litofacies como pisolitos, balsas finas como el papel, travertino laminado con estromatolitos, burbujas de gas revestidas y travertino de caña, todas ellas asociadas a sistemas termales.
2. La hipótesis de un origen termógeno para el travertino se valida mediante los parámetros fisicoquímicos de las aguas. El manantial principal presenta temperaturas elevada, pH ligeramente ácido, alta conductividad eléctrica y condiciones reductoras, lo que indica un fluido hidrotermal profundo enriquecido con CO₂ y minerales disueltos. La posterior desgasificación de CO₂ es el que produce el aumento de pH y la precipitación del carbonato de calcio en las terrazas y cascadas.
3. El análisis petrográfico confirma que el depósito de travertino esta sobre un basamento volcánico compuesto por basaltos y tobas vítreas y han sufrido alteración hidrotermal. La fuente de calcio para la formación de travertino se atribuye a la interacción de los fluidos hidrotermales con rocas carbonatadas antiguas y aportes de minerales cálcicos presentes en las rocas volcánicas.

4. La fuente de calor puede ser una cámara magmática antigua, que actúa como remanente térmico aportando el calor suficiente para que las aguas alcancen temperaturas elevadas.
5. En la zona aflora la formación Cerro Viejo y no la formación Tucue, debido a que la litología observada concuerda con las características de dicha formación. Además, los travertinos activos corresponden al periodo cuaternario, tal como se indica en esta unidad litológica.
6. La caracterización biológica de los gasterópodos revela la presencia de *Melanoide tuberculata*, un caracol de agua dulce tolerante a altas temperaturas, que actúa como un bioindicador de acuerdo con el ambiente termal actual. La convivencia de especies salobres (*Ellobium stagnalis* y *Potamocorbula amurensis*) sugieren una historia ambiental compleja, posiblemente con influencias marinas o estuarias pasadas o transporte, lo que es importante para el estudio del paleoambiente.
7. Se propone un modelo de sistema hidrotermal abierto (termógeno) para El Salitral. En este modelo, las aguas meteóricas se infiltran, son calentadas por la cámara magmática antigua, se enriquecen en CO_2 y Ca^{2+} al interactuar con sustrato rocoso y asciende a través de fracturas (con una posible orientación NW-NE) para precipitar travertino en superficie. La presencia de terrazas antiguas inactivas junto a las activas indica variaciones en la actividad del sistema a lo largo del tiempo.
8. Este estudio es la primera caracterización geológica de un depósito de travertino termógeno en Panamá, documentando su ocurrencia, litofacies, contexto geológico y formación. Aportando un nuevo conocimiento científico sobre este tipo de ambientes sedimentarios e hidrotermales en el país.

6.2 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar análisis de isotopos estables, para determinar el origen de CO₂ con mayor precisión durante su formación. Asimismo, el análisis de isotopo de estroncio y plomo, y la determinación de la relación Mg/Ca en las aguas para identificar las fuentes específicas de calcio.
2. Realizar estudios geofísicos, que permita definir la geometría, profundidad y extensión del depósito de travertino y tamaño del reservorio geotermal, así como identificar estructuras (fallas, fracturas) que controlan el ascenso de los fluidos.
3. Implementar un programa de monitoreo de estaciones secas y lluviosas para ver el comportamiento de los manantiales en cada época y así entender la variabilidad del sistema.
4. Incorporar estudios botánicos en los puntos de formación de travertino. La vida vegetal y la actividad microbiana en el agua y la superficie rocosa son elementos claves, ya que sus procesos biológicos, como la fotosíntesis, pueden influir en la precipitación que da a la formación de la roca. Este análisis del componente biológico es esencial para comprender la formación de estos depósitos.
5. Profundizar en el estudio de los gasterópodos, ya que estos organismos son excelentes indicadores paleoambientales para la reconstrucción detallada de ambientes pasados.
6. Dado que el área se encuentra en fincas privadas, se recomienda destacar el valor geológico del sitio, dirigido a los propietarios de las fincas y a la comunidad, para que comprendan el potencial del sitio para el geoturismo y la educación científica,

bajo un modelo de gestión sostenible y consensuado que respete los derechos de propiedad.

7. Extender este tipo de estudio a otras localidades de Panamá donde se reporten o sospeche depósitos de travertinos, con el fin de establecer una base nacional sobre estos sistemas y comprender su distribución; así como la relación con el contexto tectónico y volcánico del istmo, para determinar las diferencias y similitudes entre los distintos depósitos.

