

**APOORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER**

**Aporte a la caracterización metalogenética del yacimiento supérgeno de travertino,
ubicado en el municipio de Málaga, Santander.**

Juanita Tovar Moros y Jesús Fabián Acevedo Villarreal

Trabajo de Grado para optar por el título de geólogo

Director:

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc Geología aplicada

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2022

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Dedicatoria

A Dios por guiarme y darme la fortaleza en cada momento, por permitirme culminar esta grandiosa etapa de mi vida y proveerme con las herramientas necesarias para ello.

A mi mamá, por ser mi pilar, mi apoyo, mi guía, por creer en mí, por darme luz en los momentos de oscuridad, por brindarme paz en los momentos de incertidumbre, por su presencia en cada aspecto de mi vida y su amor incondicional.

A mi papá, por creer en mí, por apoyarme en cada uno de los momentos de esta etapa, por contribuir con su amor, conocimiento y trabajo al desarrollo de cada una de las actividades, por enorgullecerse por cada logro, por muy pequeño que fuera.

A Santiago, mi hermano, porque desde su amor y escucha, me apoyaba en cada momento, me daba los consejos que necesitaba escuchar, me traía tranquilidad, gracias por ser mi mejor amigo y brindarme tu compañía, gracias por ser cada día mejor, me haces sentir una hermana muy orgullosa.

A Sofia, mi hermana, mi fiel compañera, gracias por acompañarme en las innumerables noches de traspasado, por escucharme, por apoyarme, por amarme tanto como yo te amo a ti, gracias por tus atenciones, por tu caricias, tus masajes. Te amo mejor amiguita.

A Daniel, mi hermanito menor, el que siempre será nuestro bebé, gracias por tus palabras de apoyo, por tu bondad, por tu amor, gracias por tu interés constante, por hacerme sentir muy orgullosa de ti, gracias por ser esa persona incondicional para mí.

A Nathy, mi mascota, aunque muchos no lo crean, ella me brindó un apoyo emocional importante durante cada uno de los momentos de esta etapa, y quise hacerle este reconocimiento para siempre recordar el amor incondicional y la paz que me traía. Gracias por estar al lado mío en cada traspasado o en cada momento de estrés, abrazarte me calmaba.

A mis tíos Fabricio y Giovanny, a mis abuelitas Gloria y Gladis, por su amor, su escucha y atención en cada momento, gracias por estar pendientes siempre.

A Jesús, por ser un apoyo incondicional, por contribuir con paciencia en cada momento, por darme luz y calma en momentos estresantes, por solucionar mis dudas desde el amor y el respeto, gracias por tu cariño y por cada uno de los momentos vividos.

A mis amigas Leidy, Lexlys, Camila, Angela, Daniela Núñez, Jacqueline, Luis Carlos, Andrés y Lyda por su amor, paciencia y apoyo, sin ustedes muy difícilmente esto hubiera sido posible, gracias por aportar a su manera en esta etapa universitaria y en el desarrollo de este proyecto.
Tienen un espacio en mi corazón y en mi mente.

A mis amigos del “hueco”, mis amigos del colegio, gracias por escucharme en cada momento, por alegrarse de mis logros, por su apoyo incondicional, me salvaron muchas veces, aunque no lo sepan, son mis mejores amigos y amo tenerlos en mi vida. Espero que sigamos cumpliendo muchas metas juntos.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Dedicatoria

A Dios por permitirme realizar todos los proyectos que me he trazado y guiarme en el camino recorrido.

A mi madre por siempre apoyarme en todos los acontecimientos importantes a lo largo del trayecto, por enseñarme a no rendirme y que todo siempre tiene una solución.

A mi padre por insistirme siempre en la importancia del estudio, ayudarme a crecer y mejorar como persona trabajadora y honesta.

A mi hermanita Lyda por su apoyo, su amor y motivación, por estar pendiente en lo que necesitara y brindarme siempre fuerzas para continuar.

A mi compañera Juanita por todas las enseñanzas y momentos divertidos que pasamos, por su apoyo, su comprensión y esfuerzo a lo largo de la carrera.

A mis amigos Bonilla y Arévalo, por estar desde siempre apoyándome en los momentos difíciles, brindando su buena energía y consejos, por motivarme a seguir y no rendirme ante las adversidades, siempre los llevare en el cora.

A mis compañeros David, Andrés, Juanse, Diana, Xiomy, Paula, Jepson y Jenny, por todos los buenos momentos vividos durante la carrera, por las risas y el apoyo en los tiempos difíciles, gracias por su amistad y confianza.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Agradecimientos

Extendemos un especial agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por brindar los espacios, laboratorios, profesionales y demás, aptos y competentes para la realización de una formación integral.

A todos aquellos que hicieron parte del desarrollo de este proyecto de investigación de manera directa e indirectamente.

A los funcionarios y trabajadores por su colaboración, diligencia y disponibilidad en el momento que lo requerimos, Rosadilia Carrillo, Martha Blanco, Carlos Ríos, Luis Carlos Mantilla, Luis Garrido, César Llerena que hacen parte de la Escuela de Geología y a José Antonio Henao Martínez, Diego Fernando Hernández Pardo y Julieth Ospina Carrillo del Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatiguará.

A nuestro director de tesis, Andrés Mauricio Cáceres por el apoyo y la guía durante el desarrollo de la investigación, por poner a nuestra disposición múltiples herramientas de aprendizaje y por transmitirnos sus conocimientos en la solución de dudas e inquietudes.

Finalmente, a cada uno de los compañeros que contribuyeron en el proceso, un agradecimiento especial a Leidy Julieth Muñoz Martínez por su apoyo incondicional, y a nuestros futuros colegas por hacer de la época universitaria un tiempo agradable y de mucho aprendizaje mutuo.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Localización de la zona de estudio.....	16
3. Metodología	18
3.1. Recopilación bibliográfica	19
3.2. Fase de campo	19
3.3. Fase de laboratorio	22
3.4. Fase de análisis e interpretación de datos	24
3.5. Elaboración del informe final	25
4. Antecedentes	26
5. Marco teórico	32
5.1. Marco geológico	32
5.1.1. Estratigrafía.....	34
5.1.2. Geología estructural	45
6. Resultados	48
6.1. Cartografía geológica.....	48
6.1.1. Cartografía geológica regional- área del título minero	48

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

6.1.2. Cartografía geológica local- área de proyección de explotación	55
6.2. Descripción textural y composicional.....	65
6.2.1. Descripción macroscópica	65
6.2.2. Descripción microscópica	70
6.3. Caracterización por rayos X.....	77
6.3.1. Difracción de rayos X (DRX)	77
6.3.2. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	83
6.4. Modelado y estimación del recurso	87
7. Discusión.....	89
8. Economía y mercado del travertino	101
9. Conclusiones	108
10. Recomendaciones.....	110
Referencias bibliográficas.....	111

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Fuente: Autores.....	17
Figura 2. Geología regional del área de concesión ILB-08031. Fuente: Base cartográfica del IGAC. Geología de la plancha 136. Recopilado y modificado por: Autores.....	36
Figura 3. Estratigrafía regional en el área de Málaga, Enciso y Concepción. Fuente: Autores.....	41
Figura 4. Geología local del área de concesión ILB-08031. Fuente: Base cartográfica del IGAC. Geología de la plancha 136. Recopilado y modificado por: Autores.....	44
Figura 5. Perfil topográfico de las zonas estructurales del área de estudio regional. Fuente: Google Earth Pro.....	45
Figura 6. Mapa geológico regional del área de concesión. Fuente: Autores.....	48
Figura 7. Esquema representativo que corresponde al corte geológico regional A-A' que cubre la zona de SW- NE en el área del título minero. Fuente: Autores.....	49
Figura 8. Afloramiento de travertino cristalino en contacto con un cuerpo masivo de caliza dismicrita que se correlaciona con la Formación Rionegro.....	50
Figura 9. Afloramiento de caliza fosilífera que se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes.....	51
Figura 10. Afloramiento masivo de caliza grisácea que se correlación con la Formación Tibú-Mercedes.....	52
Figura 11. Afloramiento de cuarzo arenita correlacionada con la Formación Tibú- Mercedes. Dato estructural 8/30.....	53
Figura 12. Terrazas de explotación de travertino cristalino con evidencia de bandeamiento.....	54
Figura 13. Terrazas de explotación de travertino cristalino con evidencia de bandeamiento.....	55
Figura 14. Mapa geológico local del área de explotación. Fuente: Autores.....	56
Figura 15. Esquema representativo que corresponde al corte geológico local B-B' que cubre la zona de NW- SE en el área de explotación. Fuente: Autores.....	57
Figura 16. Afloramiento de travertino lodoso, a mano izquierda una muestra de mano que evidencia ondulaciones levemente bandeadas y alta porosidad secundaria.....	58
Figura 17. Afloramiento de travertino cristalino en contacto difuso con el travertino bioturbado. Se evidencia la diferencia de compactación y meteorización entre cada tipo de travertino.....	59
Figura 18. Travertino cristalino correspondiente a la terraza 4 de la zona de explotación. Se evidencia bandeamiento plano paralelo con dato 215/10 y ondulaciones del mismo.....	60
Figura 19. Afloramiento de travertino en la 1ra terraza de explotación con evidencia de bandeamiento, ondulaciones y cavidades.....	61
Figura 20. Fotografía georreferenciada con la estación 6 que corresponde a una caliza fosilífera que está siendo lixiviada por la Quebrada Ojo de Agua cuyo pH se determinó en 5.....	62
Figura 21. Afloramiento de travertino bioturbado con evidencia de porosidad secundaria debido a la actividad orgánica en el proceso (transporte y depositación).....	63
Figura 22. Columna generalizada de la zona de proyección de la explotación. Las calizas de la Formación Tibú-Mercedes se encuentran en contacto discordante con el depósito de travertino. Fuente: Autores.....	64
Figura 23. Columnas específicas de zonas en las que el travertino se encontraba en contacto con un tipo litológico diferente. Se evidencian texturas diferentes entre los sub-tipos de travertinos y estructuras características de cada uno. Fuente: Autores.....	65
Figura 24. Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E1-2 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E1.....	66

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 25. Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E2-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E2.....	67
Figura 26. Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E3-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E3.....	68
Figura 27. Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E4-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E4.....	68
Figura 28. Clasificación de las rocas calcáreas correspondientes a los travertinos basada en elementos texturales. Modificado de Folk (1974).....	70
Figura 29. Microfotografías obtenidas de la sección delgada analizada correspondiente a la muestra E2-1. (A) Sección en NX donde se evidencia calcita micrítica de travertino, cristales de esparita dendrítica con líneas crecimiento. (B) Corresponde a la misma área de la imagen “A” en NP, calcita micrítica y esparítica con porosidad interpartícula. (C) Bandas micríticas de 0,1 mm de espesor con calcita dendrítica radial en NX. (D) Vista en NP de la imagen “C” con porosidad interpartícula, bandas micríticas y calcita esparítica con hábito dendrítico.	73
Figura 30. Microfotografías de la sección delgada analizada correspondiente a la muestra E3-1. (A-B) Vista en NX (A) y en NP (B) de calcita esparítica romboédrica con bandas de lodo calcáreo. (C-D) Vista en NX (C) de calcita acicular radial con micritización bandeada. (E-F) Vista en NX (E) y en NP (F) que evidencia una micritización bandeada y ondulada de calcita esparítica orientada y perpendicular a esta laminación.....	76
Figura 31. Difractograma de la muestra E2-1 con código interno 22110001 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	78
Figura 32. Difractograma de la muestra E2-1 con código interno 22110001 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	79
Figura 33. Difractograma de la muestra E3-1 con código interno 22110002 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	80
Figura 34. Difractograma de la muestra E3-1 con código interno 22110002 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	81
Figura 35. Difractograma de la muestra E4-1 con código interno 22110003 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	82
Figura 36. Difractograma de la muestra E4-1 con código interno 22110003 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.....	83
Figura 37. Modelado del yacimiento de travertino en Málaga, Santander. Fuente: Autores.....	88
Figura 38. Propuesta de modelo genético del travertino de Málaga, Santander. Fuente: Autores.	90
Figura 39. Países exportadores lado izquierdo y países importadores lado derecho, El color rojo representa a Asia, el morado a Europa, el amarillo a África, verde a Sudamérica, azul a Norte América y naranja a Oceanía. Tomado de https://oec.world/	¡Error! Marcador no definido.
Figura 40. Valores de exportaciones totales de Mármol y Travertino de los años 2010 a 2020. Modificado de: https://oec.world/	104
Figura 41. Benchmark de empresas comercializadoras de travertino en Colombia. Fuente: Autores.....	106

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Lista de tablas

Tabla 1. Porcentajes composicionales de la muestra E2-1 por estimación visual en vista microscópica. .72	72
Tabla 2. Porcentajes composicionales de la muestra E3-1 por estimación visual en vista microscópica. .75	75
Tabla 3. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E2-1 marcada como 22110001 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander. 78	78
Tabla 4. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E3-1 marcada como 22110002 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander 80	80
Tabla 5. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E4-1 marcada como 22110003 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander 82	82
Tabla 6. Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E2-1, identificada con código interno 22-0082 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander..... 84	84
Tabla 7. Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E3-1, identificada con código interno 22-0083 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander..... 85	85
Tabla 8. Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E4-1, identificada con código interno 22-0084 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander..... 86	86

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Resumen

Título: Aporte a la caracterización metalogenética del yacimiento supérgeno de travertino, ubicado en el municipio de Málaga, Santander*

Autores: Jesús Fabián Acevedo Villarreal, Juanita Tovar Moros**

Palabras clave: Proceso exógeno, lixiviación, precipitación, carbonato de calcio, roca ornamental.

Descripción: El travertino es una roca sedimentaria química formada por procesos geológicos exógenos debido a que se genera en la superficie por procesos de la geodinámica externa.

En el área de estudio (Málaga, Santander) el yacimiento supérgeno de travertino meteógeno es producto de la lixiviación de la roca calcárea de la Formación Tibú- Mercedes por acción de aguas ácidas.

Esta acidificación tiene origen en diferentes mecanismos simultáneos, entre los cuales se destaca la descomposición de la materia orgánica y la constante interacción y disolución del CO_2 en aguas meteóricas en los estratos calcáreos.

El travertino está compuesto principalmente por calcita y aragonito, la tonalidad color miel se les atribuye a las trazas de azufre amarillo, compuestos de hierro pardo y pigmentos orgánicos. Debido a que proviene desde la disolución de rocas que contienen carbonato de calcio y otros iones metálicos como el hierro (Fe^{2+}), suele tener aspecto bandeado con diversos colores que van desde amarillo, crema, café, marrón, gris e incluso rojo.

El travertino como recurso mineral ornamental es aquel que, después de un proceso de tratamiento, puede usarse como material noble de construcción, para la elaboración de elementos de ornamentación, para la siderurgia y a partir de él se pueden derivar muchos más usos debido a su alto contenido en carbonato de calcio.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: M. Sc. Andrés Cáceres Bottia

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Abstract

Title: Contribution to the metallogenetic characterization of the supergene travertine deposit, located in the municipality of Malaga, Santander.

Authors: Jesús Fabián Acevedo Villarreal, Juanita Tovar Moros**

Keywords: Exogenous process, leaching, precipitation, calcium carbonate, ornamental rock.

Description: Travertine is a chemical sedimentary rock formed by exogenous geological processes because it is generated on the surface by external geodynamic processes.

In the study area (Málaga, Santander) the supergene deposit of meteogene travertine is a product of the leaching of the calcareous rock of the Tibú-Mercedes Formation by the action of acid waters.

This acidification originates from different simultaneous mechanisms, among which the decomposition of organic matter and the constant interaction and dissolution of CO₂ in meteoric waters in calcareous strata stand out.

Travertine is composed mainly of calcite and aragonite, the honey-colored hue is attributed to traces of yellow sulfur, brown iron compounds and organic pigments. Because it comes from the dissolution of rocks that contain calcium carbonate and other metallic ions such as iron (Fe^{2+}), it usually has a banded appearance with various colors ranging from yellow, cream, brown, gray, and even red.

Travertine as an ornamental mineral resource is one that, after a treatment process, can be used as a noble construction material, for the elaboration of ornamental elements, for the steel industry and many more uses can be derived from it due to its high calcium carbonate content.

*Bachelor Thesis

** Physicochemical Engineering College. Geology Department. Director: M. Sc Andres Cáceres Bottia.

Introducción

El subsuelo colombiano posee diversos recursos minerales como resultado de procesos endógenos y exógenos, de naturaleza geológica, geoquímica, geofísica y metalogénica que, unidos a las cambiantes condiciones climáticas ocurridas a lo largo de millones de años, han modelado la fisiografía y los depósitos minerales existentes actualmente en Colombia (Prieto et al., 2019).

Los depósitos calcáreos, al igual que los yacimientos de carbón e hierro, han formado parte del eje de desarrollo minero e industrial en Colombia y se utilizan considerablemente en numerosos procesos, sobre todo en las industrias siderúrgicas, cementeras, ornamentales y agrícolas (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

El travertino como recurso mineral ornamental es aquel que, después de un proceso de tratamiento, puede usarse como material noble de construcción, para la elaboración de elementos de ornamentación, de arte funerario y escultórico, de objetos artísticos variados, conservando integralmente su composición, textura y características fisicoquímicas (López, 1996). Se utilizan en la industria de la construcción como tejares, enchapes, mesones, en escritorios, ornamentación, revestimientos exteriores de muros, fachadas y zonas de intenso tráfico, tales como calles, andenes y escaleras (Prieto et al., 2019).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Generalmente, los términos rocas ornamentales, piedras ornamentales, piedras naturales y similares hacen referencia a aquellas rocas que, sin sufrir tratamientos diferentes de los procesos normales de corte, pulido o tallado, se usan para fabricar productos que exhiban sus propiedades naturales. Por tanto, deben ser rocas que, por sus características físicas y tecnológicas, y por su grado de fracturación, permitan su explotación en forma de bloques (Prieto et al., 2019).

El travertino como depósito químico, es considerado una acumulación de caliza formada por la evaporación de aguas de manantiales o de ríos, cuando el agua rica en dióxido de carbono se filtra a través de las rocas en las áreas de piedra caliza, el agua disuelve la piedra caliza y se satura con ella. Al momento en que el entorno por el que pasa el agua cambia significativamente se libera dióxido de carbono en forma de gas, al igual que las bebidas gaseosas. A continuación, el carbonato de calcio se recristaliza; Se incrustan pequeños escombros, matorrales y material biótico vivo, como musgo, algas y cianobacterias. El material biótico puede sobrevivir y seguir creciendo encima (Folk et al., 1985).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Hoy en día existe gran cantidad de información dispersa, distribuida en diferentes entidades y empresas en todo el país, por lo que se carece de datos actualizados sobre sus yacimientos, recursos, reservas, calidad, usos, demanda, exportaciones e infraestructura, entre otros aspectos, que le permitan al gobierno trazar políticas de manejo de este importante recurso mineral. Las entidades de carácter público, como las secretarías de Minas de algunos departamentos y la empresa privada, en especial las siderúrgicas y productoras de cemento, son las que poseen información relevante sobre los recursos, reservas, calidad y usos.

Por medio de una recopilación, integración y análisis de la información sobre la caliza y el travertino, centrado en aspectos como la geología del depósito, se pretende realizar un estudio de investigación para caracterizar petrográfica, mineralógica y litogeoquímicamente el yacimiento calcáreo de travertino, así mismo, poner a consideración un modelo genético mediante el cual se establezcan los aspectos relevantes en la formación y desarrollo del depósito.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Caracterizar las propiedades del yacimiento de travertino, a partir de un análisis petrográfico y geoquímico, ubicado sobre la Formación Tibú y Mercedes en el municipio de Málaga, Santander.

1.2. Objetivos específicos

- Efectuar una recopilación bibliográfica disponible sobre el área de estudio con el objetivo de contextualizar y analizar la geología regional y local.
- Describir textural y composicionalmente las litologías asociadas al yacimiento de interés, mediante técnicas macroscópicas y microscópicas, con la finalidad de caracterizar mineralógica y petrográficamente los cambios presentes.
- Clasificar genéticamente el depósito calcáreo y describir los eventos de formación de este.
- Realizar una evaluación económica del yacimiento del travertino y la participación de esta roca ornamental en el mercado global.

2. Localización de la zona de estudio

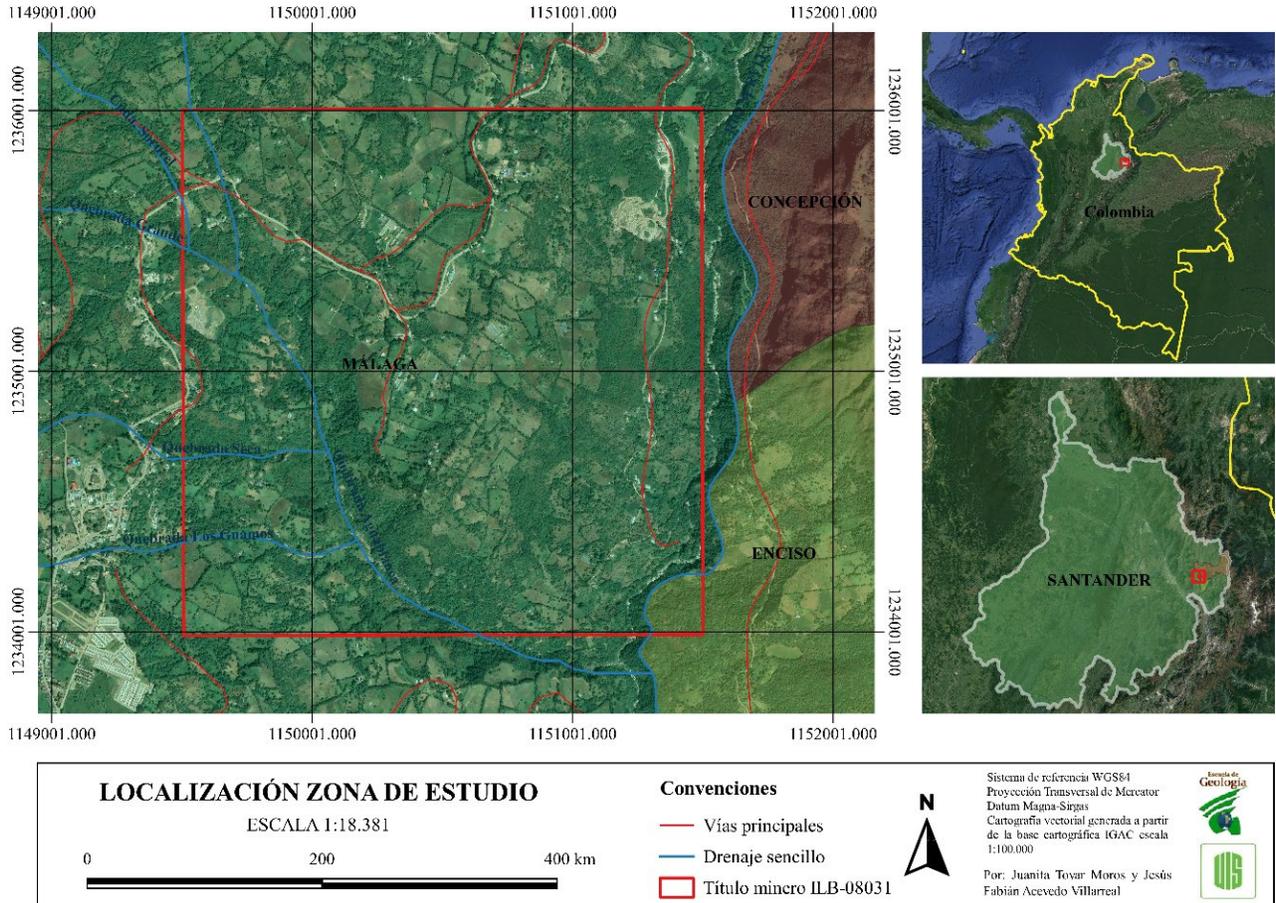
La zona de estudio está ubicada en el departamento de Santander, en el municipio de Málaga, sobre la región de García Rovira, a 155 kilómetros de Bucaramanga, entre las coordenadas geográficas X: 1149502,00382 a 1151502,20995, Y: 1235998,03660 a 1233997,81339. El proyecto ILB-08031. MINA DE TRAVERTINO implica además de las zonas rurales del municipio de Málaga, territorios de los municipios de Concepción y Enciso, en el departamento de Santander (**Figura 1**).

El depósito se encuentra delimitado al norte por la quebrada Ojo de Agua, al este por el río Servita, al sur por la quebrada Agua Blanca y al oeste en contacto discordante de trazo irregular con las calizas de la formación Tibú-Mercedes, en un ancho promedio de 750 metros, medido desde el contacto oeste hasta el borde cortado por el Río Servita (Sandoval & Sanjuán, 2020).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 1.

Mapa de localización de la zona de estudio.



3. Metodología

Esta investigación pretende por medio de una recopilación, integración, validación y análisis de la información sobre la caliza y el travertino en el área de concesión ILB-08031, ubicado en el municipio de Málaga, Santander, determinar las propiedades y características del yacimiento de travertino, a partir de un análisis petrográfico, mineralógico y litogeoquímico, centrado en aspectos como la geología del depósito, la distribución geográfica local, la calidad y los usos del mismo. Igualmente, se pondrá a consideración un modelo genético mediante el cual se establezcan los aspectos relevantes en la formación y desarrollo del depósito, sumado a esto, se realizará la evaluación económica del depósito, con el fin de aumentar las oportunidades económicas de desarrollo para el país y la región.

La elaboración del presente trabajo de investigación consiste en cinco fases secuenciales establecidas con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, las cuales son descritas a continuación:

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

3.1. Recopilación bibliográfica

Esta fase inició con la búsqueda de información basada en los estudios previamente realizados en la zona de Málaga-Santander y el área de la concesión ILB-08031, correspondientes a artículos científicos, trabajos de grado, libros, estudios de prospección, boletines geológicos, mapas, planchas, la memoria explicativa del cuadrángulo I13 y demás información existente acerca de la zona, el yacimiento de interés y semejantes, a nivel mundial, nacional, regional y local facilitados por entidades gubernamentales y privadas; con el fin de establecer un contexto geológico de la zona de estudio con base en las características estratigráficas y tectónicas, por medio de las cuales se permitan establecer propiedades del yacimiento para la planeación y organización de las actividades a desarrollar durante la fase de campo, de laboratorio y de análisis e interpretación de datos.

3.2. Fase de campo

Esta fase consistió en dos jornadas de campo, llevadas a cabo en diferentes momentos y con diferentes objetivos. En ambas jornadas se requirió el apoyo de la plancha cartográfica 136-I-B y 136-II-A del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, con sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Origen-Nacional, la cual cubre parcial o totalmente el (los) municipio(s) de Carcasí (Santander), Concepción (Santander), Enciso (Santander), Málaga (Santander) y San José De Miranda (Santander). Así mismo, para el debido reconocimiento del carácter calcáreo de las rocas se utilizó ácido clorhídrico (HCl) concentrado al 10%.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El reconocimiento textural y composicional, y la descripción y clasificación de las muestras de rocas calcáreas en muestras de mano correspondientes al travertino y la caliza de Tibú-Mercedes, se llevó a cabo utilizando las propuestas de Folk (1974) y Dunham (1962). Así mismo, se hizo uso de la guía para la descripción y clasificación de rocas calcáreas de Cruz & Caballero (2007).

Como referencia del color de los afloramientos y de las muestras de mano y sus constituyentes, se utilizó la carta de colores de roca de Munsell (2009).

A su vez, se realizó un registro fotográfico de las características más relevantes observadas con su respectiva escala.

En la primera fase de campo se llevó a cabo el reconocimiento de la zona por medio de una ruta de campo que consistió en la visita del predio correspondiente al lugar en donde se está llevando a cabo la explotación de travertino, se realizaron una serie de estaciones dentro de la zona del título minero ILB-08031, ubicado en el municipio de Málaga-Santander; esto con el objetivo de muestrear rocas correspondientes al travertino y la caliza en puntos estratégicos del área de interés, debidamente orientadas, georreferenciadas y datadas con demás datos geológicos que se consideraron pertinentes según aplicaba el caso. Finalmente, se realizó la visita de la zona de acopio y de tratamiento del travertino de la empresa Travercol.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El objetivo de esta primera etapa de campo consistía en reconocer las zonas en donde se encuentra en contacto con la caliza de Tibú-Mercedes, aquellas en las que se extiende el travertino y, así mismo, determinar preliminarmente en la extensión del título las zonas en las que no se depositó el yacimiento calcáreo y en su lugar está aflorando la Formación Tibú- Mercedes.

En la segunda fase de campo se llevó a cabo el trabajo de cartografía geológica a escala 1:25.000 en toda el área del título minero ILB-08031, ubicado en el municipio de Málaga-Santander y a escala 1:2.000 en la zona de proyección de la explotación de la roca ornamental, lugar en el cual se encuentra actualmente la cantera y se está realizando la extracción por terrazas y el descapote del terreno. Se realizaron una serie de estaciones debidamente georreferenciadas, teniendo en cuenta puntos de interés, cambios litológicos, cambios estructurales y demás factores que se consideraron importantes. El objetivo de esta segunda etapa de campo consistía en cartografiar geológicamente la zona con el fin de establecer la extensión del travertino y, de esa forma, determinar posibles nuevos frentes de explotación para el máximo aprovechamiento del yacimiento.

3.3. Fase de laboratorio

Teniendo en cuenta las muestras recolectadas en la fase anterior, estas se prepararon y se analizaron macroscópica y microscópicamente con el fin de establecer las diferencias entre la caliza y el travertino, y de este modo caracterizar el yacimiento que corresponde netamente a la roca objeto de estudio. Para esto, inicialmente se describieron las características físicas como color, estructura, textura, composición y clasificación de las rocas haciendo uso de una lupa geológica con aumento de 40X y 20X; seguido a esto se realizó una evaluación de las muestras más representativas y estratégicas para realizar las secciones delgadas del análisis petrográfico, así como para la técnica de difracción de Rayos X (DRX) y fluorescencia de Rayos X (FRX), consideradas como unas de las más eficaces para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas y composiciones químicas.

En el estudio y valoración de un depósito mineral es importante investigar el proceso genético del mismo y de los elementos que participan según sea el tipo de depósito, es por eso que el estudio mineralógico detallado de cada una de las asociaciones minerales se hace relevante, pues por medio de este, los aportes de la investigación no serán netamente académicos, sino que los resultados pueden incrementar o disminuir el valor agregado al yacimiento, de forma que, incluso se pueda llegar a descartar un proyecto minero por no tener un depósito económicamente explotable.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El conocimiento de las propiedades químicas de los minerales resulta entonces de vital importancia, es por eso que en el presente proyecto de investigación se hizo uso de dos técnicas de caracterización mineral por Rayos X: DRX y FRX; aunque los principios de cada método son diferentes, los resultados de DRX pueden correlacionarse de manera óptima con los datos de FRX, de tal forma que, la combinación de ambos resultados permite una completa caracterización de la muestra cristalina que se evalúe. Mientras FRX mide las concentraciones totales de cada elemento, el DRX permite el análisis de las fases o compuestos en materiales cristalinos como rocas, minerales y materiales productos de ese contenido químico (Yerly, 2015).

En resumen, la diferencia entre FRX y DRX es simple, la Fluorescencia de Rayos X producirá y analizará información sobre la composición química de la muestra sin indicar qué fases están presentes mientras que la Difracción de Rayos X identificará y medirá la presencia y cantidades de los minerales y sus especies en la muestra, así como las fases cristalinas.

Los analizadores de fluorescencia de rayos X (FRX) y de difracción de rayos X (DRX) brindan una caracterización cualitativa y cuantitativa de materiales para detección, identificación, análisis, control de calidad, control de procesos, cumplimiento normativo y detección, para metales y aleaciones, minería y geología, chatarra y reciclaje, seguridad medioambiental y del consumidor, educación e investigación, y fabricación en general (Michaud, 2015).

Para el análisis por Rayos X de las muestras, se requirió pulverizar las muestras, pasarla por una malla #400 y llevar de ese polvo 2 gramos para DRX y 8 gramos para FRX por muestra.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En este proyecto se realizó la descripción macroscópica de cuatro (4) travertinos y la petrografía de dos (2) secciones delgadas, correspondientes a las muestras E2-1 y E3-1, elaboradas en el laboratorio de petrografía de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

Así mismo, en el en el laboratorio de Rayos X ubicado en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, se llevaron a cabo los análisis de Rayos X (Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X) para tres (3) muestras previamente analizadas microscópicamente, correspondientes a E2-1, E3-1, E4-1.

3.4. Fase de análisis e interpretación de datos

El análisis e interpretación de datos se realizó de forma simultánea a la fase de laboratorio con el fin de identificar la mineralogía del yacimiento, las implicaciones al interactuar con aguas ácidas, la diferenciación petrográfica del travertino respecto a la caliza, y caracterizar cualitativa y cuantitativamente el contenido mineral y químico del yacimiento. De esta forma se pudieron establecer las condiciones fisicoquímicas del yacimiento de travertino y su formación para clasificar genéticamente el depósito calcáreo, describir los eventos de formación asociados a este, estimar el recurso y, a partir de eso, analizar el contexto económico de este tipo de yacimiento calcáreo.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

3.5. Elaboración del informe final

Por último, los análisis y resultados adquiridos se recopilaron en el presente trabajo de investigación, con el cual se da cumplimiento a los objetivos planteados previamente. La información obtenida tiene como fin aportar conocimiento geológico del yacimiento de travertino presente en la zona del título minero ILB-08031, en el municipio de Málaga-Santander y el entorno económico asociado a este tipo de yacimientos calcáreos.

4. Antecedentes

Los depósitos y yacimientos calcáreos se encuentran presentes en todo el territorio colombiano, principalmente en las cordilleras Oriental y Central, en la costa atlántica y, en menor proporción, en la cordillera Occidental; así mismo, están ampliamente distribuidos a través del tiempo geológico. En la literatura geológica es primordial adquirir primero una orientación general sobre las unidades litoestratigráficas y cronoestratigráficas, que contienen las acumulaciones de roca calcárea, tarea bastante compleja para rocas como la caliza y el mármol, que como se señalaba antes, están distribuidas literalmente a lo largo y ancho de Colombia y que abarcan la casi totalidad del tiempo geológico (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Durante la era Mesozoica de Colombia, en los periodos Triásico y Jurásico ocurrió un evento de gran trascendencia no por la presencia de recursos calcáreos de gran importancia económica, sino porque durante esta época de la historia geológica del país se dio la formación y desarrollo de la gran cuenca de sedimentación mesozoica que toma por nombre “rift colombiano” y que posteriormente creó el espacio de sedimentación de las unidades sedimentarias cretácicas. Los cuerpos calcáreos cretácicos son muy numerosos; abarcan toda la cordillera Oriental y la cordillera Central, en edades que comprenden tanto el Cretácico inferior como el superior (Servicio Geológico Colombiano, 2012)..

Localizado sobre la cordillera oriental, el yacimiento calcáreo de interés se sitúa en el extremo meridional (borde oriental) del Macizo de Santander, en la parte sur del páramo del Almorzadero, reposa sobre la Formación Tibú-Mercedes con nomenclatura de la cuenca de Maracaibo.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Las Formaciones Tibú y Mercedes fueron originalmente consideradas por Notestein et al. (1944), como miembros de la formación Uribante de Sievers (1888). Los nombres Tibú, Mercedes y Aguardiente han sido usados con posterioridad como formaciones (Sutton, 1946) (Salvador, 1961) (Ward et al., 1973). Richards (1968) utilizó en el área de la Concesión Barco, el término Aguardiente como formación y los términos Tibú y Mercedes como miembros de la Formación Apón, excluyendo la parte basal arenosa del Tibú y que él llamo Formación Rionegro.

Las formaciones Tibú y Mercedes derivan su nombre del Rio Tibú y Valle Mercedes en el área de la concesión Barco, cuadrángulo F-13 (Notestein et al., 1944). La Formación Tibú se describe como areniscas guijosas de grano grueso en la base, caliza fosilífera con unas pocas capas de lutitas y areniscas de grano fino en la mitad inferior (Ward et al., 1973). Las lutitas gris oscuras en la base de la Formación Mercedes producen un contacto neto pero conformable con las calizas de la Formación Tibú. La Formación Mercedes consiste en: intercalaciones de calizas semejante a la Formación Tibú (aun cuando algunas se presentan arenosas), lutitas oscuras a negras, micáceas y carbonosas (más abundantes en el tercio inferior de la formación), y areniscas grises de grano fino a medio, glauconitas, localmente muy calcáreas (más numerosas en la parte superior). En la zona se presentan intercaladas las calizas, las areniscas y las lutitas y cuyo espesor varía de 250 m a 562 m (Ward et al., 1973).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Al momento de realizar la evaluación de rocas calcáreas mediante métodos de exploración adecuados, la exposición superficial de la caliza facilita en gran medida este proceso, esto debido a que los afloramientos son de fácil acceso y, por ende, de fácil explotación. Esta evaluación en superficie resulta posible al reducir los trabajos de exploración, a través de la ejecución de trincheras que expongan la roca, normalmente fresca, localizada por debajo del suelo o de los sedimentos por transporte superficial. Por el contrario, su evaluación en profundidad requiere generalmente la ejecución de perforaciones con recuperación de núcleos, para obtener información de la calidad química de la roca, calidad mecánica del macizo rocoso y toda la información sobre buzamientos y espesores que permita reconstruir las estructuras que la afectan (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

En el Departamento de Santander es característico encontrar mármoles de distintas calidades y, así mismo, de distintas coloraciones. Las explotaciones son a cielo abierto, donde las minas se encuentran de forma discontinua y la actividad como tal es de pequeña a mediana escala; la producción de mármol en Santander proviene de los Municipios de Tona y Guaca, este último, ubicado sobre el carretable Piedecuesta-Málaga. En esta zona se localizan diferentes solicitudes y títulos mineros activos (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

El depósito de estudio yace discordantemente sobre la secuencia litológica de la formación Tibú-Mercedes, secuencia que se encuentra orientada predominantemente, lo anterior se evidencia en el sector no cubierto por el travertino, NNE, buzando entre 20 y 30 grados al NW (Sandoval & Sanjuán, 2020).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Las particularidades del travertino corresponden a aspectos físicos como la coloración beige y el bandeamiento ondulado en dirección oeste-este siguiendo la pendiente de la topografía actual; la alta porosidad es más frecuente en los grandes bloques rodados de hasta 120 metros cúbicos; el cuerpo calcáreo in-situ se torna masivo a medida que se profundiza (Sandoval & Sanjuán, 2020).

Pentecost (2005) define el travertino como una roca calcárea continental formada por la precipitación química de calcita y/o aragonito en torno a filtraciones, manantiales, ríos, corrientes de agua y ocasionalmente lagos, caracterizada por presentar baja porosidad intercrystalina y alta porosidad móldica, que se forma principalmente en la zona vadosa pero también en zonas freáticas superficiales.

La formación de este tipo de roca empieza con la exposición de una roca sedimentaria con alto porcentaje de carbonato de calcio en superficie, es ahí cuando la lluvia, el viento, la temperatura y principalmente una fuente de agua ácida desintegran el afloramiento rocoso mediante procesos de meteorización, en este caso, lixiviación. Mediante esta meteorización química se generan iones y coloides en soluciones acuosas salinas que sobresaturan la fuente de pH bajo de estos sedimentos químicos.

Pentecost & Viles (1944) proponen una clasificación según el origen del CO₂ involucrado en la precipitación, de esta forma se agrupan los travertinos en meteógenos y termógenos.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Los travertinos meteógenos se dan cuando el CO₂ proviene de procesos meteóricos. Estos travertinos se forman típicamente en aguas frías que circulan por zonas subyacidas por carbonatos. Las concentraciones de HCO₃⁻ son inferiores a 480 mg/L y las de Ca raramente superan los 160 mg/L. Por su parte, los valores de δ¹³C varían entre -12 y +2‰ con una moda de -10 ‰ que refleja contribuciones de CO₂ proveniente de la respiración en suelos. Son ampliamente influenciados por factores climáticos.

En cuanto a los travertinos termógenos, las ocurrencias de estos se dan si las aguas de donde provienen circularon por zonas profundas sometidas a altas temperaturas para emerger como aguas termales (Pentecost, 1995). Su origen sigue siendo meteórico. La mayor parte del CO₂ proviene de procesos termales ocurridos al interior de la corteza o incluso en zonas más profundas. Los valores de HCO₃⁻ suelen estar entre 400-4000 mg/L de HCO₃⁻ y los de Ca entre 80-800 mg/L, dos a diez veces más altos que para las fuentes meteóricas. Las concentraciones de CO₂ también suelen ser mayores y consecuentemente lo son las tasas de desgasificación y precipitación. Los valores de δ¹³C se encuentran típicamente entre -3 y +8‰. Su distribución tiende a estar asociada a regiones de volcanismo o actividad tectónica reciente. Si bien la mayor parte de los travertinos termógenos se forman en aguas termales, ésta no es una condición para incluirlos en esta categoría.

Una vez ocurrida la precipitación química favorecida por los procesos anteriormente mencionados, se forma esta roca sedimentaria química.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Este travertino está compuesto principalmente por calcita y algunas veces por yeso, la tonalidad color miel se les atribuye a las trazas de azufre amarillo, compuestos de hierro pardo y pigmentos orgánicos. Debido a que proviene desde la disolución de rocas que contienen carbonato de calcio y otros iones metálicos como el hierro (Fe^{2+}), suele tener aspecto bandeado con diversos colores que van desde amarillo, rojo, crema, café, marrón, gris, e incluso verde.

La textura porosa se debe en parte a las burbujas de gas que frecuentemente quedan atrapadas entre las capas de piedra creando huecos esféricos (Maldonado, 2018).

Así mismo, es importante mencionar algunas clasificaciones de rocas calcáreas, debido a que los travertinos son clasificados dentro de las mismas. Folk (1962) reconoció tres componentes principales de la piedra caliza: aloquímicos (= grano); matriz (micrita) y esparita (cemento). A su vez, describió cuatro familias de aloquímicos: peloide, ooide, bioclastos e intraclastos. Ante esto, se obtuvieron cuatro familias de calizas: 1) aloquímica cementada por calcita espática; 2) aloquímica con matriz de micrita; 3) caliza microcristalina que carece de aloquímicos y 4) caliza con restos orgánicos in situ - biolititas. La mayoría de los travertinos se incluirían en los grupos 3 y 4 (Pentecost, 2005).

5. Marco teórico

5.1. Marco geológico

Los estudios de cartografía y de reconocimiento geológico del yacimiento de travertino descubierto en Málaga son relativamente escasos, pues el potencial calcáreo del área de Santander, a pesar de que se estima que los recursos calcáreos son inmensos, no se ha intentado cuantificar, e igualmente se desconocen las características químicas afuera de las explotaciones realizadas. Los pocos datos conocidos son insignificantes con respecto a la magnitud del potencial encerrado en sus afloramientos (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Los principales estudios en la zona han sido realizados por la empresa Travercol y, así mismo, para estudios de prospección arqueológica con el fin de establecer un Plan de Manejo Arqueológico en el Proyecto Minero que actualmente se encuentra en la etapa de explotación (Título minero, placa N° ILB-08031).

La empresa Travercol hizo la identificación y clasificación de las diferentes geoformas para el Estudio de Impacto Ambiental, el cual fue derivado de la Metodología del I.T.C (Internacional Instituto for Aerospace Sourcey and Earth Sciencies) de Holanda, misma que es utilizada por INGEOMINAS. Se identificaron 11 geoformas, sin embargo, solo 4 son las que se evidencian dentro del área del polígono concesionado por la empresa contratante:

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

1. Colinas y Montañas Denudacionales (D3)
2. Cuestas (S6) - Ocupan el 16,36 % del territorio municipal
3. Domos y Colinas Residuales (S10) – Ocupan el 9,08 % del territorio municipal
4. Terrazas fluviales (F6) – Ocupan el 0,59 % del territorio municipal

Así mismo, en cuanto a los usos del suelo, determinó que históricamente se considera como despensa agrícola de Santander con producción minifundista de productos agrícolas y el levante de ganado vacuno y caprino.

El yacimiento calcáreo presenta una geometría irregular sin evidencias de metamorfismo, Sandoval & Sanjuán (2020) lo asemejan a un depósito glacial o morrena, pero con la aclaración de que es un depósito de origen químico o dilución de rocas calcáreas por acción de aguas acidas. Se identificó que el depósito gana potencia a medida que las micro avalanchas de pasta de carbonato de calcio (CaCO_3), alcanzan la topografía más suave, adyacente a la margen derecha del río Servitá e igualmente a las quebradas subsidiarias Agua Blanca y Ojo de Agua, que a través del tiempo han cortado y delimitado el cuerpo. (Sandoval & Sanjuán, 2020).

5.1.1. Estratigrafía

Los cuerpos calcáreos cretácicos son muy numerosos; abarcan toda la cordillera Oriental y la cordillera Central, en edades que comprenden tanto el Cretácico inferior como el superior. La depositación de estas unidades fue debido a la formación y desarrollo de la gran cuenca de sedimentación mesozoica, que abarca desde los Llanos Orientales hasta la cordillera Central, y desde esta hacia el nororiente, hasta comprender la cordillera Oriental bumanguesa con la serranía de los Motilones y la serranía de Perijá, incluyendo la parte venezolana desde Maracaibo hasta Mérida y Barinas (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

El rift colombiano se presenta como una propuesta que pretende explicar las cuencas de sedimentación que comprendía entre los periodos triásico - cretácico, sin dejar de lado la intervención de fallas que fueron reactivadas durante la fase de deformación cortical terciaria y que ayudan a delimitar de forma de las cuencas de sedimentación.

A finales de la Era Mesozoica ocurrió una nueva transgresión marina como resultado de la apertura del Océano Atlántico Sur, lo que hizo que el mar existente al oriente de la Cordillera Central avanzara hasta el Putumayo por el sur, el evento favoreció la depositación de sedimentos marinos en la zona de Cundinamarca y Santander. Etayo et al. (1969) en su estudio de la transgresión cretácica utiliza las dataciones realizadas por Acosta (1960) y Hass (1960) en el área de San Andrés y, a partir de dichos datos deduce el avance del mar Cretácico hacia el noreste y el anegamiento del Macizo de Santander hacia el Occidente durante el Hauteriviano Superior.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Sin embargo, Julivert (1960) considera las rocas Cretácicas aflorantes en García Rovira y Matanza como retazos cretácicos (Outliers), que afloran dentro del Macizo por la presencia de fallas menores; estas fallas según el autor, son estructuras del basamento que muestran importantes desplazamientos verticales con su bloque Oeste hundido, conformando un patrón de bloques fallados en donde cada bloque tiene un retazo Cretácico en su lado Este y deja al descubierto rocas pre-cretácicas en su lado Oeste (Caballero & Sierra, 1991).