Bibliografía

- Alessandro Mancini, G. D. (2021). *3D reconstruction of the Lapis Tiburtinus (Tivoli, Central Italy): The control of climatic and sea-level changes on travertine deposition.*
- Altunel, E. (1996). *PAMUKKALE TRAVERTENLERİNİN MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ, YAŞLARI VE NEOTEKTONİK ÖNEMLERİ.*
- Anaya, M. V. (2014). *Caracterizacion geologica de los travertinos.*
- Andrea Brogi, E. C. (2010). *Studying travertines for neotectonics investigations: Middle–Late Pleistocene syn-tectonic travertine deposition at Serre di Rapolano (Northern Apennines, Italy).*
- Anna Gandin & Enrico Capezzuoli. (2014). *Travertine: Distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems.*
- Ballard, R. D. (1999). *Encyclopedia of volcanoes.*
- Baltakova, A. (2023). *LANDFORMS IN TRAVERTINE/TUFA IN BULGARIA.*
- BRUCE W. FOUKE, ' J. (2000). *DEPOSITIONAL FACIES AND AQUEOUS-SOLID GEOCHEMISTRY OF TRAVERTINE-DEPOSITING HOT SPRINGS (ANGEL TERRACE, MAMMOTH HOT SPRINGS, YELLOWSTONE NATIONAL PARK, U.S.A.).*
- Çelik, İ. Ç. (2012). *Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey).*
- Center, S. E. (s. f.). *Potamocorbula amurensis*. Obtenido de National Estuarine and Marine Exotic Species Information System (NEMESIS):
https://invasions.si.edu/nemesis/species_summary/81746

CHAFETZ, H. S., & FOLK, R. L. (1984). *TRAVERTINES: DEPOSITIONAL MORPHOLOGY AND THE BACTERIALLY CONSTRUCTED CONSTITUENTS.*

Chafetz, R. F. (1983). *Pisoliths (Pisoids) in Quaternary Travertines of Tivoli, Italy.*

Denyer, P. &. (2012). *Geologia de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.*

Dunham, R. J. (1962). *Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture.*

Enrico Capezzuoli, M. P. (2014). *Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art.*

EUGSTER, F. R. (1979). *Holocene pisoliths and encrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia.*

Fench, J., & Barnes, I. (1979). *Map Showing Occurrences of Spring-Deposited Travertine in the Conterminous Western United States.*

Folk, R. L. (1962). *Spectral Subdivision of Limestone Types.*

Folk, R. L. (1994). *Interaction Between Bacteria, Nannobacteria, and Mineral Precipitation in Hot Springs of Central Italy.*

Friedman, I. (1970). *some investigations of the deposition of travertine from Hot Spring-I The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring*.*

Giorgio Recchi, R. M. (1977). *Calizas de Los Planes - Guaniquito (Tonosí).*

Glover, C., & Robertson, A. H. (2003). *Origin of tufa (cool-water carbonate) and related terraces in the Antalya area, SW Turkey.*

- Khoury, H., Salameh, E., & Udluft, P. (1984). *On the Zerka Ma'in (Therma Kallirrhoes) Travertine/Dead Sea (hydrochemistry, geochemistry and isotopic composition).*
- Kitano, Y. (1962). *A Study of the Polymorphic Formation of Calcium Carbonate in Thermal Springs with an Emphasis on the Effect of Temperature.*
- Leeman, W., & Whelan, B. D. (1977). *Radiogenic and stable isotope studies of hot-spring deposits in Yellowstone National Park and their genetic implications.*
- Luis Carcavilla, J. V. (2019). *ESTABLECIMIENTO DE UNA TIPOLOGÍA ESPECÍFICA DE FORMACIONES TOBÁCEAS.*
- Marcelle Marques Erthal, E. C. (2016). *Shrub morpho-types as indicator for the water flow energy - Tivoli travertine case (Central Italy).*
- Mehmet Özkul, M. C. (2002). *Depositional environments and petrography of Denizli travertines.*
- Merida, J. (1973). *Los campos geotermicos de panama I.P.G.H Seccion de Geografia Comite de Geomorfologia.*
- Minerales, D. G. (1990). *Mapa Geológico de Panamá.*
- Moeck, I. S. (2014). *Catalog of geothermal play types based on geologic controls Renewable and Sustainable Energy Reviews.*
- Pedley, H. (1990). *Classification and environmental models of cool freshwater tufas.*
- Pedley, M. (2009). *Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for ...”) International Association of Sedimentologists.*