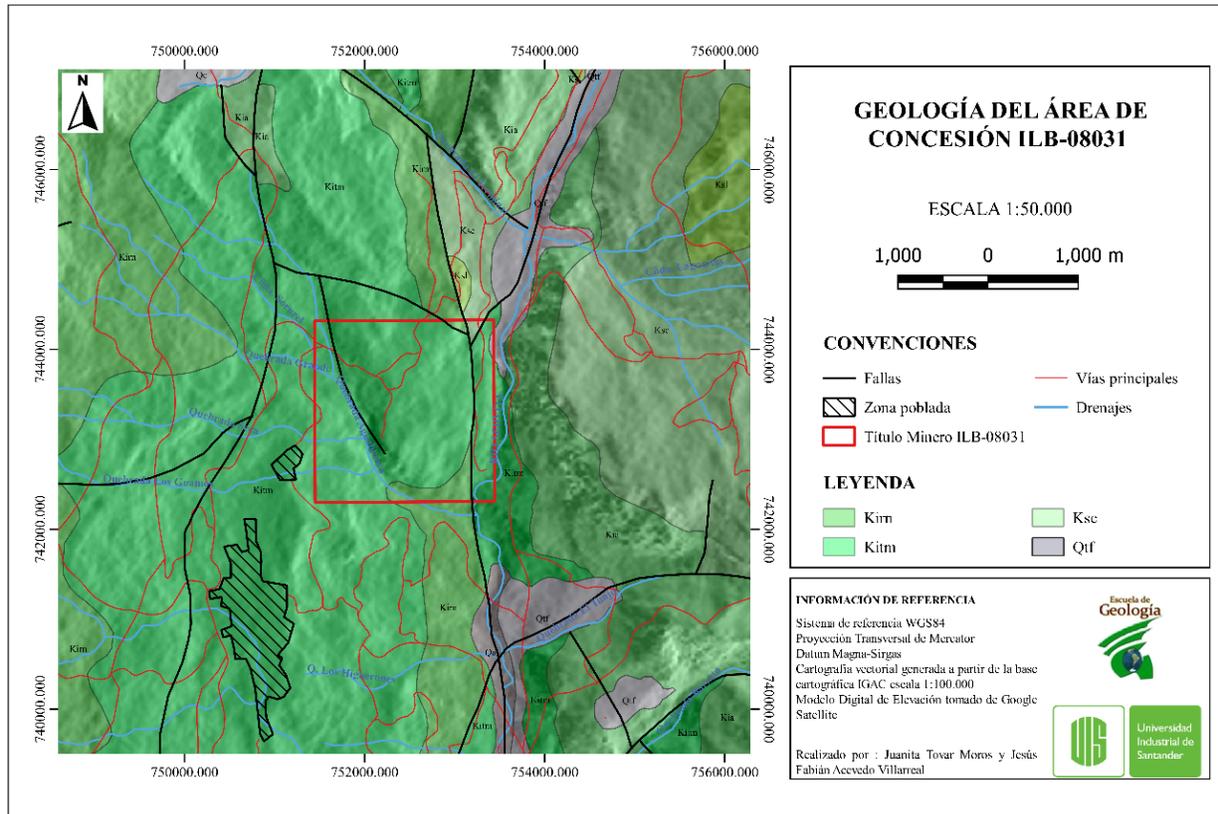
Ward, et al. (1973) por su parte, estudió la región E del Macizo de Santander, que denomina cuenca estructural de Málaga y la propone como resultado de actividad tectónica más que depositacional, así mismo, no sugiere una cuenca local de depositación durante el cretácico en esta área.

En la zona de estudio se presentan Unidades Litológicas sedimentarias correspondientes al periodo Jurásico (Formación Girón), periodo Cretácico Inferior y Superior, con nomenclatura de la cuenca de Maracaibo (Fm. Rionegro, Fm Tibú-Mercedes, Fm. Aguardiente, Fm. Capacho y Fm La Luna), una unidad litológica del periodo Terciario (Fm. Carbonera) y depósitos cuaternarios de origen aluvial y de derrubio (**Figura 2**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 2.

Geología regional del área de concesión ILB-08031.



Nota: Fuente de la base cartográfica del IGAC. Geología de la plancha 136. Recopilado y modificado por: Autores

5.1.1.1. Estratigrafía regional

Formación Girón (Jg):

La unidad aflora en el sector noroccidental del municipio de Málaga, geomorfológicamente corresponde a relieves quebrados o fuertemente quebrados que constituye el núcleo del Anticlinal de Pantano Grande. De manera general, la unidad presenta un carácter arenoso y consiste principalmente de conglomerados y areniscas arcósicas de colores rojizos con escasos niveles de arcillas rojas. (Restrepo, 2010).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El nombre "Girón Series" es usado inicialmente por Hettner (1892) para designar un conjunto grueso de conglomerados, areniscas y limolitas color marrón rojizo que están ampliamente expuestas al Oeste de Bucaramanga y toman el nombre de la población de Girón.

En el área de García Rovira, Acosta (1960) y Julivert (1960) describen la Formación Girón como un nivel compuesto de areniscas, arcillas y conglomerados que alternan con areniscas claras y arcillas gris verdosas.

Formación Rionegro (Kirn):

La unidad aflora al suroriente del municipio, geomorfológicamente se relaciona a un relieve quebrado. Está compuesta por un conjunto muy variable de lutitas oscuras, fósiles, laminadas, intercaladas con grandes bancos de areniscas cuarcíticas claras de grano fino y algunos conglomerados, con un alto grado de fracturación. La unidad discordantemente sobre la Formación Girón (Jurásica) (Restrepo, 2010).

Herdberg & Sass (1937) le dan el rango de formación, y la describen como areniscas y arcosas de grano grueso con algunas capas de conglomerados, areniscas de grano fino y lutitas interestratificadas. La formación Rionegro en el área Málaga-Molagavita-Miranda está representada por un conjunto muy variable de lutitas oscuras, areniscas cuarcíticas y conglomerados (Vargas et al., 1981).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Formación Aguardiente (Kia):

Esta unidad se encuentra en la parte más alta del municipio de Málaga, al occidente de la vereda Pescaderito y en la parte central de la vereda Pescadero, conformando fuertes pendientes y un relieve quebrado. Está constituida por areniscas grises amarillentas de grano fino a grueso, en ocasiones conglomeráticas, cuarcíticas, ferruginosas, con delgadas intercalaciones de arcillolitas grises azulosas en ocasiones carbonosas. (Restrepo, 2010)

El nombre de Aguardiente es dado por Notestein et al. (1944) al miembro superior de la Formación Uribante en el área de la Concesión Barco. Ward et al. (1973), Vargas et al. (1976) y Fabre (1981) adoptaron para la zona de Santander y Norte de Santander la denominación planteada por Sutton (1946), en la que ubica a la Formación Aguardiente como la parte baja del Grupo Cogollo Superior (Upper Cogollo Group), representando la etapa inicial del ciclo de sedimentación Cenomaniano.

Formación Capacho (Ksc):

Esta unidad aflora en el extremo nororiental del municipio, sobre la vía Málaga -Concepción, en territorio de la vereda Calichal, en los sectores Bucarache y Calichal, constituyendo un relieve fuertemente quebrado. La Formación está constituida por una serie de lutitas negras con intercalaciones arenosas hacia la base y bancos de calizas fosilíferas con delgados niveles de calizas fibrosas y de calizas con estructuras "cone in cone" (Restrepo, 2010).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La Formación Capacho es definida por Sutton (1946) como la formación superior de la división superior del Grupo Cogollo de la Cuenca de Maracaibo, pero esta denominación había sido introducida por Sievers (1888) para designar las calizas y shales cretácicos que afloran cerca al poblado de Capacho en el Oeste del estado Táchira (Sutton, 1946). Notestein et al. (1944) nombra este intervalo como Formación Cogollo y la divide en tres miembros: Bajo Cogollo, Cogollo Medio y Guayacán. Fabre (1981) caracteriza la Formación Capacho y la correlaciona con la Formación Chipaque hacia el Sur de la Sierra Nevada del Cocuy.

Formación La Luna (Ksl):

Esta formación aflora en una pequeña área sobre las márgenes de la vía Málaga — Concepción, en territorio de la vereda Calichal, en los sectores Bucarache y Calichal, generando una topografía fuertemente quebrada. Está constituida por lutitas negras en la base, intercalaciones calcáreas arenosas, delgadas capas arenáceas, fosfáticas y niveles delgados de chert. El techo es una intercalación de delgadas capas de chert negro con arcillas negras laminadas muy delgadas y bancos calcáreos hasta de 1 metro; esporádicamente hay nódulos calcáreos y algunos bancos fosfáticos delgados (Restrepo, 2010).

Formación Carbonera (Tec):

Esta unidad del periodo Terciario aflora en el sector suroriental del municipio, en territorio de la Vereda Tierra Blanca, conformando un relieve muy quebrado.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La formación se presenta en esta área como una secuencia de arcillas abigarradas con esporádicos bancos de arenisca de grano fino, algo sucias, con estratificación cruzada y lentes carbonosos. Esta formación deriva su nombre de la Quebrada La Carbonera, en el flanco oriental del Anticlinal Petrólea de la Concesión Barco (Notestein et al., 1944).

Depósitos Cuaternarios:

En el área de estudio se encuentran depósitos de terraza, coluviales y aluviales de poca extensión que se disponen en contacto discordante con las formaciones cretáceas. Son pocas unidades con pendiente suavemente inclinada, localizadas al nororiente del municipio en territorio de la vereda Calichal. Está constituida por delgados niveles gravosos y arenosos embebidos en una matriz arcillosa oscura. Estos depósitos se caracterizan por presentar buenos suelos donde la actividad pecuaria se desarrolla adecuadamente (Restrepo, 2010).

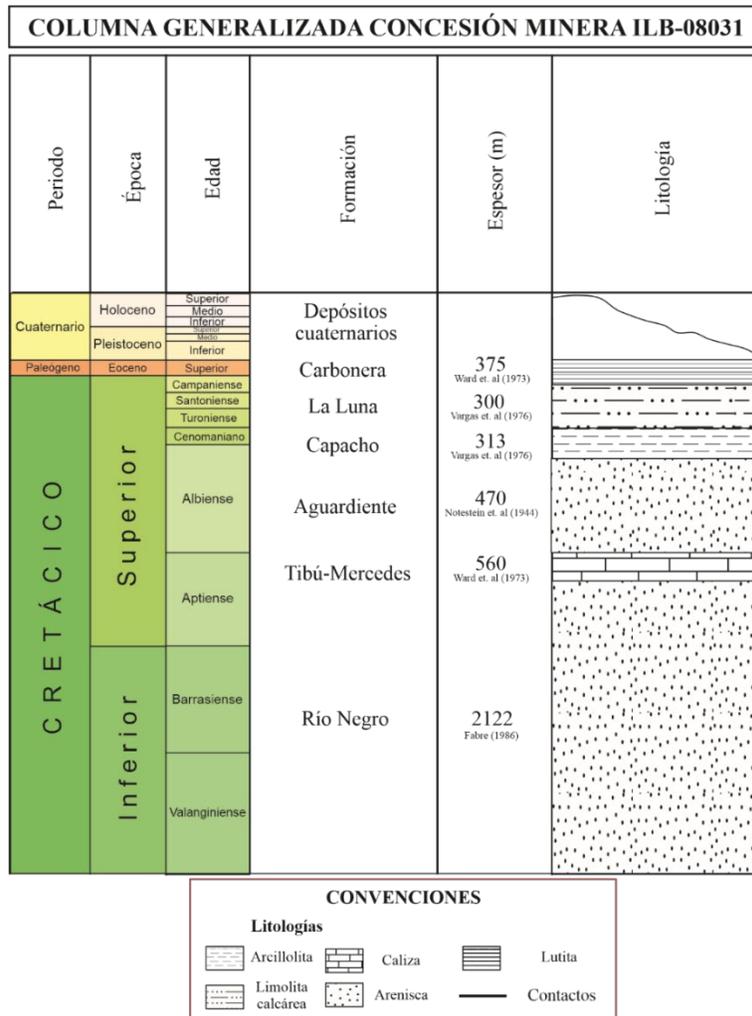
APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

5.1.1.2. Estratigrafía local

Una vez terminado el reconocimiento de la geología regional, correspondiente básicamente a correlacionar e identificar, con la bibliografía existente, las distintas unidades litológicas de la región, Sandoval & Sanjuán (2020) establecieron que el área de interés encaja en su mayor parte en la descripción de la formación Tibú-Mercedes y una pequeña porción a depósitos aluviales y coluviales del cuaternario (**Figura 3 y 4**)

Figura 3.

Estratigrafía regional en el área de Málaga, Enciso y Concepción.



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Formación Tibú-Mercedes (Kitm):

La unidad aflora en la mayor parte del municipio de Málaga, en territorio de las Veredas San Luis, Buenavista, Pescaderito, Pescadero, Guásimo, Barzal, Calichal, Tierra Blanca y todo el casco urbano, geomorfológicamente está conformado por un relieve quebrado a ondulado. Esta unidad es la unión de las formaciones Tibú y Mercedes; la primera consta de areniscas negras de grano grueso y de grandes bancos de calizas grises fosilíferas intercaladas con delgados niveles de lutitas negras y areniscas. La Formación Mercedes es una intercalación de calizas grises fosilíferas, a veces arenosas, con lutitas oscuras a negras, micáceas y carbonosas, con areniscas grises a blancas de grano fino a medio, cuarcíticas localmente calcáreas (Restrepo, 2010).

Tibú y Mercedes son definidas por Notestein (1944), en el área de la concesión Barco, como miembro inferior y medio de la Formación Uribante. Ward et al. (1973) y Vargas et al. (1976), agrupan los intervalos Tibú y Mercedes y les dan el nombre de Formación Tibú-Mercedes por razones litológicas y cartográficas. Finalmente, el nombre de Formación Tibú - Mercedes es utilizado formalmente por Fabre (1981) quien la correlaciona con la Formación Fómeque de la Cuenca de la Sabana.

Richards (1968) utilizó en el área de la Concesión Barco, el término Aguardiente como formación y los términos Tibú y Mercedes como miembros de la Formación Apón, excluyendo la parte basal arenosa del Tibú y que él llamó Formación Rionegro. Vargas et al. (1981) emplea la nomenclatura mencionada, pero conserva el nombre Formación Tibú y Mercedes.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En cuanto al ambiente de depositación, Caballero & Sierra (1991) realizaron deducciones a partir de una combinación de observaciones hechas para cada facies y de esta forma, encontraron similitudes que permitieron realizar asociaciones faciales, en conjunto con la información que se tenía acerca de ambientes modernos y de unidades estratigráficas antiguas ya estudiadas.

De este modo, se determinaron 9 facies para la Formación Tibú-Mercedes: facies conglomerática (CO), facies arenisca fina glauconítica (AFG), facies areniscas de grano fino masivas (AFM), facies de areniscas de grano fino muy lodosas (AFL), facies de lodolitas carbonosas (LOC), facies de lodolitas calcáreas laminadas (LCL), facies de micritas (MC), facies de biomicritas (BMC) y facies de bioesparitas (BSP).

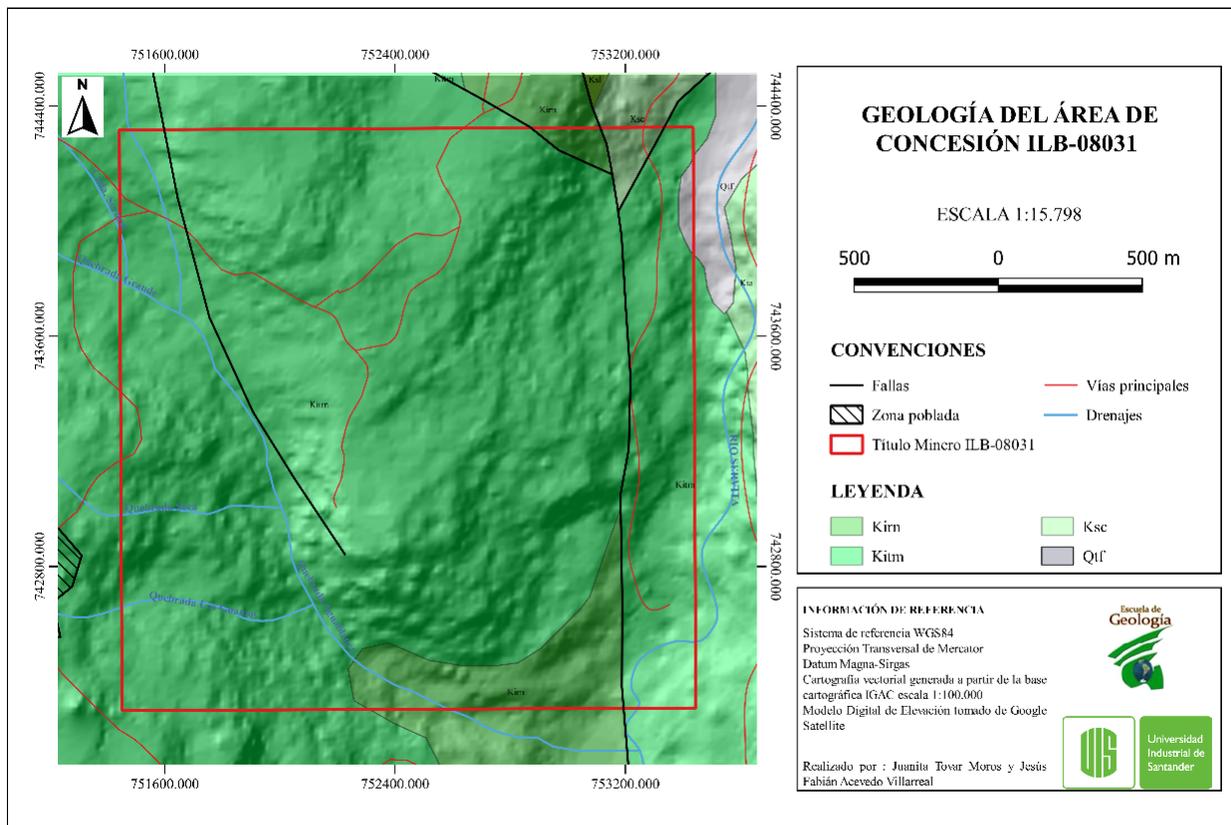
Ante dicha determinación, se establecieron 3 asociaciones faciales: asociación facial AFM-AFL-LCL, asociación facial MC-LOC y asociación facial BMC-BSP-AFG-LCL, las cuales permitieron concluir que la Formación Tibú-Mercedes se depositó en un ambiente de plataforma de carbonatos “middle shelf” a “inner shelf”, influenciada por abundante suministro de clásticos provenientes del continente que alcanzan a conformar unidades bien definidas en “tidal flats” o que son proveniente de un delta cercano producto de corrientes paralelas a la línea de costa.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Una vez realizado el reconocimiento de la geología regional en el área de concesión ILB-08031, como se había mencionado anteriormente, Sandoval & Sanjuán (2020) determinaron que la zona de interés encaja en su mayor parte con la descripción de la Formación Tibú-Mercedes, en donde lo potentes bancos de caliza correspondientes tuvieron interacción con una fuente de agua ácida ubicada en la parte noreste del polígono, esta disolución de las rocas calcáreas dio como resultado el depósito calcáreo de origen químico de interés (travertino).

Figura 4.

Geología local del área de concesión ILB-08031.



Nota: Fuente de la base cartográfica del IGAC. Geología de la plancha 136. Recopilado y modificado por: Autores

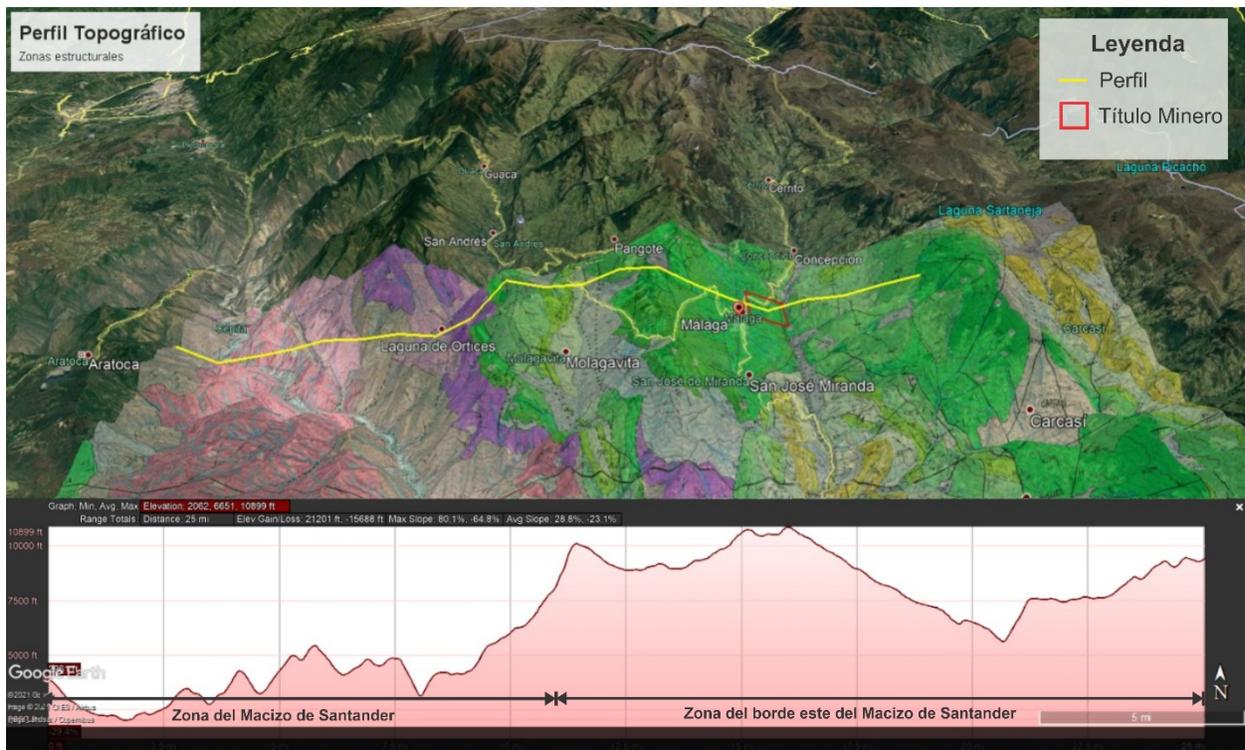
APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

5.1.2. Geología estructural

Para realizar la descripción de las estructuras presentes en la zona, se toma como referencia la información de la Memoria Explicativa del cuadrángulo I13, el cual se dividirá en dos grandes zonas: la zona ocupada por rocas del Macizo de Santander que comprende las rocas ígneas del Batolito de Mogotes, los plutones de Santa Bárbara y Santa Rosita y las riolitas de Onzaga, así como las rocas metamórficas del Neis de Bucaramanga, Formación Silgará y Miembro Floresta Metamorfoseado; y la segunda zona corresponde a las rocas sedimentarias que limitan y forman parte del borde oriental del Macizo (**Figura 5**)

Figura 5.

Perfil topográfico de las zonas estructurales del área de estudio regional.



Nota: Tomado y modificado de Google Earth Pro

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La zona de estudio se encuentra en la zona del borde este del macizo de Santander, el cual está compuesto por una amplia faja sedimentaria mesozoica y terciaria.

Hacia el este se desarrolla una estructura sinclinal, algo estrecha y que culmina al oeste de San José de Miranda, en las cabeceras de las quebradas "La Chorrera y El Salado" y que hacia el norte se desvirtúa, observándose algunas fallas. Esta estructura sinclinal puede ser la expresión más meridional del Sinclinal de Pangote, bien desarrollada en el Cuadrángulo H-13.

Prosigue luego, una zona anticlinal con complicaciones de detalle, y que forma la verdadera estructura que separa las aguas del Río Servitá y del Río Guaca. Por medio de esta estructura se exponen en superficie las areniscas y calizas basales del cretácico a alturas considerables (3.000 m en el Alto de Málaga) por desmantelamiento de su cresta (Julivert, 1960). El flanco este de la estructura anticlinal, muy asimétrico, es abrupto con buzamientos fuertes de las areniscas y las calizas, tal como se observa al oeste de Málaga y Miranda. Este flanco es a su vez, el flanco oeste del Sinclinal de Málaga, estructura asimétrica que cierra al sur de San José de Miranda, cortada transversalmente por la Falla del Servitá, fractura que sirve de límite tectónico entre las estructuras descritas y el Valle del Río Servitá (Vargas et al, 1981).

Otra estructura de importancia en la zona es la Falla del Servita, esta fractura, al sur del Municipio de Bábeга, en donde se conjuga con la falla homónima de este municipio, presenta un trazo rectilíneo (Cuadrángulo H-13); allí tiene gran salto, y pone en contacto rocas del Terciario al este, con sedimentos del Jurásico (Girón), al oeste; hacia el sur del Cuadrángulo H-13 el salto disminuye y la falla separa rocas cretácicas solamente.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Vargas et al. (1981) menciona que el carácter rectilíneo de la falla, y su disminución de salto, permanecen hasta la latitud del Municipio de Málaga. A partir de este sitio y hacia el sur, la falla parece adquirir nuevamente mayor salto, poniendo en contacto rocas del cretácico medio al este, con rocas del Girón y del Floresta al oeste, hasta unirse con la falla que, al sur de la confluencia Servitá-Chicamocha pone en contacto las unidades sedimentarias con el Macizo de Santander.

Por otra parte, hacia el sur de Málaga la falla es un poco más sinuosa, con una leve inclinación hacia el oeste, a la vez que corta las estructuras transversales, como se observa claramente con el cierre sur del Sinclinal de Miranda, mientras que hacia el norte la falla es casi paralela a las estructuras (Cuadrángulo H-13).

Un evento para destacar es que, al sur del municipio de Miranda se observó una falla satélite a partir de la del Servitá, o posiblemente ésta se abre en dos; una que separa el Terciario del Cretácico, y la que sirve de límite entre el Macizo de Santander y la franja sedimentaria. Esta última se muestra más vertical y puede ser la expresión norte de la falla ya descrita, al sur de la confluencia Servitá-Chicamocha. La primera es, por el contrario, la que se inclina hacia el oeste y da origen a vergencias hacia el este, causando inclusive, inversiones en los sedimentos cretácicos y terciarios, al sureste de Miranda (Vargas et al, 1981).

6. Resultados

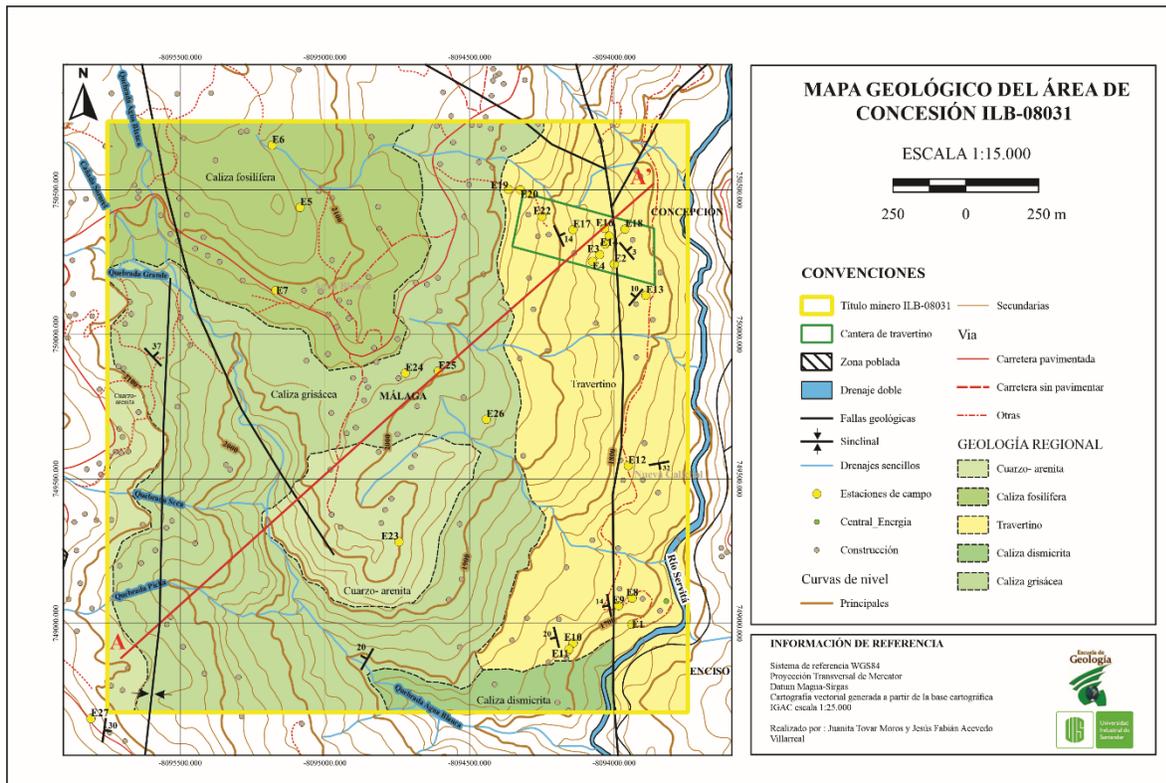
6.1. Cartografía geológica

6.1.1. Cartografía geológica regional- área del título minero

En la zona de trabajo se reconocen cinco litologías, de la más antigua a la más reciente se distinguen una caliza dismicrita, una caliza fosilífera en contacto con una caliza grisácea, una cuarzo-arenita y el travertino (**Figura 6**).

Figura 6.

Mapa geológico regional del área de concesión.

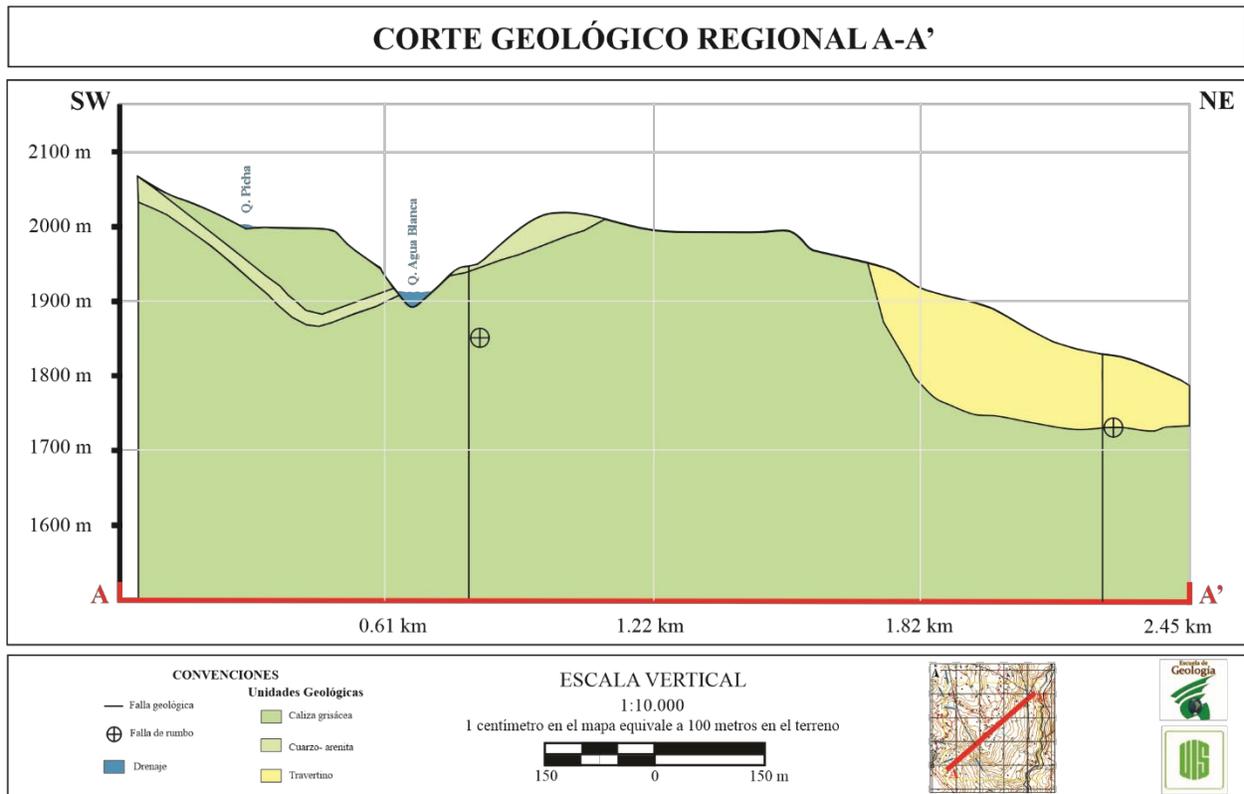


APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En la **Figura 7** se representa un corte geológico en sentido SW-NE, en donde se puede apreciar un cuerpo espeso de caliza grisácea que se correlaciona con la formación Tibú- Mercedes, de la misma forma, se encuentra una capa de cuarzo-arenita afectada por un sinclinal que se encuentra en la zona oeste del título. En la parte NE se encuentra el yacimiento de travertino depositado sobre la caliza grisácea y en sentido de la pendiente topográfica.

Figura 7.

Esquema representativo que corresponde al corte geológico regional A-A' que cubre la zona de SW- NE en el área del título minero.



La caliza dismicrita se localiza principalmente en la zona sureste del título (**Figura 6**), por el carretable que lleva a la planta hidroeléctrica de Málaga, Santander. Geomorfológicamente está conformada por valles y colinas levemente inclinadas.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Esta litología se puede apreciar en la estación E1. La roca corresponde a una caliza tipo III, designada como roca microcristalina, según la relación porcentual matriz-alóquímicos, se denomina como dismicrita, según Folk (1974). Teniendo en cuenta su composición porcentual de lodo calcáreo y cemento, corresponde a una wackstone calcárea con esparita, según Dunham (1962). Se correlaciona con la Formación Rionegro (**Figura 8**).

Figura 8.

Afloramiento de travertino cristalino en contacto con un cuerpo masivo de caliza dismicrita que se correlaciona con la Formación Rionegro.



La caliza fosilífera se localiza principalmente en la zona noroeste del título (**Figura 6**), por el carretable que lleva a la Granja los Andes del SENA de Málaga, Santander. Geomorfológicamente está conformada por pendientes moderadamente inclinadas y colinas denudacionales. Esta litología se puede apreciar en la estación E5 y E7. La roca corresponde a una caliza tipo II, designada como roca aloquímica microcristalina o micritas aloquímica, dada la relación porcentual matriz-alóquímicos, se denomina como una biomicrita rala, según Folk (1974). Teniendo en cuenta su composición porcentual de aloquímicos y lodo calcáreo, corresponde a una packstone calcárea de bioclastos, según Dunham (1962). Se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes (**Figura 9**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 9.

Afloramiento de caliza fosilífera que se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes.



La caliza grisácea predomina en el área como la litología de mayor extensión, se localiza principalmente en la zona oeste del título, por el camino que lleva de la Finca la Pradera a las cuevas de la zona. Geomorfológicamente está conformada por pendientes moderadamente inclinadas y colinas denudacionales. Esta litología se puede apreciar en la estación E24, E25, E26, E28 y E29. Su mejor afloramiento se encuentra en la estación E25. La roca corresponde a una caliza tipo III, designada como roca microcristalina, según la relación porcentual matriz-aloquímicos, se denomina como dismicrita, según Folk (1974). Tiene presencia de venas de calcita rellenando fracturas. Teniendo en cuenta su composición porcentual de lodo calcáreo y cemento, corresponde a una wackstone calcárea con esparita, según Dunham (1962). Se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes (**Figura 10**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 10.

Afloramiento masivo de caliza grisácea que se correlación con la Formación Tibú-Mercedes.



La cuarzo-arenita, se localiza a lo largo de la zona oeste del título y, a su vez, aflora en la parte central, al margen derecho de la Quebrada Agua Blanca, por el carreteable que conduce a una escuelita, al margen izquierdo vía Málaga- Pamplona, después del SENA. Geomorfológicamente está conformada por pendientes moderadamente inclinadas, colinas denudacionales y residuales.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Esta litología se puede apreciar en la estación E23 y E27. La roca corresponde a una arenisca de granos medio-fino, según la escala de tamaños de Wentworth, tomada de Folk (1974), con tonalidades blancas grisáceas, presenta patinas de oxidación, tiene media-alta compactación, buena selección, baja porosidad, alta cementación, tiene estratificación plano-paralela (8/30), sin embargo, se encuentran planos de diaclasas (familia de diaclasas 210/70) debido a los esfuerzos tectónicos a los que ha sido sometida. Se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes (**Figura 11**).

Figura 11.

Afloramiento de cuarzo arenita correlacionada con la Formación Tibú- Mercedes. Dato estructural 8/30.



El travertino, objeto de esta investigación, se localiza a lo largo de la zona este del título delimitado al norte por la quebrada Ojo de Agua, al este por el río Servita, al sur por la quebrada Agua Blanca y al oeste en contacto discordante de trazo irregular con las calizas de la formación Tibú-Mercedes, por el carretable que lleva a la planta hidroeléctrica de Málaga, Santander.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Geomorfológicamente está conformada por pendientes moderadamente pronunciadas y en el lecho dentro del depósito, suele estar inclinado y ondulado de acuerdo con la topografía. Esta litología se puede apreciar en la estación E2, E3, E4, E6, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18, E20, E21 y E22. Sus mejores afloramientos se encuentran en la cantera. La roca corresponde a una roca calcárea microcristalina compuesta principalmente por lodo calcáreo (matriz) y calcita espar (cemento). Presenta una alta porosidad secundaria por la disolución del cemento y fracturación, a su vez, una alta compactación (**Figura 12**).

Figura 12.

Terrazas de explotación de travertino cristalino con evidencia de bandeamiento.



La roca fresca presenta unas tonalidades beige crema (5Y 8/4 según Munsell (2009)) con algunas bandas de color más amarillentas (10YR 8/6 según Munsell (2009)) y otras más oscuras (10YR 6/2a 10R 3/4 según Munsell (2009)), en zonas de exposición presenta algunas patinas de color naranja debido a la meteorización química y física a la que estuvo expuesta.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Corresponde a una caliza tipo III, designada como roca microcristalina, según la relación porcentual matriz-aloquímicos, se denomina como dismicrita, según Folk (1974). Teniendo en cuenta su composición porcentual de cemento y aloquímicos, corresponde a una wackestone calcárea, según Dunham (1962). La roca calcárea que está siendo lixiviada por la fuente de agua ácida para formar el travertino se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes (**Figura 12 y 13**).

Figura 13.

Terrazas de explotación de travertino cristalino con evidencia de bandeamiento.



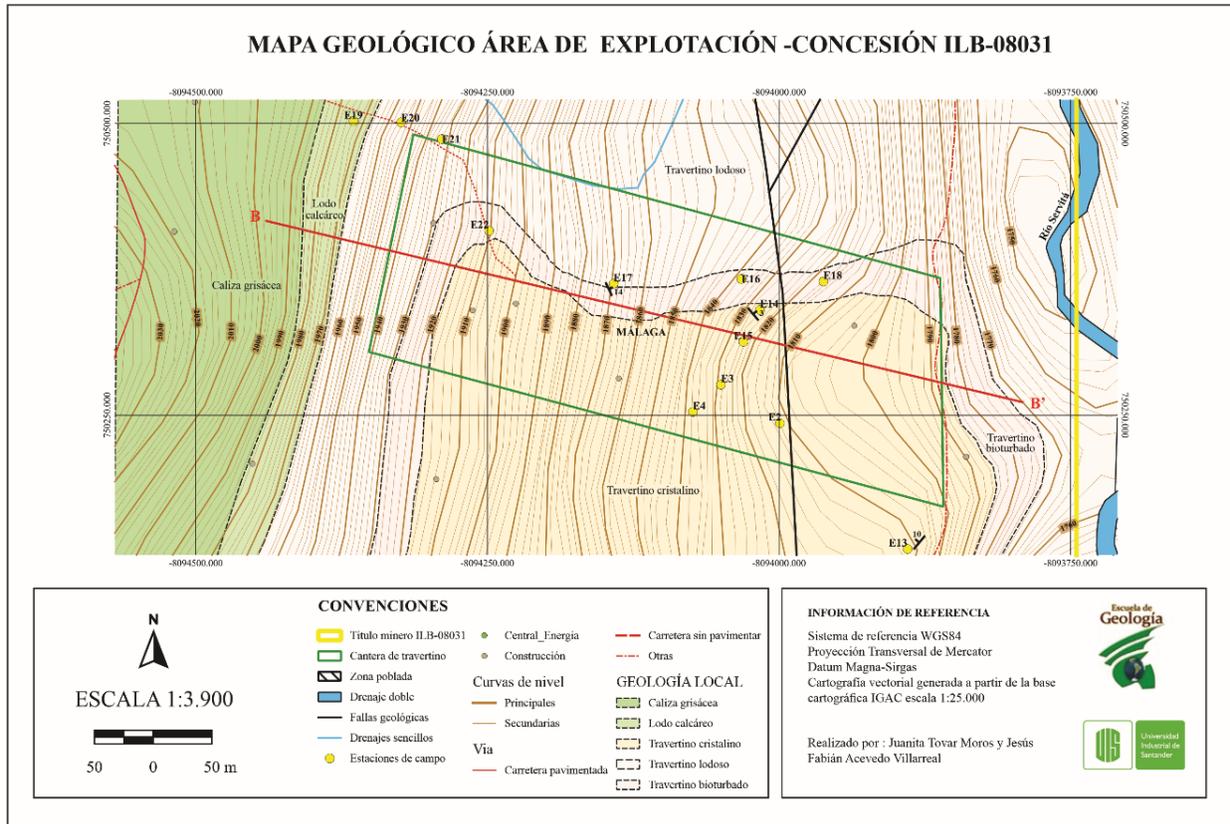
6.1.2. Cartografía geológica local- área de proyección de explotación

En la zona de trabajo se reconocen cinco litologías, de la más antigua a la más reciente se distinguen una caliza grisácea, un lodo calcáreo, un travertino de carácter lodoso, un travertino cristalino y un travertino bioturbado (**Figura 14**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 14.

Mapa geológico local del área de explotación.

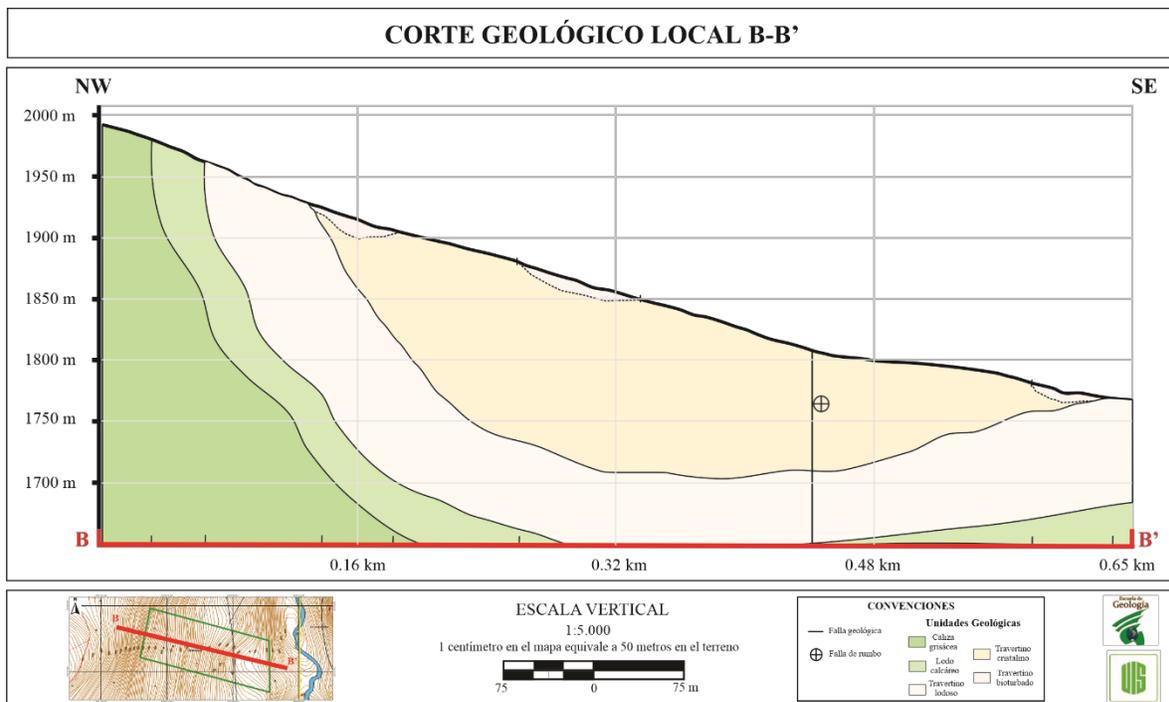


La **Figura 15** representa un corte geológico en sentido NW-SE de la zona de proyección de la explotación de la roca ornamental, en donde se puede apreciar la caliza grisácea, que se correlaciona con la formación Tibú- Mercedes, en contacto con un lodo calcáreo de la misma formación y sobre él yace el travertino lodoso; el travertino bioturbado se está depositando sobre el travertino cristalino. El yacimiento de esta roca química se está depositado sobre litologías calcáreas de la formación cretácica mencionada anteriormente y en sentido de la pendiente topográfica, evidencia de ello son los bandeamientos y las ondulaciones.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 15.

Esquema representativo que corresponde al corte geológico local B-B' que cubre la zona de NW- SE en el área de explotación.



La caliza grisácea se localiza en la zona oeste del título, por el camino que lleva de la Finca la Pradera a las cuevas de la zona. Geomorfológicamente está conformada por pendientes moderadamente inclinadas y colinas denudacionales. Esta litología se puede apreciar en la estación E24, E25, E26, E28 y E29 de la geología regional del presente trabajo, su mejor afloramiento se encuentra en la estación E25 (**Figura 10**). La roca corresponde a una caliza tipo III, designada como roca microcristalina, según la relación porcentual matriz-alóquímicos, se denomina como dismicrita, según Folk (1974). Tiene presencia de venas de calcita relleno de fracturas. Teniendo en cuenta su composición porcentual de lodo calcáreo y cemento, corresponde a una wackstone calcárea con esparita, según Dunham (1962). Se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El lodo calcáreo se encuentra en contacto irregular erosivo con la caliza grisácea al oeste y con el travertino lodoso al este. Geomorfológicamente está conformado por pendientes moderadamente inclinadas y colinas denudacionales. Esta litología se puede apreciar en la estación E19. El afloramiento presenta una compactación moderada, color de exposición grisáceo amarillo, la roca fresca tiene un color gris claro con patinas de oxidación naranjas. Se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes.

El travertino de carácter lodoso se encuentra en vista de planta en contacto irregular erosivo con el lodo calcáreo y rodeando el travertino bioturbado, en vista de perfil se encuentra en contacto a su vez con el travertino cristalino (**Figura 15**). Geomorfológicamente está conformado por pendientes moderadamente pronunciadas y en el lecho dentro del depósito, suele estar inclinado y ondulado de acuerdo con la topografía.

Figura 16.

Afloramiento de travertino lodoso, a mano izquierda una muestra de mano que evidencia ondulaciones levemente bandeadas y alta porosidad secundaria.