- PEDLEY, M. (2009). *Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments*. International Association of Sedimentologists.
- Pedley, T. F. (1996). *A review of tufa and travertine deposits of the world*.
- Pentecost, A. &. (1994). *A Review and Reassessment of Travertine*. Géographie physique et Quaternaire, 48(3), 305–314.
- Pentecost, A. (1993). *British travertines: a review*. Proceedings of the Geologists' Association, 104,23-39. .
- PENTECOST, A. (1995). *THE QUATERNARY TRAVERTINE DEPOSITS OF EUROPE AND ASIA MINOR* .
- Pentecost, A. (2005). *Travertine*.
- POSTMA, C. A. (2005). *GEOCHEMISTRY, GROUNDWATER AND POLLUTION*.
- R.A., C., & Jiménez., J. (1994). *Moluscos asociados a las áreas de manglar de la costa Pacífica de América Central: guía*.
- Renaut, R. W., & Jones, B. (1997). *controls on aragonite and calcite precipitation in hot spring travertines at Chemurkeu, Lake Bogoria, Kenya*.
- Riding, L. a. (1992). *Aragonite laminae in hot water travertine crusts, Rapolano Terme, Italy*.
- RIDING, L. G. (1998). *Hot-spring travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy*.

- Risacher, F., & Eugster, H. P. (1979). *Holocene pisoliths and encrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia.*
- Robert L. Folk, H. S. (1985). *Bizarre Forms Of Depositional And Diagenetic Calcite In Hot-Spring Travertine, Central Italy.*
- Suguio, K. (1990). *Geologia Sedimentar.*
- Suhieb, A. I. (2024). *Quaternary Travertine Facies and Paleo-Environments in Jordan's Mashara and Panorama Regions.*
- Vásárhelyi, Á. T. (2010). *The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary.*
- Vásquez, M. H. (2010). *CRISTALOGRAFÍA RECREATIVA.*
- Vogler, R. E., Núñez, V., Gregorio, D. E., Beltramino, A. A., & Peso, J. G. (2012). *MELANOIDES TUBERCULATA: THE HISTORY OF AN INVADER.*

Anexos

Anexo 1: Laboratorios realizados con ayuda de la facultad de química, si bien estos experimentos estaban planeados para dar más rigor a la química del agua, no se agregaron al trabajo principal debido a que no se pudieron culminar dentro del cronograma de esta investigación.



fig. 1. Recolección de la muestra de agua para análisis químicos.



fig. 2. Titulación con EDTA de la muestra, para saber su dureza se puede observar la fase final del experimento y el cambio de color.



fig. 3. Se realizó un análisis de absorción atómica, para ver los metales pesados que podía contener el agua. Pero solo se logró realizar el análisis de Pb. Para este análisis se filtró la muestra de agua con una jeringa y un filtro de 0.22 μm .