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Esta litología se puede apreciar en la estación E17, E20 y E21. El afloramiento presenta una compactación leve-moderada, se evidencia un carácter calcáreo y un leve bandeamiento de colores beige característico del travertino, sin embargo, mantiene una textura de tamaño lodosa. En las zonas donde se acerca al travertino cristalino y se suaviza la pendiente, este va disminuyendo los terrígenos lodosos y aumentando su cristalinidad. Se correlaciona cronoestratigráficamente con el Cuaternario, pues yace discordantemente sobre la secuencia litológica cretácica Tibú- Mercedes **(Figura 16)**.

El travertino cristalino, el cual representa el interés principal de este trabajo de investigación, se encuentra en vista de planta en contacto irregular erosivo con el travertino bioturbado, en vista de perfil se encuentra en contacto a su vez con el travertino lodoso y sobre él yacen unos depósitos del travertino bioturbado **(Figura 17)**.

Figura 17.

Afloramiento de travertino cristalino en contacto difuso con el travertino bioturbado. Se evidencia la diferencia de compactación y meteorización entre cada tipo de travertino.



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Geomorfológicamente está conformado por pendientes moderadamente pronunciadas y en el lecho dentro del depósito, suele estar inclinado y ondulado de acuerdo con la topografía. Esta litología se puede apreciar en la estación E1, E2, E3, E4, E13, E14, E15 y E16. El afloramiento presenta una compactación moderada de carácter calcáreo y un bandeamiento bien definido de tonalidades beige crema (5YR 8/1 según Munsell (2009)) con algunas bandas de color más blanquecino (5Y 8/1 según Munsell (2009)) y otras más oscuras (10YR 8/2 según Munsell (2009)) características de este travertino, a su vez, presenta una textura cristalina. (**Figura 18 y 19**)

Figura 18.

Travertino cristalino correspondiente a la terraza 4 de la zona de explotación. Se evidencia bandeamiento plano paralelo con dato 215/10 y ondulaciones del mismo.



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La roca corresponde a una roca microcristalina de cemento de calcita espar, según Folk (1974). Teniendo en cuenta su composición porcentual de cemento y aloquímicos, corresponde a una wackestone calcárea, según Dunham (1962). La roca calcárea que está siendo lixiviada por la fuente de agua ácida para formar el travertino se correlaciona con la Formación Tibú-Mercedes y cronoestratigráficamente se ubica en el Cuaternario, pues yace discordantemente sobre la secuencia litológica cretácica Tibú- Mercedes.

Figura 19.

Afloramiento de travertino en la 1ra terraza de explotación con evidencia de bandeamiento, ondulaciones y cavidades.



La **Figura 20** representa un afloramiento de caliza fosilífera cuya continuidad se da con los afloramientos de las estaciones E5 y E7, este afloramiento está siendo lixiviado actualmente por la Quebrada Ojo de Agua cuyo pH es de 5, esta fuente hidrográfica tiene su nacimiento metros más arriba de la estación E6 y desemboca en el Río Servitá, al este de la zona del título, lugar en donde se está depositando el travertino favorecido por el cambio de pendiente y el valle formado por el Río Servitá.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 20.

Fotografía georreferenciada con la estación 6 que corresponde a una caliza fosilífera que está siendo lixiviada por la Quebrada Ojo de Agua cuyo pH se determinó en 5.

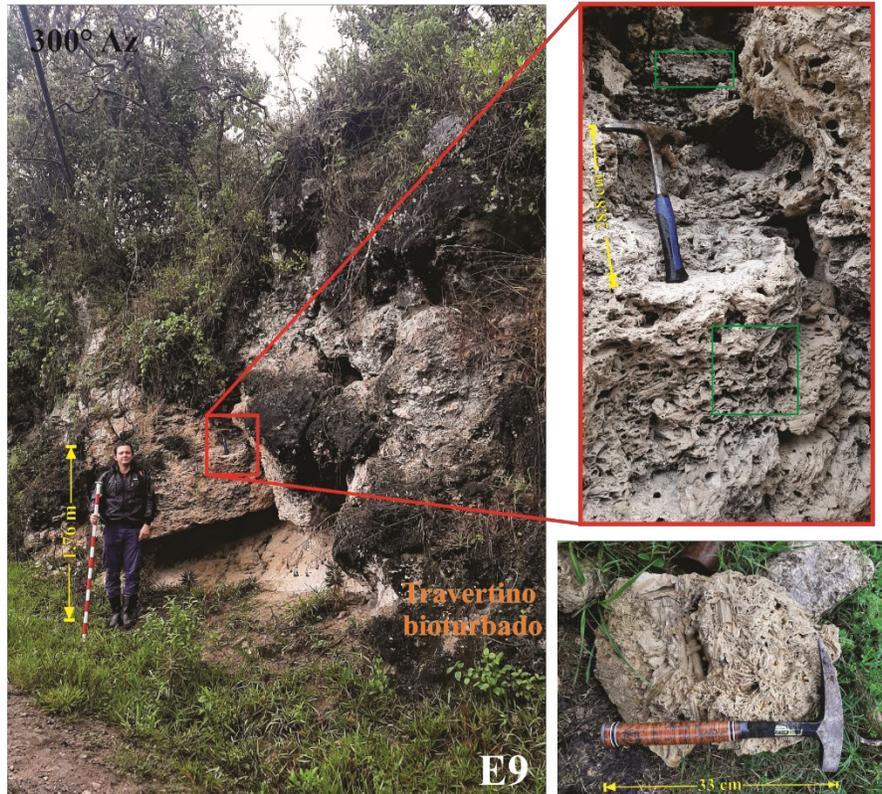


El travertino bioturbado se encuentra en vista de planta en contacto irregular erosivo con el travertino lodoso y a su vez, con el travertino cristalino, en vista de perfil se encuentra en contacto a su vez con el travertino cristalino (**Figura 15**). Geomorfológicamente está conformado por pendientes leves-moderadamente pronunciadas y en el lecho sobre el travertino cristalino. Esta litología se puede apreciar en la estación E8, E9, E10, E12, E16, E18 y E22. Los afloramientos presentan alta meteorización, media-baja compactación, alta presencia de vegetación, así mismo, se expone una tonalidad oscura grisácea e internamente unos colores beige claro-naranjas, se evidencia un carácter calcáreo y un leve bandeamiento (característico del travertino), sin embargo, mantiene una textura de tamaño lodosa con moldes de impresiones por hojas, fragmentos leñosos y raíces. Se correlaciona cronoestratigráficamente con el Cuaternario, pues yace discordantemente sobre la secuencia litológica cretácica Tibú-Mercedes (**Figura 21**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 21.

Afloramiento de travertino bioturbado con evidencia de porosidad secundaria debido a la actividad orgánica en el proceso (transporte y depositación).

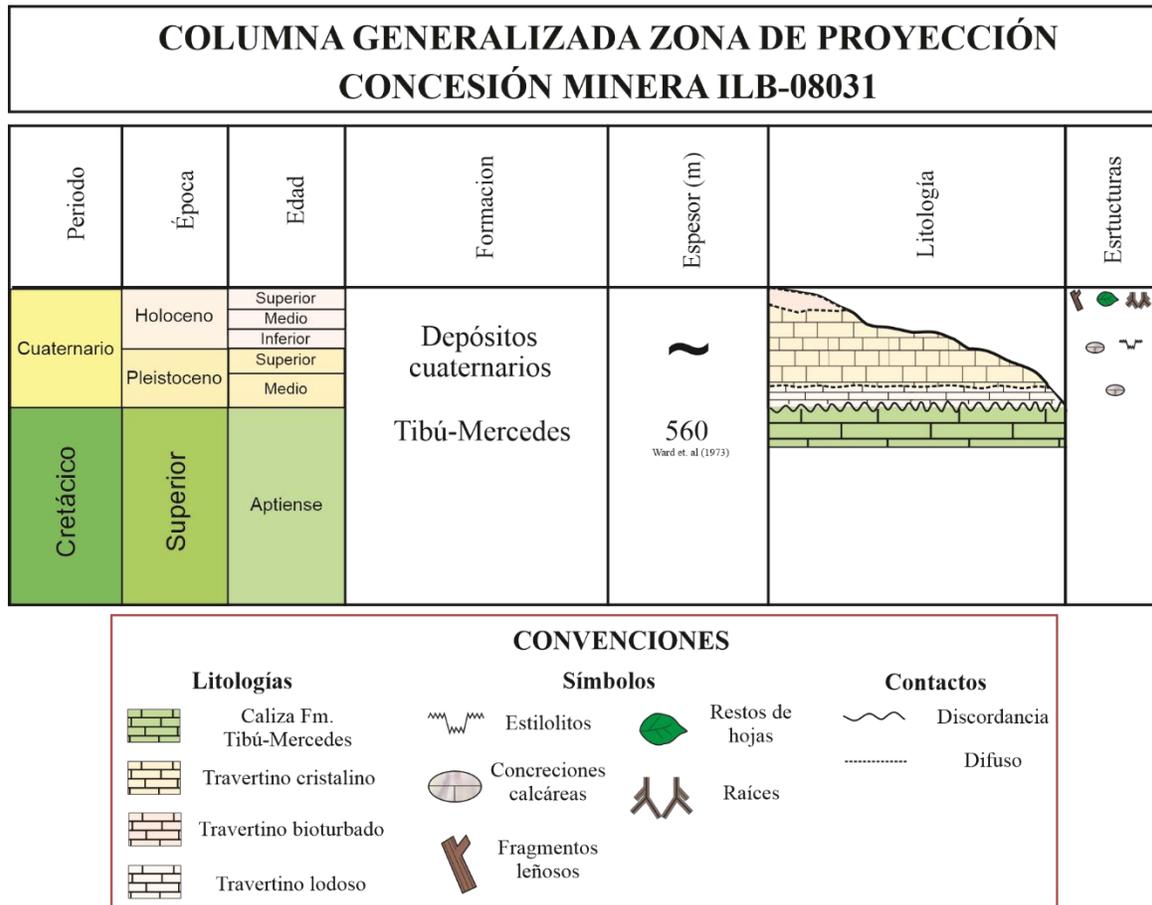


La **Figura 22** corresponde a la columna cronoestratigráfica generalizada de la zona de proyección de la concesión minera, en la base se encuentra la formación Tibú-Mercedes con un espesor de 560 metros determinado por Ward et. al (1973), yaciendo sobre ella en contacto discordante la formación del yacimiento de travertino que se subdivide en tres tipos de mencionados anteriormente (lodoso, cristalino y bioturbado).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 22.

Columna generalizada de la zona de proyección de la explotación. Las calizas de la Formación Tibú-Mercedes se encuentran en contacto discordante con el depósito de travertino.

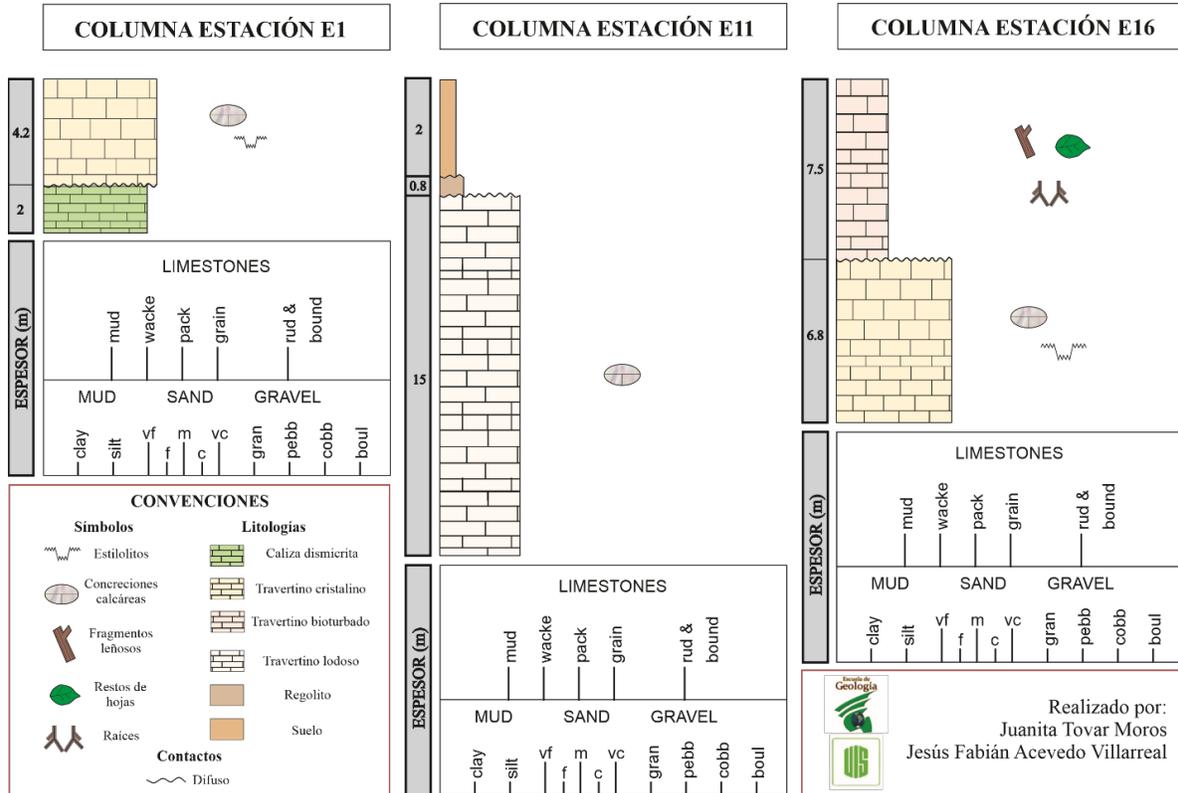


En las columnas específicas (**Figura 23**) se representaron espesores de afloramientos del travertino que se subdivide en tres tipos mencionados anteriormente (lodoso, cristalino y bioturbado), el contacto entre estos tipos se traza como difuso y en algunos casos tiende a ser erosivo, la diferenciación litológica está dada por el contenido de estructuras (fragmentos leñosos, hojas, raíces, concreciones calcáreas), cambios texturales, nivel de meteorización y contenido de terrígenos lodosos.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 23.

Columnas específicas de zonas en las que el travertino se encontraba en contacto con un tipo litológico diferente. Se evidencian texturas diferentes entre los sub-tipos de travertinos y estructuras características de cada uno.



6.2. Descripción textural y composicional

6.2.1. Descripción macroscópica

Travertinos

Para el debido reconocimiento del carácter calcáreo de las rocas se utilizó ácido clorhídrico (HCl) concentrado al 10%.

El reconocimiento textural y composicional, y la descripción y clasificación de las muestras de rocas calcáreas en muestras de mano correspondientes al travertino, se llevó a cabo utilizando las propuestas de Folk (1974) y Dunham (1962). Así mismo, se hizo uso de la guía para la descripción y clasificación de rocas calcáreas de Cruz & Caballero (2007).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

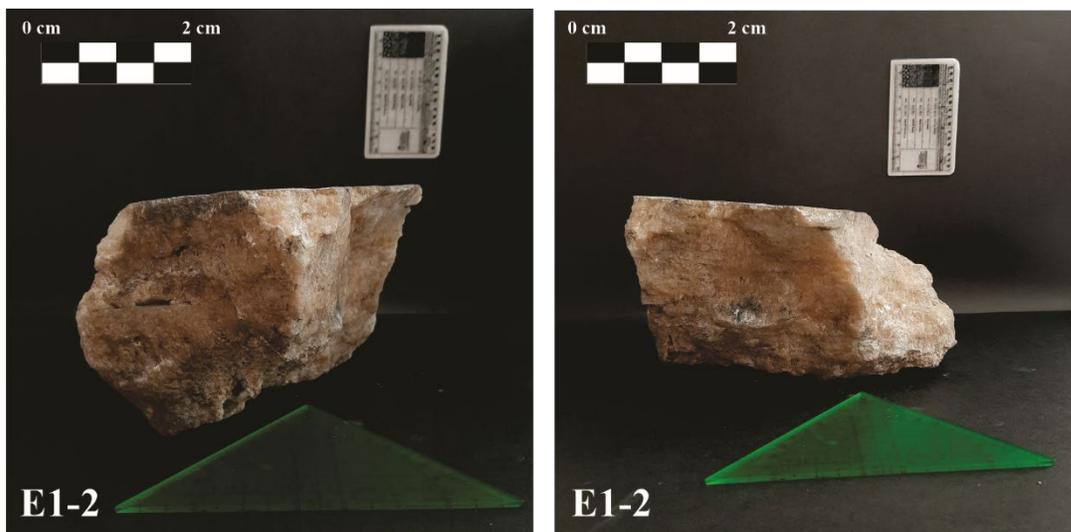
Como referencia del color de los afloramientos y de las muestras de mano y sus constituyentes, se utilizó la carta de colores de roca de Munsell (2009).

Finalmente, se realizó un registro fotográfico de las características más relevantes observadas con su respectiva escala.

A nivel macroscópico, las muestras de travertino corresponden a una roca calcárea compuesta principalmente por lodo micrítico (matriz) y calcita espar (cemento). Presentan una porosidad secundaria por la disolución del cemento y fracturación por procesos físicos, a su vez, tienen media-alta compactación. (Figura 24, 25, 26 y 27)

Figura 24.

Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E1-2 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E1

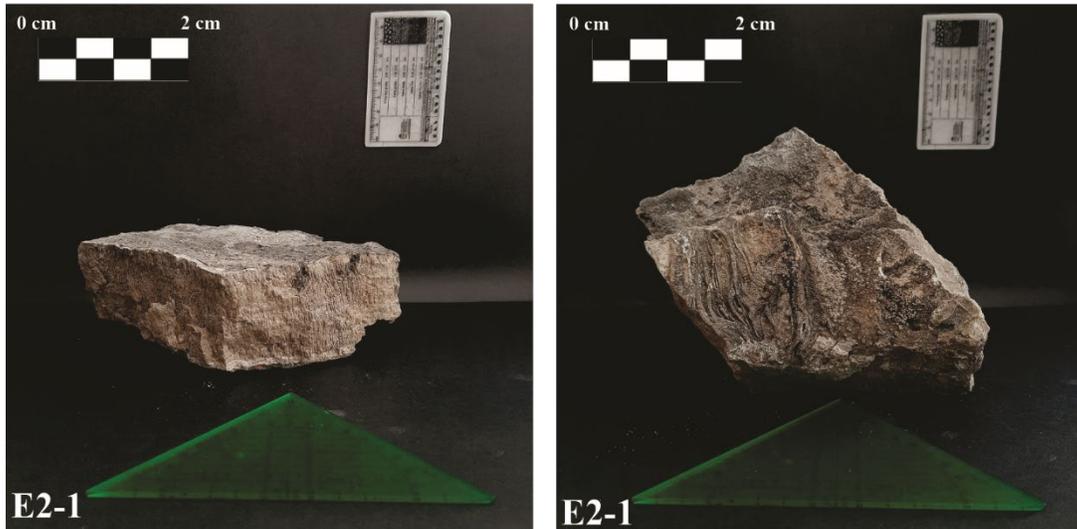


Latitud	Longitud	Z
6,71294°N	72,70908°W	1748

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 25.

Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E2-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E2



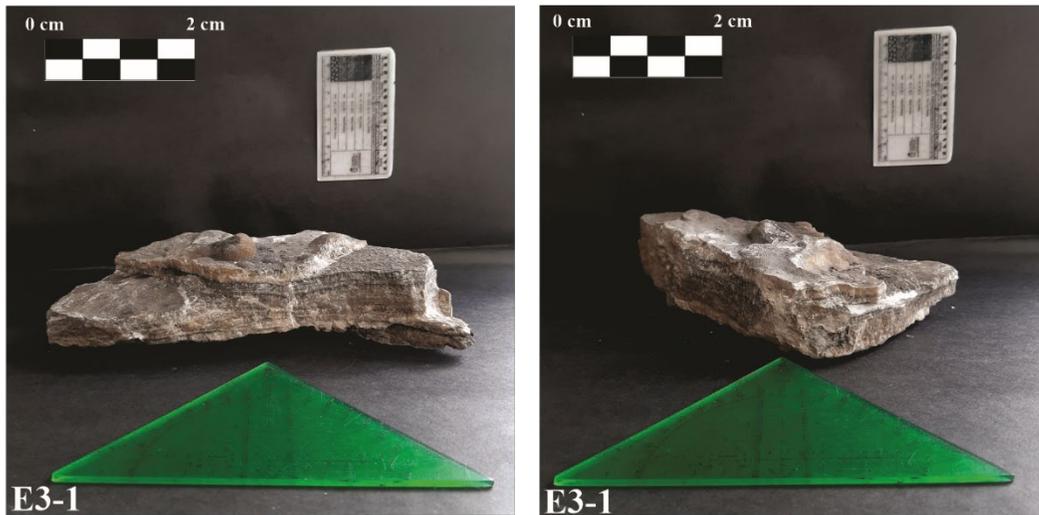
Latitud	Longitud	Z
6,72406°N	72,70963°W	1821

La roca fresca presenta predominantemente tonalidades beige crema (5Y 8/4 según Munsell (2009)) a colores más blanquecinos (5Y 8/1 según Munsell (2009)), con algunas bandas de color más amarillentas (10YR 8/6 según Munsell (2009)), otras más oscuras (10YR 7/4, 10YR 6/2, 10R 3/4, 10YR 8/2, 5B 5/1 según Munsell (2009)), e incluso algunas de tonalidades verdosas tenues (5GY 8/1 según Munsell (2009)) (**Figura 26 y 27**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 26.

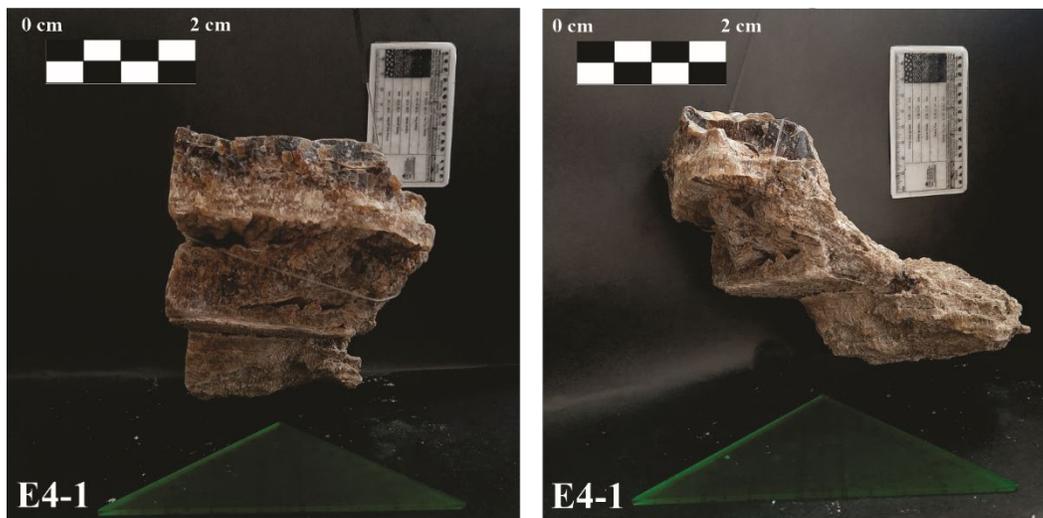
Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E3-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E3



Latitud	Longitud	Z
6,72435°N	72,71008°W	1848

Figura 27.

Fotografías macroscópicas de la muestra de mano E4-1 tomada en la fase de campo correspondiente a travertino cristalino. Estación E4



Latitud	Longitud	Z
6,72414°N	72,71030°W	1855

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En zonas de exposición puede presentar algunas patinas de color verdoso grisáceo o naranjas, sin embargo, predomina el color grisáceo (N4- N5 según Munsell (2009)), todo esto debido a la meteorización química y física a la que estuvo expuesta. (**Figura 25**)

El travertino está compuesto predominantemente por >50% de micrita, <40% de calcita espar y <10% correspondiente a la porosidad secundaria (este porcentaje puede disminuir a medida que se profundiza el yacimiento), no presenta aloquímicos.

La matriz se compone por lodo calcáreo microcristalino (micrita), el cemento es debido a la precipitación del carbonato de calcio posterior al depósito del sedimento carbonatado, el cual se ve a manera de cristales masivos anhedrales y otros euhedrales de colores cremas, incoloros e incluso algunos traslúcidos que alcanzan los 1-5 mm de dimensión, a su vez, pueden encontrarse rellenando fracturas o espacios por disolución con calcita acicular de color traslúcido.

Dado lo anterior, es una roca calcárea en la que sus partículas se encuentran no calibradas debido a la variabilidad de estas.

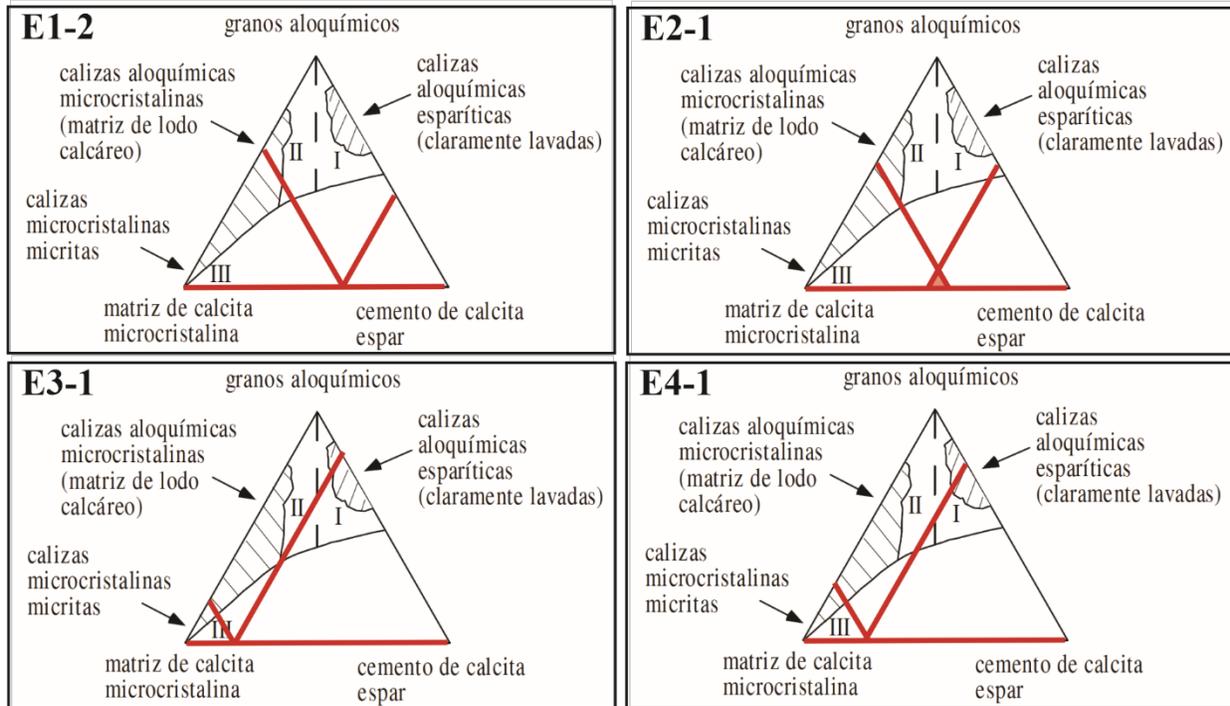
Según la clasificación textural y composicional de Folk (1974), teniendo en cuenta que la matriz en la roca predomina sobre el contenido del cemento calcáreo (esparita), el travertino correspondería a una caliza tipo III, rocas microcristalinas, micritas o dismicritas (**Figura 28**).

Según la clasificación de acuerdo con la textura depositacional de Dunham (1962) y la composición porcentual de cemento y aloquímicos, teniendo en cuenta que las partículas se formaron por separado, que el ambiente de depositación consiste en lodo calcáreo, y que a su vez contiene más del 10% de esparita, corresponde a una roca calcárea del grupo II-B-2, denominada como wackestone calcárea con esparita.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 28.

Clasificación de las rocas calcáreas correspondientes a los travertinos basada en elementos texturales.



Nota: Modificado de Folk (1974).

6.2.2. Descripción microscópica

6.2.2.1. Muestra E2-1

En la muestra se puede observar bandas micríticas aciculares y concéntricas favorecidas por la disposición del lodo calcáreo, a su vez, una cementación por calcita cristalina que se puede distinguir por los hábitos romboédricos, dendríticos, granulares, aciculares y columnares esparíticos presentes.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En esta muestra de origen sedimentario químico se puede observar un alto contenido de matriz de lodo calcáreo microcristalino (micrita), a su vez, cristales de carbonato de calcio (esparita) y alta porosidad (**Tabla 1**), sin embargo, debido al aspecto sucio que expone la matriz, la muestra tiende a verse en algunas zonas difusa. Ese aspecto se debe en parte al bandeamiento, pues es de tonalidad pardo oscuro y abarca un alto porcentaje, sin embargo, en algunas zonas de la sección está delimitado de manera óptima con variaciones en el espesor entre (0,006 mm – 0.4 mm).

El tamaño de los cristales de calcita puede variar de 0,006 mm - 1 mm, cristalino muy fino a cristalino grueso según la tabla de tamaño de granos para rocas calcáreas tomada de Folk (1959), esa variación del tamaño de granos hacia los poros está dada de más pequeño (cerca de los poros) a más grande (lejos de los poros) predominantemente. Se presenta orientada y dispuesta de manera oblicua al bandeo en el que se distribuyen.

En nicoles paralelos (NP) la forma de la calcita se presenta en hábitos muy diferentes, en la sección delgada E2-1 aparece como cristales subautomorfos a xenomorfos, en agregados granulares, alargados, redondeados, aciculares, globulares y curvados. Su color es incoloro, al girar la platina este no varía por lo tanto no presenta pleocroísmo. Presenta un relieve medio-alto, aunque puede variar. Presenta una buena exfoliación de tipo romboédrica.

En nicoles cruzados (NX) la birrefringencia de la calcita es extrema. Presenta colores de interferencia de blancos grisáceos con irisaciones, de órdenes superiores. Tiene extinción simétrica a la exfoliación. Presenta maclas polisintéticas.

La porosidad presente en la muestra es interpartícula y de tipo secundario, la cual se infiere que es el resultado de disolución parcial o total del carbonato de calcio.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Tabla 1.

Porcentajes composicionales de la muestra E2-1 por estimación visual en vista microscópica.

Estimación visual porcentual		
Matriz	Cemento	Porosidad
47 %	38 %	15 %

Según Folk (1974) corresponde a una caliza tipo III, las cuales son designadas como rocas microcristalinas, y teniendo en cuenta la relación matriz-cemento, en la cual el porcentaje de matriz predomina sobre el porcentaje de cemento es una dismicrita.

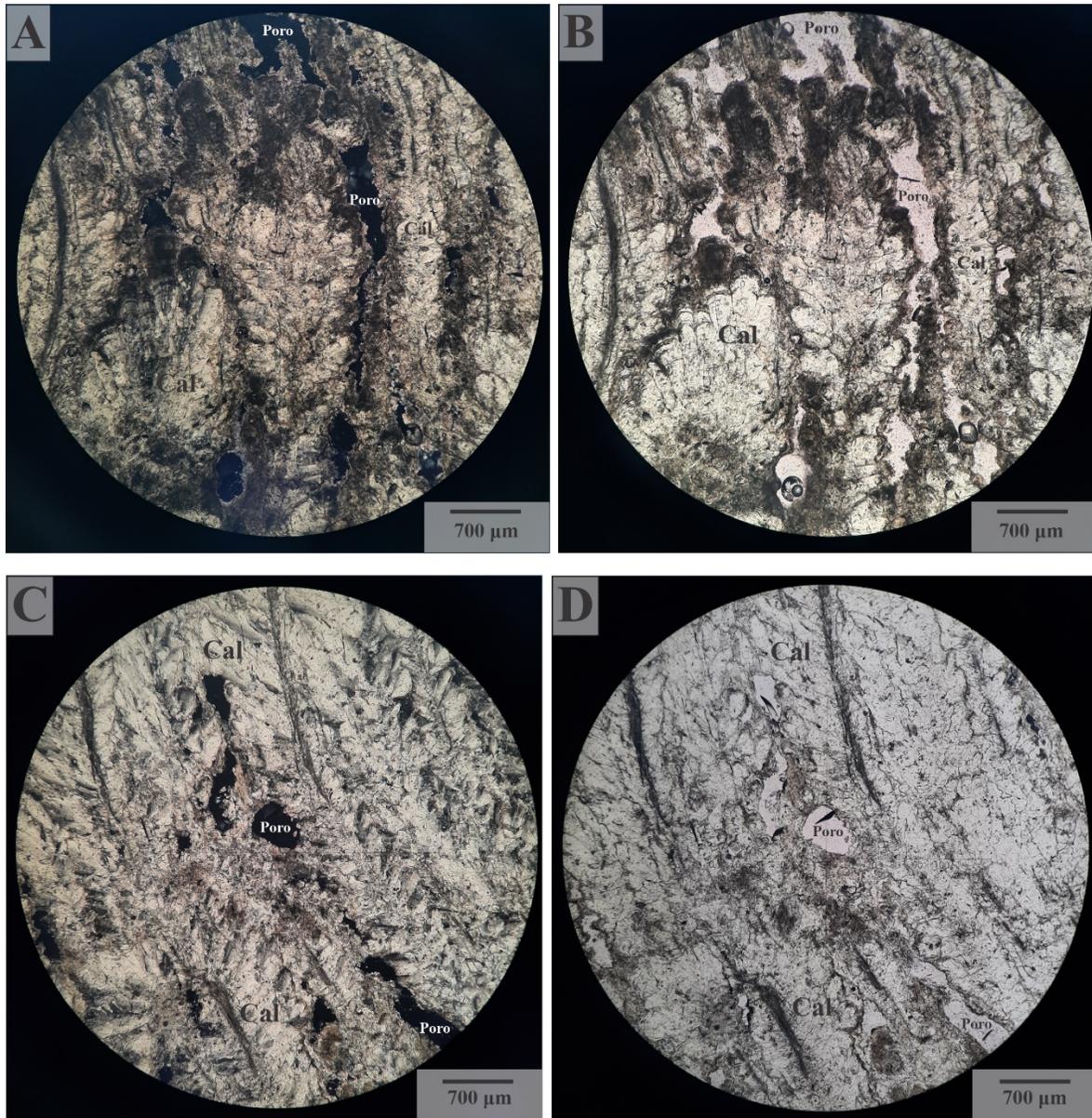
Según Dunham (1962) la roca pertenece a la II categoría: materiales que no se formaron juntos y unidos, a partir de dicha categoría, teniendo en cuenta su clasificación textural, hace parte del grupo II-B-2 que se denomina como wackestone.

La sección E2-1 corresponde a una roca calcárea con alto contenido de micrita y esparita. Según Folk (1974) es una dismicrita y según Dunham (1962) es wackestone (Ver **Figura 29**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 29.

Microfotografías obtenidas de la sección delgada analizada correspondiente a la muestra E2-1. (A) Sección en NX donde se evidencia calcita micrítica de travertino, cristales de esparita dendrítica con líneas crecimiento. (B) Corresponde a la misma área de la imagen "A" en NP, calcita micrítica y esparítica con porosidad interpartícula. (C) Bandas micríticas de 0,1 mm de espesor con calcita dendrítica radial en NX. (D) Vista en NP de la imagen "C" con porosidad interpartícula, bandas micríticas y calcita esparítica con hábito dendrítico.



6.2.2.2. Muestra E3-1

La muestra está compuesta principalmente por la precipitación de la calcita cristalina, a manera de esparita columnar, dendrítica, granular y acicular. A su vez, se puede observar bandas micríticas favorecidas por la disposición del lodo calcáreo.

En esta muestra de origen sedimentario químico se puede observar un alto contenido de cristales de carbonato de calcio (esparita), a su vez, una matriz de lodo calcáreo microcristalino (micrita) y porosidad media (**Tabla 2**), sin embargo, debido al aspecto sucio que expone la matriz, la muestra tiende a verse en algunas zonas difusa. Esas zonas difusas corresponden en parte al bandeamiento de tonalidades pardas oscuro, sin embargo, en otras zonas de la muestra está delimitado de manera óptima y se puede distinguir con claridad con espesores entre 0.3 mm- 1.5 mm.

El tamaño de los cristales de calcita puede variar de 0.04 mm- 1.7 mm, cristalino fino a cristalino muy grueso según la tabla de tamaño de granos para roca calcáreas de Folk (1959). Se presenta orientada y dispuesta perpendicularmente al bandeo en el que se distribuyen.

En nicoles paralelos (NP) la forma de la calcita se presenta en hábitos muy diferentes, en la sección delgada E3-1 aparece como cristales subautomorfos a xenomorfos, en agregados granulares, alargados, redondeados y aciculares. Su color es incoloro, al girar la platina este no varía por lo tanto no presenta pleocroísmo. Presenta un relieve medio-alto, aunque puede variar. Presenta una buena exfoliación de tipo romboédrica.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

En nicoles cruzados (NX) la birrefringencia de la calcita es extrema. Presenta colores de interferencia de blancos grisáceos con irisaciones, de órdenes superiores. Tiene extinción simétrica a la exfoliación. Presenta maclas polisintéticas.

La porosidad presente en la muestra es interpartícula y de tipo secundario, la cual se infiere que es el resultado de disolución parcial o total del carbonato de calcio.

Tabla 2.

Porcentajes composicionales de la muestra E3-1 por estimación visual en vista microscópica.

Estimación visual porcentual		
Matriz	Cemento	Porosidad
32 %	60 %	8 %

Según Folk (1974) corresponde a una caliza tipo III, las cuales son designadas como rocas microcristalinas, y teniendo en cuenta la relación matriz-cemento, en la cual el porcentaje de cemento predomina sobre el porcentaje de matriz es una esparita.

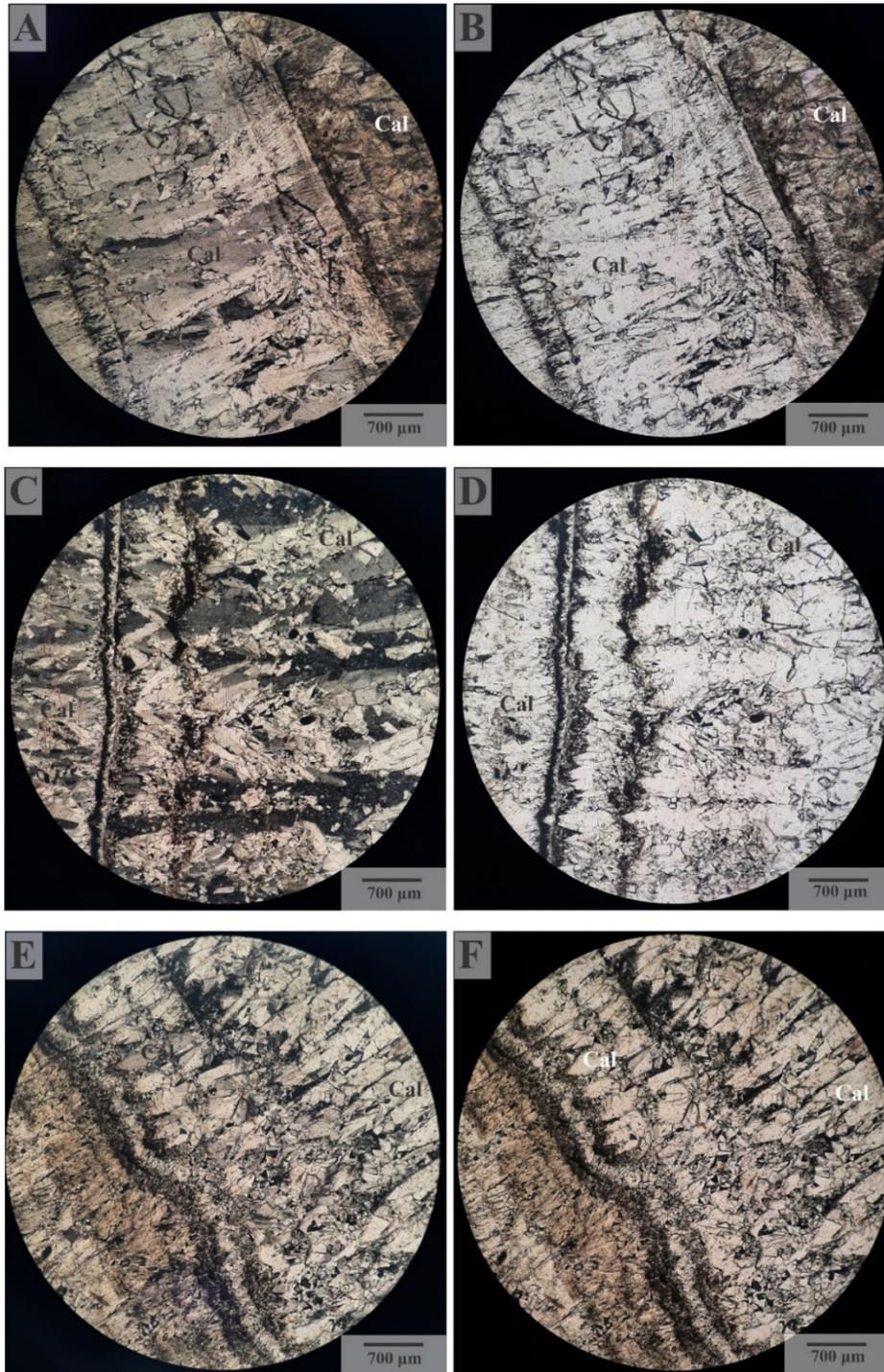
Según Dunham (1962) la roca pertenece a la categoría II: materiales que se no se formaron juntos y unidos, a partir de dicha categoría, teniendo en cuenta su clasificación textural, hace parte del grupo II-A-2 que se denomina como packstone.

La sección E3-1 corresponde a una roca calcárea con alto contenido de esparita. Según Folk (1974) es una esparita y según Dunham (1962) es una packstone (Ver **Figura 30**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 30.

Microfotografías de la sección delgada analizada correspondiente a la muestra E3-1. (A-B) Vista en NX (A) y en NP (B) de calcita esparítica romboédrica con bandas de lodo calcáreo. (C-D) Vista en NX (C) de calcita acicular radial con micritización bandeada. (E-F) Vista en NX (E) y en NP (F) que evidencia una micritización bandeada y ondulada de calcita esparítica orientada y perpendicular a esta laminación.



6.3. Caracterización por rayos X

6.3.1. Difracción de rayos X (DRX)

Para la identificación cualitativa de fases minerales a mayor detalle, se realizó el análisis por difracción de Rayos X de tres (3) muestras de mano, tomadas durante la campaña de campo. Las muestras correspondientes a E2-1 y E3-1 fueron correlacionadas con el análisis macroscópico y microscópico previamente realizado.

Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 2021 del International Center for Diffraction Data (ICDD), tratadas a través del software Diffrac.Eva. El programa contiene bases de datos con bibliografía e información de difracción y cristalografía, que permite seleccionar el mineral más adecuado de acuerdo con las propiedades más comunes y estandarizadas a la firma espectral.

6.3.1.1. Muestra E2-1 (22110001)

Según las firmas reportadas por el difractograma, se identificaron 6 fases minerales entre las cuales está la calcita, el carbonato de calcio, magnesio relacionado a calcita, cuarzo y óxidos de hierro. (Ver **Figura 31 y 32**). Adicionalmente, se determinó la presencia de aragonito y de los óxidos de hierro, el cual no había sido claramente visible en análisis petrográficos. De la misma forma, se pudo observar solapamientos entre las firmas de calcita con las de carbonato de calcio, se presume que el comportamiento de estas firmas puede corresponder bien sea a una fase cristalina de calcita (identificada previamente) o a otra fase mineral formada por este mismo compuesto, teniendo en cuenta que es el máximo constituyente de las rocas de este tipo (calcáreas) (Ver **Tabla 3**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Tabla 3.

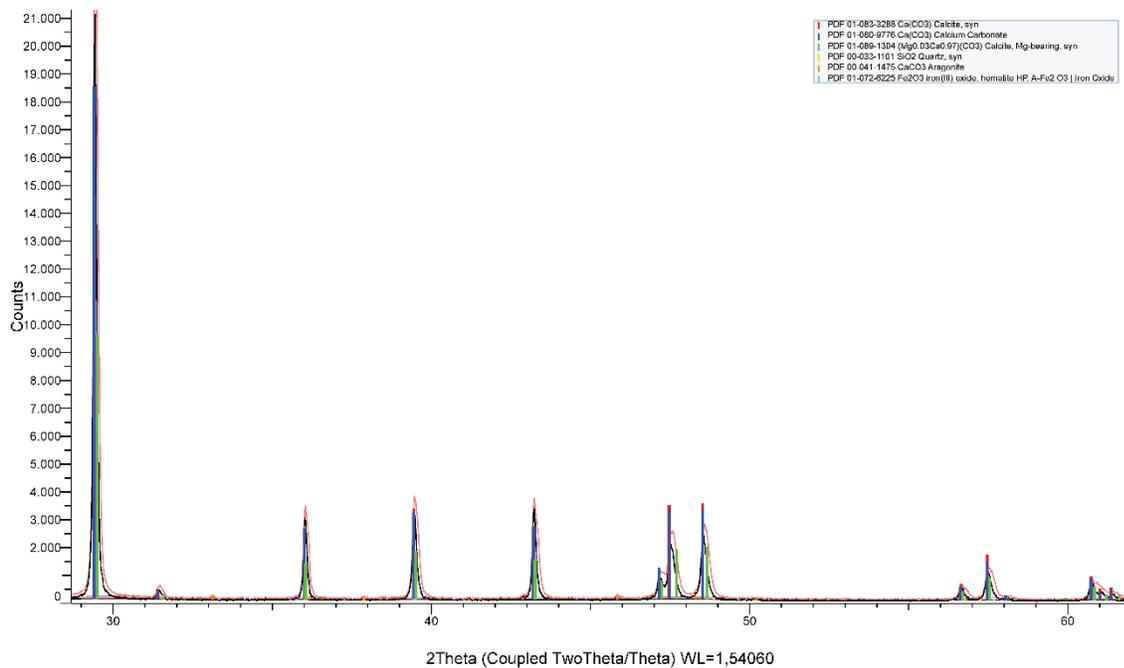
Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E2-1 marcada como 22110001 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

Fase mineral	Nombre	N° PDF
Ca (CO ₃)	Calcita syn	01-083-3288
Ca (CO ₃)	Carbonato de calcio	01-080-9776
(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃)	Calcita relacionada con Magnesio	01-089-1304
SiO ₂	Cuarzo	00-033-1161
CaCO ₃	Aragonito	00-041-1475
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	01-072-6225

Figura 31.