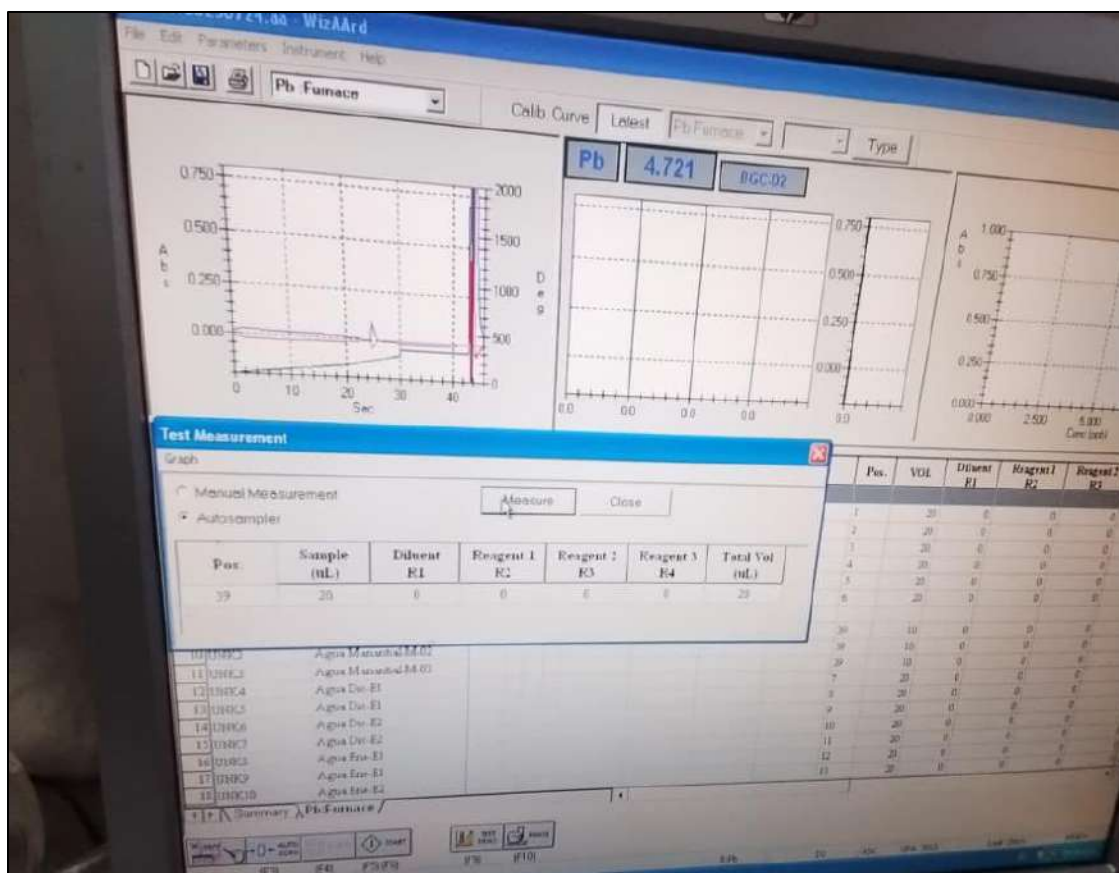


fig. 4. El valor de absorbencia del Plomo fue de 4.721 lo que indica que la muestra tiene un alto contenido de Pb.



fig. 5. Se realizó un análisis de cloruros por titulación, se prepararon indicadores de K_2CrO_4 (cromato de potasio) y $AgNO_3$ (nitrato de plata) agua ultrapura y 5mL de la muestra de agua filtrada, se realizó hasta que hubiera un cambio de color a naranja melón. La muestra tuvo un consumo alto de titulante antes de llegar al color indicado lo que indica que el agua tenía alto contenido de cloruro.

Para estos análisis se utilizó el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater- William C Lipps, Ellen Burton Braun, Terry E. Baxter.

Anexos 2: Se buscó información de pozos perforados en la zona, realizados por el Ministerio de Desarrollo Agropecuario MIDA R-5 Capira, Departamento de Ingeniería Rural y Riego.

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA ADMINISTRACIÓN, EJECUCIÓN Y CONTROL DEL PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE POZOS

24

Formulario No.

MINISTERIO DE DESARROLLO AGROPECUARIO
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA RURAL Y RIEGO
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA
SECCIÓN DE PERFORACIÓN DE POZOS

INFORME DE PERFORACIÓN DE POZO

Fecha: 04 DE Agosto 2022

Operador: MANUEL MORENO

Nombre del Productor: OTILDA AGUIRRE DE ZAMBRANO

Nº de cédula: 6-41-129

Distrito: CHORRERA

Corregimiento: PLAYA LEONA

Teléfono/Celular: 6001-7887

I. REGISTRO DEL POZO:

Profundidad: 80 pies Diámetro del pozo: 6 pulgadas

Fuente: 20 pies Rendimiento: 60 gal/minuto

Ciego: 10 pies Granulado: 10 pies

Nivel estático: Nivel dinámico:

Filtro: GRAVA Rubro: GANADERIA

II. RECIBIDO CONFORME:

Firma del Productor: *[Firma]*

Observaciones: RINDE UN APROXIMADO DE 90 gal SIN EL APOYO

Instalar BOMBA DE MEDIO CABALLO CON AUTOMÁTICA

Firma del Operador: MANUEL MORENO

Servidor Público de la Dirección de Ingeniería Rural y Riego.

Instalar BOMBA A 60 pies

NOTA: *Es obligatorio solicitar el número de cédula al productor y N° de Teléfono.