Difractograma de la muestra E2-1 con código interno 22110001 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

22110001 (Coupled TwoTheta/Theta)

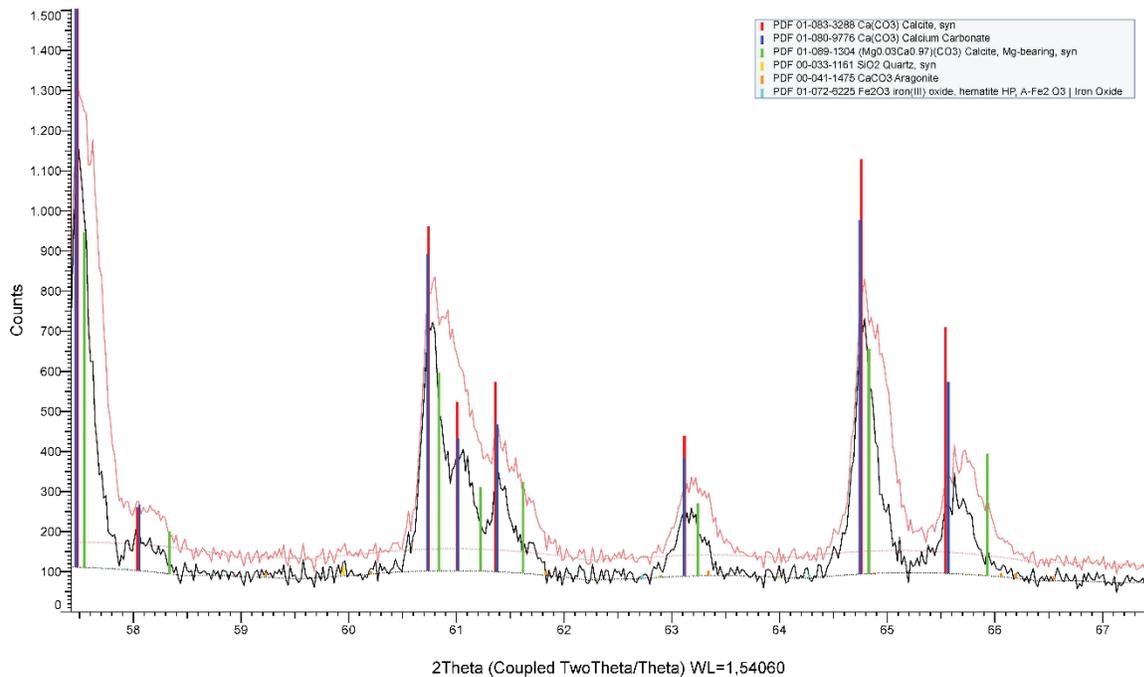


APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 32.

Difractograma de la muestra E2-1 con código interno 22110001 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

22110001 (Coupled TwoTheta/Theta)



6.3.1.2. Muestra E3-1 (22110002)

De acuerdo con las firmas de difractograma registradas, se encontraron 7 fases cristalinas correspondientes con calcita, carbonato de calcio, calcita relacionada con magnesio, aragonito y cuarzo (Ver **Figura 33 y 34**). Igualmente, se encontraron dos tipos de óxido: Oxido de aluminio cálcico y óxido de hierro relacionado con hematita, los cuales no habían sido diferenciados mediante análisis petrográficos. Al igual que la muestra E2, se evidenciaron solapamientos entre las firmas de calcita con las de carbonato de calcio (Ver **Tabla 4**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

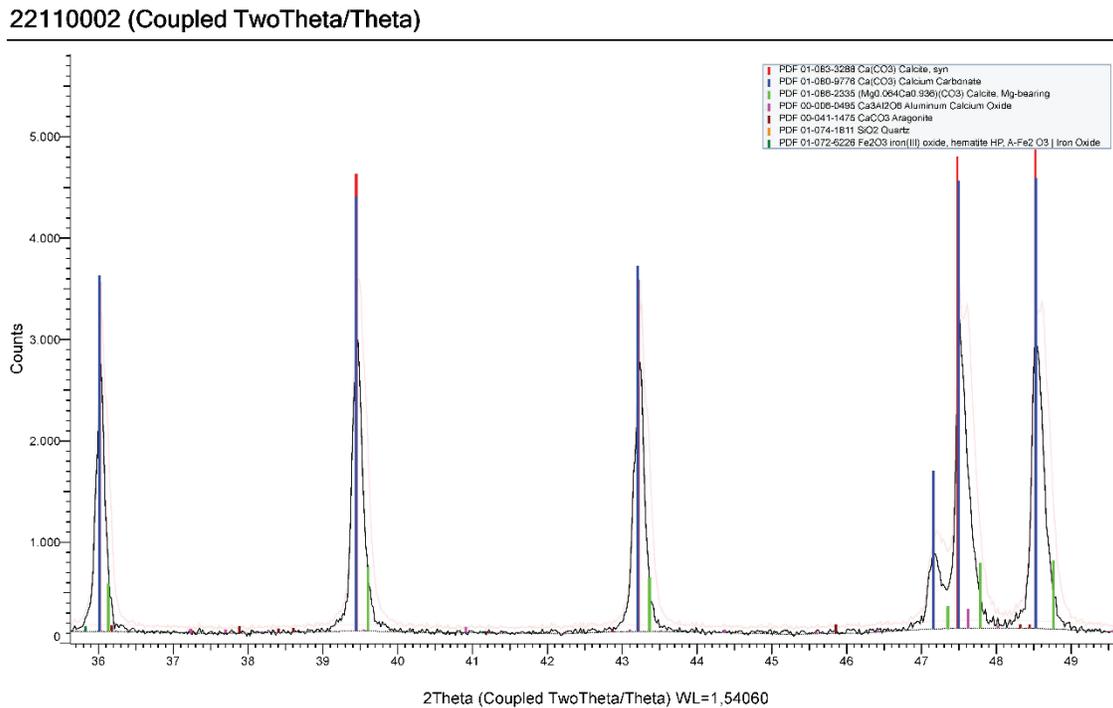
Tabla 4.

Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E3-1 marcada como 22110002 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander

Fase mineral	Nombre	N° PDF
Ca (CO ₃)	Calcita syn	01-083-3288
Ca (CO ₃)	Carbonato de calcio	01-080-9776
(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃)	Calcita relacionada con Mg	01-086-2335
SiO ₂	Cuarzo	00-074-1811
CaCO ₃	Aragonito	00-041-1475
Ca ₃ Al ₂ O ₆	Oxido de aluminio cálcico	00-006-0495
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	01-072-6226

Figura 33.

Difractograma de la muestra E3-1 con código interno 22110002 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

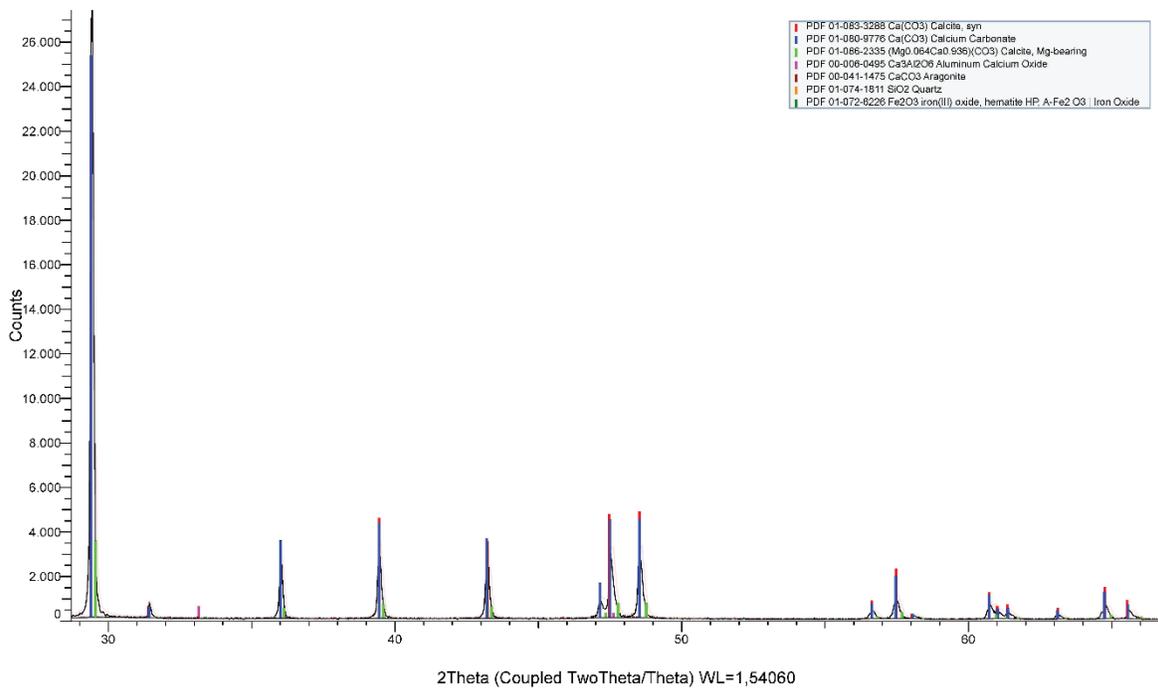


APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 34.

Difractograma de la muestra E3-1 con código interno 22110002 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

22110002 (Coupled TwoTheta/Theta)



6.3.1.3. Muestra E4-1 (22110003)

Se identificaron 6 fases minerales de acuerdo con las firmas de difractograma analizadas, estas corresponden a calcita, carbonato de calcio, aragonito y cuarzo (Ver **Figura 35 y 36**). Adicionalmente, se observaron reflexiones de baja intensidad correspondientes a la fase cristalina de la hematita, las cuales tenían solapamientos entre las firmas de los óxidos de hierro (Ver **Tabla 5**).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Tabla 5.

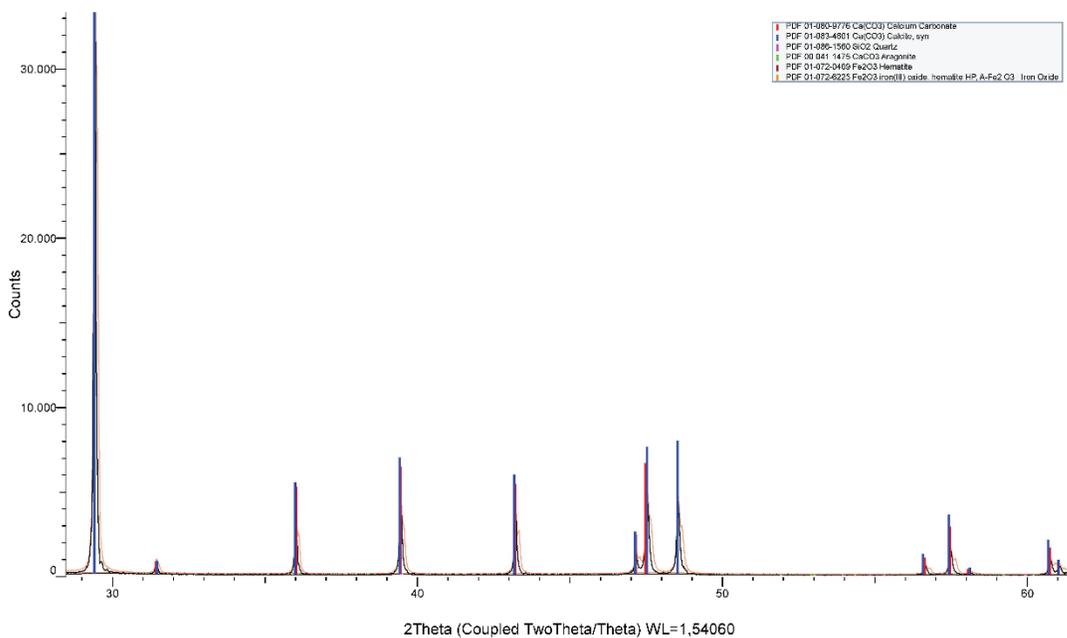
Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra E4-1 marcada como 22110003 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander

Fase mineral	Nombre	N° PDF
Ca (CO ₃)	Calcita syn	01-083-4601
Ca (CO ₃)	Carbonato de calcio	01-080-9776
CaCO ₃	Aragonito	00-041-1475
SiO ₂	Cuarzo	00-086-1560
Fe ₂ O ₃	Hematita	01-072-0469
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	01-072-6225

Figura 35.

Difractograma de la muestra E4-1 con código interno 22110003 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

22110003 (Coupled TwoTheta/Theta)

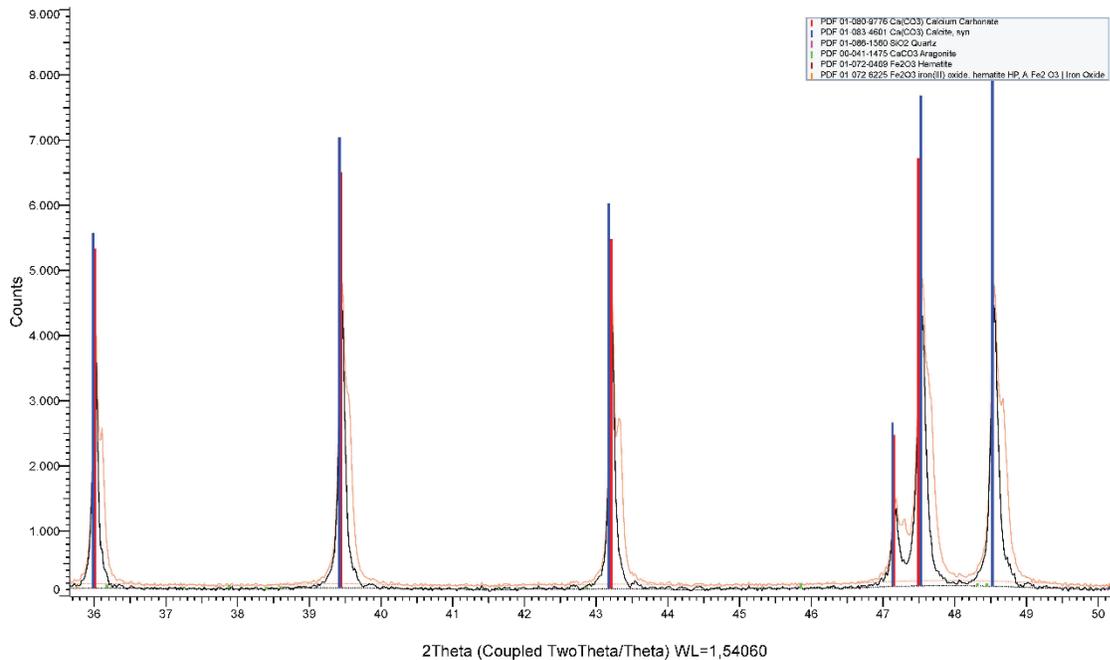


APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 36.

Difractograma de la muestra E4-1 con código interno 22110003 donde se evidencian las firmas de los minerales principales en la muestra.

22110003 (Coupled TwoTheta/Theta)



6.3.2. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Para la identificación y análisis elemental cualitativo y cuantitativo por Fluorescencia de Rayos X (Na-U) de las muestras minerales a mayor detalle, se realizó el registro de datos y análisis de tres (3) muestras de roca previamente molidas, las cuales fueron recolectadas durante la campaña de campo. Las muestras correspondientes a E2-1 y E3-1 fueron correlacionadas con el análisis macroscópico y microscópico previamente realizado. A su vez, se realizó el análisis de la muestra E4-1.

Los resultados indican el porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental de las muestras. En las tablas 6, 7 y 8, todos los compuestos están organizados según su composición elemental.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Se identificó zirconio en la muestra E2-1 (Ver **Tabla 6**) y en la muestra E4-1 (Ver **Tabla 8**) pero no son cuantificables.

Tabla 6.

Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E2-1, identificada con código interno 22-0082 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

MUESTRA DE TRAVERTINO E2-1			
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN
Ca	32,57%	CaO	45,57%
Mg	0,57%	MgO	0,95%
Si	0,38%	SiO ₂	0,81%
S	0,26%	SO ₃	0,64%
Al	0,21%	Al ₂ O ₃	0,40%
Na	0,12%	Na ₂ O	0,16%
Fe	0,09%	Fe ₂ O ₃	0,13%
K	0,05%	K ₂ O	0,06%
Sr	0,04%	SrO	0,05%
Elementos minoritarios			
Mn	91 PPM	MnO	0,01%
Ti	71 PPM	TiO ₂	0,01%
Zr	70 PPM	ZrO ₂	94 PPM
P	47 PPM	P ₂ O ₅	0,01%
As	19 PPM	As ₂ O ₃	25 PPM
Zn	10 PPM	ZnO	13 PPM

Nota: Adaptado del Informe de Resultados del Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Según los resultados de FRX, en los travertinos es posible determinar en mayor proporción la presencia de elementos como el Ca, Mg, Si, S, Al, Na, Fe, K y Sr, y en menor proporción elementos como el Mn, Ti, Zr, P, As, Zn y Cu.

Tabla 7.

Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E3-1, identificada con código interno 22-0083 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

MUESTRA DE TRAVERTINO E3-1			
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN –
Ca	32,91%	CaO	46,05%
Mg	0,47%	MgO	0,78%
S	0,18%	SO ₃	0,44%
Na	0,06%	Na ₂ O	0,08%
Si	0,05%	SiO ₂	0,11%
Al	0,03%	Al ₂ O ₃	0,06%
Sr	0,02%	SrO	0,02%
Fe	0,01%	Fe ₂ O ₃	0,02%
Elementos minoritarios			
K	90 PPM	K ₂ O	0,01%
P	33 PPM	P ₂ O ₅	75 PPM
Ni	13 PPM	NiO	16 PPM

Nota: Adaptado del Informe de Resultados del Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Tabla 8.

Porcentaje cuantitativo en óxidos y elementos de la muestra E4-1, identificada con código interno 22-0084 en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

MUESTRA DE TRAVERTINO E4-1			
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN –
Ca	32,90%	CaO	46,04%
Mg	0,52%	MgO	0,86%
S	0,26%	SO3	0,65%
Na	0,12%	Na2O	0,16%
Si	0,07%	SiO2	0,14%
Fe	0,04%	Fe2O3	0,06%
Al	0,04%	Al2O3	0,08%
Sr	0,02%	SrO	0,03%
K	0,02%	K2O	0,02%
Elementos minoritarios			
Zr	49 PPM	ZrO2	66 PPM
Cu	25 PPM	CuO	31 PPM
Ni	15 PPM	NiO	19 PPM

Nota: Adaptado del Informe de Resultados del Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

Las concentraciones reportadas en el análisis y la suma total de cada una de las muestras no reflejan el 100%, esto es debido a que se utiliza CHO para completar la matriz de cuantificación, es decir, lo que falta para que de ese porcentaje restante en cada una de las muestras son los compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno o materia orgánica. Estos elementos con un número atómico más ligero en la tabla periódica generan rayos X que son muy débiles para llegar al detector y, por consiguiente, no pueden ser calculados.

6.4. Modelado y estimación del recurso

El modelamiento geológico se realizó mediante el software LEAPFROG GEO, se ingresaron las bases de datos de las estaciones y seguido a ello se procesó la información.

Una vez obtenidos los resultados de la fase de campo y el posterior análisis de datos, se desarrolló el modelo geológico que sirvió como base para la evaluación del recurso del yacimiento. Teniendo en cuenta las características litológicas, mineralógicas y estructurales del depósito, se correlacionaron las estaciones del trabajo de campo realizado en la zona de la concesión minera, los cuales fueron tomados en zonas de interés halladas en superficie.

A partir de esa base de datos de estaciones de control recolectada en la campaña de campo, cartografía geológica, levantamiento estratigráfico y demás aspectos relevantes encontrados y analizados en los trabajos de exploración superficial se elaboró el modelo geológico (**Ver Figura 37**).

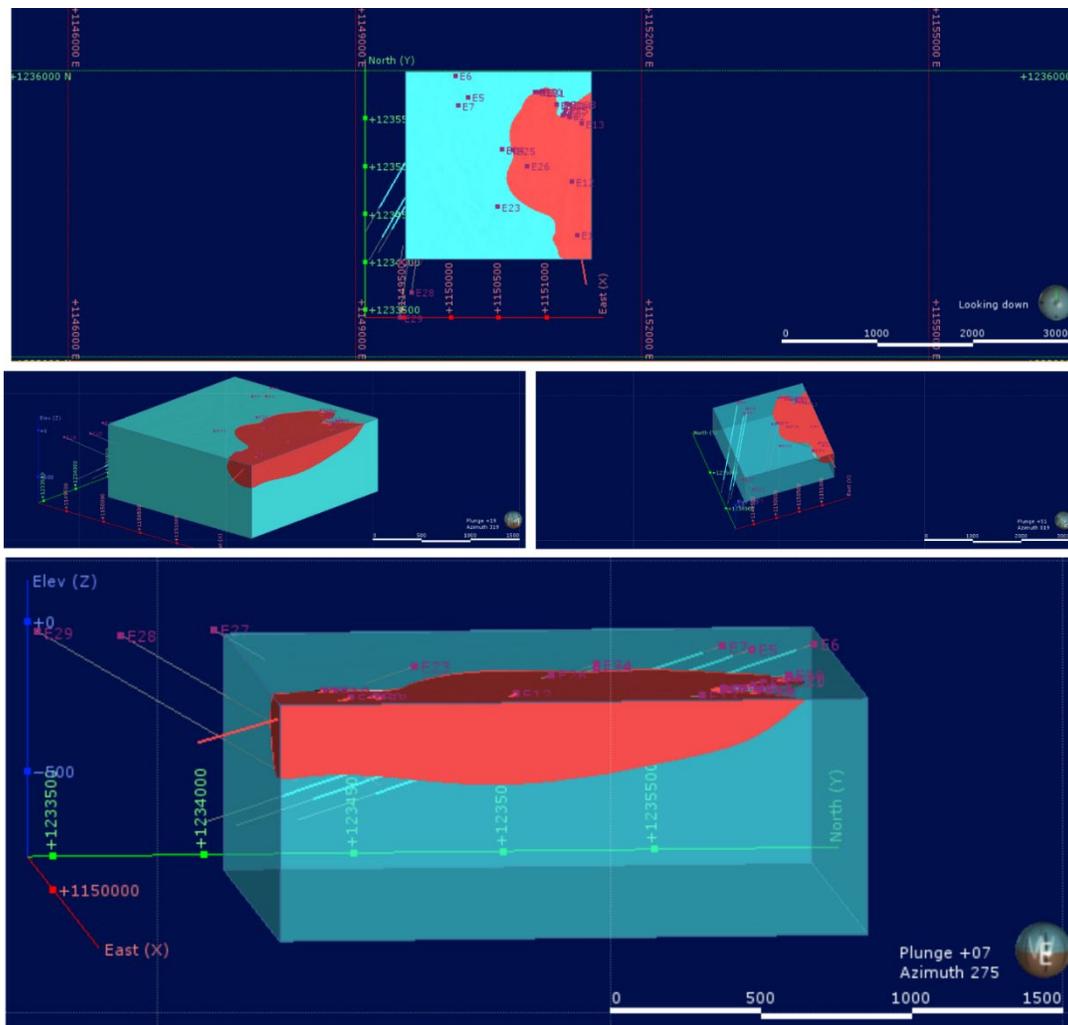
Las litologías representadas en el modelo geológico corresponden al travertino (color rojo) y al cuerpo espeso de caliza de la Formación Tibú-Mercedes (color azul). La delimitación del travertino en superficie fue delimitada por aquellos puntos que correspondían a estaciones de control en donde el travertino se encontraba en contacto con la caliza. La continuidad lateral fue establecida teniendo en cuenta las columnas estratigráficas realizadas, los puntos de mayor y menor altitud del cuerpo de travertino a lo largo del área de estudio y los datos estructurales que fueron recolectados en el trabajo de campo.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Teniendo en cuenta el resultado obtenido con el modelamiento y los datos ingresados, el cuerpo de travertino tiene un área estimada de 122 ha y un volumen aproximado de $6,1 \times 10^7 \text{ m}^3$, sin embargo, es importante tener en cuenta que el cuerpo de travertino se divide en los tres sub-tipos anteriormente mencionados (lodoso, bioturbado y cristalino), de los cuales el único que representa un interés económico por su pureza es el travertino cristalino, por ende, ese valor no representa la cantidad de travertino disponible para explotación.