MINISTERIO DE DESARROLLO AGROPECUARIO
DIRECCIÓN DE ADMINISTRACIÓN Y FINANZAS

DEPARTAMENTO DE DESARROLLO INSTITUCIONAL

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA ADMINISTRACIÓN, EJECUCIÓN Y CONTROL DEL PROGRAMA DE PERFORACIÓN DE POZOS

Formulario

MINISTERIO DE DESARROLLO AGROPECUARIO
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA RURAL Y RIEGO
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA
SECCIÓN DE PERFORACIÓN DE POZOS

INFORME DE PERFORACIÓN DE POZO

Fecha: 11 DE Agosto 2022

Operador: MANUEL MORENO

Nombre del Productor: RAQUEL DIAS DE SANJUR

Nº de cédula: 8-723-919

Distrito: LA CHORRERA

Corregimiento: PLAYA LEONA

Teléfono/Celular: 6268-7593

I. REGISTRO DEL POZO:

Profundidad: 70 pies Diámetro del pozo: 6 pulgadas

Fuente: 50 pies Rendimiento: 60 gal/minuto

Ciego: 15 pies Granulado:

Nivel estático: Nivel dinámico:

Filtro: GRAVA Rubro: AGRICOLA

II. RECIBIDO CONFORME:

Firma del Productor: *[Firma]*

Observaciones: RINDE UN APROXIMADO DE 90 gal SIN EL APOYO

Instalar BOMBA DE MEDIO CABALLO CON AUTOMÁTICA

Firma del Operador: MANUEL MORENO

Servidor Público de la Dirección de Ingeniería Rural y Riego.

Instalar BOMBA A 60 pies

NOTA: *Es obligatorio solicitar el número de cédula al productor y N° de Teléfono.

MINISTERIO DE DESARROLLO AGROPECUARIO

MINISTERIO DE DESARROLLO AGROPECUARIO
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA RURAL Y RIEGO
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA
SECCIÓN DE PERFORACIÓN DE POZOS

INFORME DE PERFORACIÓN DE POZO

Fecha: 09 DE Agosto 2022
Operador: MANUEL MORENO PEREZ
Nombre del Productor: EFRAIN PEREZ
N° de cédula: 7-123-86
Dirección: LA CHORRERA
Corregimiento: PLAYA LEONA
Teléfono/Celular: 6600-8495

I. REGISTRO DEL POZO:

Profundidad: 80 pies Diámetro del pozo: 6 pulgadas
Fuente: 40 pies Rendimiento: 80 gal/minuto
Ciego: 25 pies Granulado: 20 pies
Nivel estático: Nivel dinámico:
Filtro: GRVA Rubro: AGRICOLA Y GANADERA

II. RECIBIDO CONFORME:

Firma del Productor: [Firma]

Observaciones:

RENDE UN APROXIMADA DE 80 gal SIN EL AFORO
INSTALAR BOMBA DE MEDIO CABALLO CON AUTOMATICO
Firma del Operador: MANUEL MORENO

Servidor Público de la Dirección de Ingeniería Rural y Riego.

NOTA: "Es obligatorio solicitar el número de cédula al productor y N° de Teléfono.

INFORME DE PERFORACIÓN DE POZO

Fecha: 03 DE Agosto 2022
Operador: MANUEL MORENO PEREZ
Nombre del Productor: SATURNINO LORENZO
N° de cédula: 8-398-704
Dirección: CHORRERA
Corregimiento: PLAYA LEONA
Teléfono/Celular: 6841-5254

I. REGISTRO DEL POZO:

Profundidad: 100 pies Diámetro del pozo: 6 pulgadas
Fuente: 40 pies Rendimiento: 40 gal/minuto
Ciego: 24 pies Granulado: 8 pies
Nivel estático: Nivel dinámico:
Filtro: GRVA Rubro: GANADERIA

II. RECIBIDO CONFORME:

Firma del Productor: [Firma]

Observaciones:

RENDE UN APROXIMADA DE 40 gal SIN EL AFORO
INSTALAR BOMBA DE MEDIO CABALLO CON AUTOMATICO
Firma del Operador: MANUEL MORENO

Servidor Público de la Dirección de Ingeniería Rural y Riego.

NOTA: "Es obligatorio solicitar el número de cédula al productor y N° de Teléfono.

Anexo 3: Se visitó la zona de costa (Playa Leona), para tener una mejor comprensión de la zona de estudio ya que se encontraba cerca de esta área.



fig. 6. Se encontró litología, similar a la que se observa en El Salitral (Basaltos y Tobas vítreas).



fig. 7. Se identificaron diques y una falla con un rumbo de 220° y un buzamiento de 47° .



fig. 8. Se encontró en distintos puntos fracturas rellenas de calcedonia (flecha blanca), lo que indica un posible hidrotermalismo en esa zona.