Figura 37.

Modelado del yacimiento de travertino en Málaga, Santander.



7. Discusión

El travertino es una roca sedimentaria química producto de la lixiviación de una roca calcárea expuesta por acción de aguas ácidas. Por medio de esta meteorización química se generan iones y coloides en soluciones acuosas salinas que sobresaturan la fuente de pH bajo de estos sedimentos químicos, la fuente de agua proviene principalmente de la quebrada Ojo de Agua, junto con aguas de escorrentía y filtraciones que circundan por la roca, también recibe aporte de las quebradas y drenajes paralelos, esta agua se acidifica al saturarse de dióxido de carbono, parte de este proviene de la descomposición de la materia orgánica y también por el entrapamiento del mismo en las capas de roca que se encuentra a lo largo de su trayecto, el CO_2 acuoso en la solución da paso a la formación de ácido carbónico, estas aguas acidificadas al entrar en contacto con los cuerpos calcáreos de la Formación Tibú-Mercedes meteorizan químicamente por lixiviación este cuerpo rocoso, como resultado de ello, el flujo de agua se sobresatura en carbonato de calcio y en menor proporción en óxidos de magnesio e hierro, dando paso a la formación de coloides.

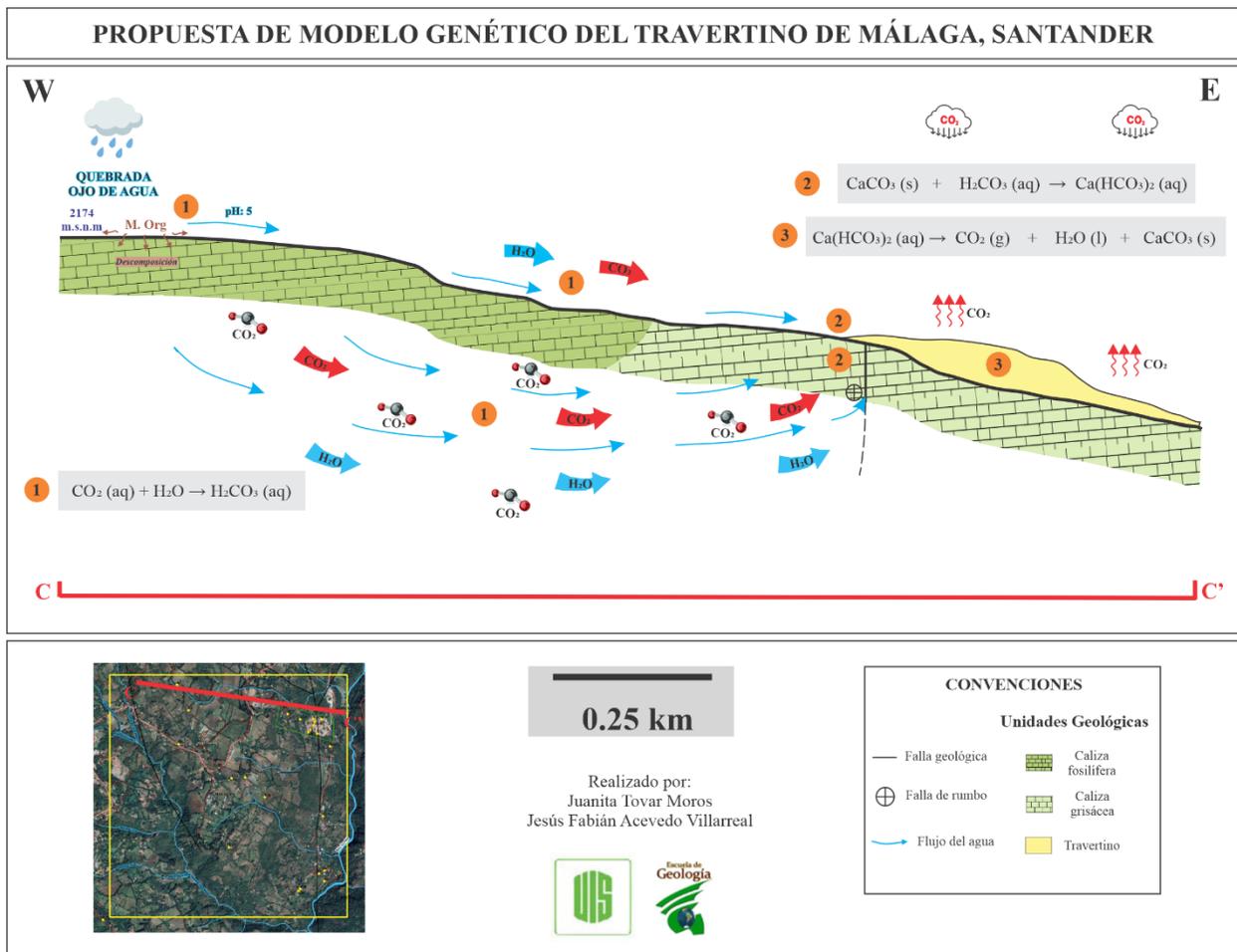
Esta agua acida transporta esos coloides e iones de Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , hasta llegar a un punto de pendientes pronunciadas apto para precipitar hasta el lecho del valle del Río Servitá donde se encuentra inclinado y ondulado debido a la topografía, lo cual concuerda con lo propuesto por Pentecost (2005), donde menciona que los travertinos formados in-situ rara vez se ubican de manera horizontal, así, el bandeamiento se produce debido a la depositación a favor de la pendiente y sus tonalidades se le atribuyen predominantemente a los óxidos presentes en la solución.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Como resultado, precipita una roca rica en carbonato de calcio con un bandeamiento característico de colores beige, café, blanco, rojizo, pardo, naranja, entre otros; que presenta porosidad debido a burbujas de gas que ocasionalmente quedan atrapadas entre las capas, dando origen a pequeñas cavidades esféricas. Teniendo en cuenta lo anterior y basados en los datos recopilados y tomados en campo se propone el modelo genético de la **Figura 38**.

Figura 38.

Propuesta de modelo genético del travertino de Málaga, Santander.



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Todos los suelos, en su evolución y desarrollo, tienden naturalmente hacia una acidificación de su pH (Mussini et al. 1984, Noble et al. 1999). Esta transformación del ambiente químico tiene origen en diferentes mecanismos simultáneos, entre los cuales se destacan: el movimiento del agua, la hidrólisis del aluminio, la actividad radical y de los microorganismos (respiración y absorción de nutrientes), la nitrificación, la tasa de acumulación y descomposición de la materia orgánica y la redistribución de nutrientes producida por los vegetales en el perfil del suelo (Binkley & Richter, 1987; Urrego, 1997; Jobbágy & Jackson, 2003 en Buduba, 2006), así como las inducidas por las prácticas agrícolas (abonos acidificantes) o la contaminación exterior (lluvia ácida).

Se propone en el modelo genético (Ver **Figura 38**) que este aumento de la concentración de iones H^+ en el suelo, se debe, en una primera instancia, a la descomposición de la materia orgánica, la cual genera ácidos orgánicos y ácido carbónico.

El agua de escorrentía al entrar en contacto con el dióxido de carbono (CO_2), principalmente el que se encuentra disponible en los primeros sustratos por la descomposición de la materia orgánica y el que está atrapado en las rocas cuando esta se filtra, produce una reacción química, la cual da lugar a la formación del ácido carbónico (Ver **Figura 38**, reacción 1), a medida que aumenta la cantidad de CO_2 la solución presenta una disminución del pH, permitiendo así la lixiviación de las litologías calcáreas de la Formación Tibú y Mercedes a lo largo de su trayecto, se proponen dos flujos de agua principales, el primero corresponde a la escorrentía que va sobre el nivel del suelo y que corresponde al trayecto de la Quebrada Ojo de Agua y drenajes paralelos, y el segundo a la filtración entre los estratos calcáreos.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

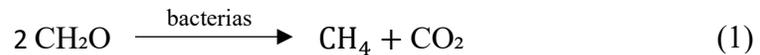
Seguido a eso, ocurre una descarga de esa agua subterránea que está percolando; en la zona se proponen 2 salidas de ese flujo hídrico ácido, la primera es por una descarga regular favorecida por el cambio de pendiente y la alcalinidad del agua, y la segunda por una falla de rumbo que se encuentra presente en la zona, es importante tener en cuenta que este proceso está favorecido por la lixiviación de esa caliza (Ver **Figura 38**, reacción 2), la cual está ocurriendo tanto en superficie como en el subsuelo, y que está generando la saturación en bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). El agua saturada en ácido carbónico (H_2CO_3) y en bicarbonato de calcio (producido por la lixiviación), al presentar una alta solubilidad en el agua, se transporta a manera de coloide hasta el punto en que la saturación de CO_2 se ve reducida (pierde acidez), dando paso a una reacción inversa (Ver **Figura 38**, reacción 3), por medio de la cual el bicarbonato de calcio pasa ser nuevamente carbonato de calcio en consecuencia de la liberación de CO_2 en estado gaseoso de ese flujo coloidal saturado; el CaCO_3 resultante, al presentarse en alta concentración (saturado) y ser poco soluble en agua se depositó en un punto de pendiente topográfica favorable para ello, este proceso cíclico es el causante de la formación del travertino.

Actualmente, este proceso se sigue generando, pues la fuente de agua hídrica sigue removilizando, se está saturando y está precipitando carbonato de calcio, con la variación de que ahora se está lixiviando el mismo travertino.

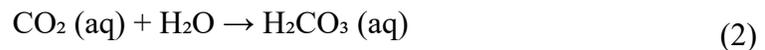
APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Pentecost (2005) explica este proceso de formación del travertino argumentando que las aguas que atraviesan el suelo y las grietas se saturan de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo de su recorrido mediante mecanismos simultáneos, entre los cuales se destaca la descomposición de la materia orgánica y la constante interacción y disolución del CO_2 en aguas meteóricas en los estratos calcáreos.

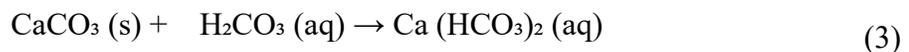
Por medio de una reacción de desproporción (**ecuación 1**) las bacterias actúan sobre el carbono, de tal forma que, cuando la materia orgánica (CH_2O) se descompone, una parte se oxida generando CO_2 y otra parte se reduce obteniendo CH_4 (Mota, 2011).



La cantidad de dióxido de carbono en la solución determina el pH del agua, es decir, cuanto más CO_2 exista en el agua, más acida será la misma (menor pH). Esto sucede porque el CO_2 se torna acuoso en la solución y, una pequeña cantidad se convierte en ácido carbónico (H_2CO_3) por medio de la reacción química de la **ecuación (2)**:

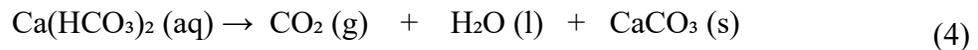


Según Lifeder (2022) el ácido carbónico al interactuar con rocas calcáreas entra en reacción, este proceso químico da lugar a la formación de bicarbonato de calcio (**ecuación 3**):



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El bicarbonato de calcio presenta mayor solubilidad en el agua que el carbonato de calcio, por ende, no se encuentra en estado sólido sino en una solución acuosa junto con el Ca^{2+} , el bicarbonato (HCO_3^-) y el ion carbonato (CO_3^{2-}). Seguidamente, la saturación de dióxido de carbono en el agua se ve reducida, esto conlleva a una reacción inversa, es decir, la transformación del bicarbonato de calcio acuoso a carbonato de calcio sólido (**ecuación 4**):



El carbonato de calcio resultante de la reacción es poco soluble en el agua, permitiendo así que se produzca su precipitación y depositación, esto, en el caso del travertino, ocurre con frecuencia en pendientes pronunciadas y en el lecho dentro del depósito, cuando está presente, suele ser inclinado y ondulado. Los travertinos formados in-situ rara vez se ubican horizontalmente. Las laminaciones en escala de milímetros a centímetros son comunes y, a menudo, son el resultado de ritmos de crecimiento diarios/temporales. Las bacterias, algas, briofitas y juncos están con frecuencia incrustadas en el travertino y, de este modo, la actividad fotosintética aumentará la precipitación de carbonato de calcio. En las cuevas, estas presentaciones normalmente están ausentes. Las morfologías más frecuentes son montículos, colgantes y terrazas asociadas a presas (Pentecost, 2005).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

De acuerdo con Holmes (1929), los yacimientos pueden ser divididos en dos grandes grupos: "singenéticos", si se han formado contemporáneamente con la roca en la cual yacen, y "epigenéticos", si los yacimientos son de edad posterior a la de la roca encajante. Sin embargo, según Mingarro (1964) el criterio que se propone parece sencillo, pero según él es quizá el más difícil de establecer en la realidad de cada yacimiento, pues muchos procesos siempre llevan consigo cierta movilización con posterioridad a la formación de la roca. Tomando los conceptos de singenia y epigenia, más en sentido cronológico que en sentido de aporte de material, el yacimiento de travertino de estudio sería a grandes rasgos un yacimiento singenético, pues está formado principalmente por reorganización, en mayor o menor grado de los elementos químicos existentes de la propia unidad geológica.

Teniendo en cuenta el modelo genético propuesto en la **Figura 38**, la recopilación de toda la información y los resultados, y los procesos geológicos que dan origen al depósito (erosión, transporte y sedimentación química), basados en la clasificación genética de los yacimientos minerales propuesta por Smirnov (1976), el yacimiento se podría clasificar a su vez, como exógeno del grupo sedimentario químico, debido a que se genera en la superficie por procesos de la geodinámica externa.

La formación está relacionada con procesos geoquímicos que se realizaron en el pasado o actualmente efectuándose sobre las zonas superficiales de la Tierra o cercanas a ella, dados a partir de la descomposición de rocas o material preexistente (Servicio Geológico Mexicano, 2017), en este caso la meteorización corresponde al cuerpo espeso de caliza que data en la literatura de la Formación Tibú- Mercedes.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Considerando que el enriquecimiento del carbonato de calcio se debe a la retención y acumulación en el suelo, y que el aporte geoquímico se da por la descomposición y erosión de las rocas calcáreas que encuentran infrayaciendo el depósito de estudio, el travertino de Málaga es producto de una mineralización supérgena por meteorización (interperismo), oxidación, descomposición de minerales y formación de nuevos minerales estables singenéticos.

No obstante, a este yacimiento se le puede añadir una clasificación basada en el aporte de CO₂, Pentecost & Viles (1944) proponen una clasificación según el origen del CO₂ involucrado en la precipitación, teniendo en cuenta que el CO₂ proviene de procesos meteóricos y que el depósito se forma en aguas frías que circulan por zonas subyacidas por carbonatos, el travertino objeto de estudio sería un travertino meteógeno.

Con todo esto, según su interés económico, se clasifica como minerales no metálicos de uso industrial según Prieto et al. (2019), pues su explotación está enfocada para su uso en la industria de la construcción, ya sea como baldosas, revestimientos, cemento e incluso en la industria siderúrgica.

Como evidencia de todo este proceso descrito, está el yacimiento del cuerpo calcáreo de travertino en la zona noreste de Málaga, Santander. En la geología a escala 1:25.000 realizada en el presente proyecto de investigación, se encontró un depósito de travertino en contacto discordante con un cuerpo espeso de caliza grisácea de la Formación Tibú-Mercedes con nomenclatura de la cuenca de Maracaibo. Dicho cuerpo de travertino en la zona de explotación a escala 1:2.000 según datos de campo, se subdividió siguiendo unas diferencias texturales determinadas en 3 tipos: travertino lodoso, travertino bioturbado y travertino cristalino.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

El travertino lodoso se presume que es el más antiguo de los 3, según el corte geológico de la **Figura 15**, este se encuentra infrayaciendo el cuerpo de travertino cristalino, litológicamente tiene más aporte clástico, la teoría señala que la formación de este tipo de travertinos no está tan relacionada con una actividad biológica relevante, pues según Pentecost (2005) la presencia de micrita en las rocas da un indicio del ambiente de formación: “Los travertinos antiguos contienen menos micrita que los travertinos modernos”. Esta litología se estableció como travertino pues concuerda con las condiciones de formación y con las características físicas del mismo.

Por correlación espacial en vista de planta y en vista de perfil, está suprayaciendo el travertino cristalino sobre el lodoso, este tipo litológico presenta una textura mucho más cristalina, un bandeamiento más continuo y diferenciado, afloramientos con un buen grado de compactación, sin embargo, gran parte de este travertino está siendo afectado por la disolución y fracturación.

Cronoestratigráficamente más reciente, está el travertino bioturbado, esta litología se está depositando sobre los cuerpos de travertino lodoso y el travertino cristalino en puntos topográficamente favorables, se infiere que es un tipo litológico más reciente pues no es tan consolidado como los otros 2 tipos de travertinos, a su vez, presenta más aporte terrígeno de tamaño lodoso y una porosidad secundaria producto de espacios y moldes de restos leñosos, raíces y hojas, este resultado se puede dar por 3 razones: que durante el proceso de lixiviación de la roca calcárea en su superficie está presente un alto contenido vegetal, que en el transporte de este fluido saturado lleve consigo estos restos y/o que esté precipitando sobre estos restos vegetales.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Económicamente, entre estos 3 cuerpos de travertino el que representa el interés principal es el travertino cristalino. Este tipo litológico se presenta en afloramientos compactos de colores beige crema predominantemente, sin embargo, en algunas zonas, puede presentar espacios porosos debido a la meteorización química a la que está expuesto, dicho porcentaje disminuía levemente a medida que se profundizaba el yacimiento (primeras terrazas de explotación).

Con el fin de describir textural y composicionalmente el travertino, en una primera instancia, mediante técnicas macroscópicas el contenido porcentual visual en muestra de mano estimado hizo posible determinar que la roca está compuesta en un alto porcentaje por carbonato de calcio (CaCO_3), ya sea a manera de lodo calcáreo microcristalino (micrita) o cemento calcáreo (esparita), según eso y basados en las clasificaciones de Folk (1974) y Dunham (1962) el travertino es una roca calcárea microcristalina micrítica con textura depositacional denominada como wackestone.

Las microfábricas dependen del ambiente de depositación y son influenciadas por las condiciones químicas y biológicas que prevalecían durante la nucleación del CaCO_3 y el crecimiento del cristal. Modificaciones posteriores (diagénesis) frecuentemente ocurren justo después de que el travertino fue depositado. Los componentes texturales más significantes del travertino son la micrita, tres formas simples de esparita y dendritas más complejas. (Pentecost, 2005).

El análisis microscópico permite entender la formación del travertino, es subsecuente con la diagénesis (historia mineralógica) y provee explicación sobre muchas de las características físicas. La correlación de la mesofábrica (muestra de mano) con la microfábrica (sección delgada) permite estudiar la porosidad y el bandeamiento (Pentecost, 2005).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Mediante análisis microscópicos complementándolos con los resultados macroscópicos y con el fin de caracterizar mineralógica y petrográficamente el yacimiento, se determinó que la muestra estaba compuesta principalmente por calcita cuyos cristales presentaban algunas líneas de crecimiento, otros tenían crecimientos radiales, también había evidencia de micritización de la calcita esparítica; Pentecost (2005) menciona que este proceso ocurre debido a que la micrita primaria se precipita alrededor de la superficie de una colonia de algas, y esta a su vez, puede estar recristalizándose en una esparita unos pocos milímetros por debajo de la superficie, o una capa de esparita puede estar en proceso de micritización por bacterias y hongos, por ende, la fábrica resultante va a ser una combinación de procesos diagenéticos primarios y secundarios.

Fue posible determinar que la precipitación de la calcita cristalina, a manera de esparita, presentaba hábitos columnares, dendríticos, granulares y aciculares. A su vez, se pudo observar bandas micríticas favorecidas por la disposición del lodo calcáreo. Las laminaciones de micrita son a menudo evidentes en los travertinos de algas, donde las capas de escala milimétrica se deben a una variación en la densidad o el color y, a menudo, están relacionadas con el crecimiento estacional de las algas (Pentecost, 2005).

Los factores ambientales más que los biológicos juegan un papel en la determinación de la microfábrica. Pentecost (2005) menciona que hay evidencia que muestra que, en general, los travertinos más antiguos contienen menos micrita que los travertinos modernos. Por ende, los cristales solo revelarán poco de su origen, pero parece que los travertinos que contienen una abundancia de micrita es más probable que se hayan asociado con la actividad biológica. Sin embargo, es importante saber que ninguno de los travertinos consiste en biofábricas "puras".

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Lo anterior se pudo comprobar y correlacionar composicionalmente con los datos dados por el análisis de Difracción de Rayos X y la Fluorescencia de Rayos X. La identificación cualitativa de fases minerales a mayor detalle de las muestras E2-1, E3-1 y E4-1, según las firmas reportadas por el difractograma, permitieron establecer determinadas fases minerales predominantes en las dos muestras, entre las cuales está el carbonato de calcio, la calcita y la sílice, adicionalmente se determinó la presencia de aragonito, óxido de hierro y aluminio, y magnesio relacionado a la calcita, los cuales no habían sido determinados en el análisis petrográfico.

En los difractogramas de las muestras se evidenció que las firmas del carbonato de calcio coincidían con las firmas de la calcita, entendiendo que la calcita es un mineral formado por carbonato de calcio, se infirió que este solapamiento es debido a que la composición mineral de la calcita coincide con el compuesto cuya firma mineral está coincidiendo.

El análisis elemental cuantitativo por Fluorescencia de Rayos X (Na-U) de estas muestras minerales, estableció unos porcentajes cuantitativos en óxidos y de elementos (geoquímico), el elemento cuya concentración predominó en las tres muestras es el calcio con un porcentaje promedio de concentración de 32,79% y el compuesto es el CaO con un porcentaje promedio de concentración de 45,88% en las muestras analizadas. A su vez, se encontraron cuantificados algunos óxidos de Magnesio (MgO), de sílice (SiO₂), de azufre (SO₃), de sodio (Na₂O), de aluminio (Al₂O₃) y de hierro (Fe₂O₃), los cuales coinciden y sus porcentajes se correlacionan con el análisis cualitativo de las firmas minerales determinadas con la técnica de Difracción de Rayos X. Todas las muestras de travertino analizadas están compuestas principalmente por polimorfos de carbonato de calcio, calcita y aragonito, variando en su porcentaje relativo, lo que es consistente con los datos obtenidos por Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X.

8. Economía y mercado del travertino

El travertino se forma por la acumulación de sedimentos de calcita disueltos en el interior de aguas termales o por el transporte y posterior depositación de estos sedimentos debido a aguas ácidas. Se caracteriza por ser un producto natural que presenta una gran durabilidad en el tiempo y posee la capacidad de adquirir brillo natural, debido a que proviene de la disolución de rocas que contienen carbonato de calcio y otros iones metálicos como el hierro (Fe^{2+}) suele tener aspecto bandeado con diversos colores que van desde amarillo, rojo, crema, café, marrón, gris, e incluso verde. Así mismo, es resistente al contacto con objetos calientes y los rayos UV. Además, no se calienta ante la intensa radiación solar y tiene la capacidad de renovar su acabado con el tiempo (Gramar, 2022).

Su estética atemporal y sus características físicas, resistente, compacto, fácil de pulir, antideslizante, hacen que el travertino sea un material de construcción sobresaliente, tanto para interiores como exteriores. La superficie del travertino es muy resistente y por ende el material presenta una alta durabilidad, es debido a ello que el travertino se ha utilizado como material para la construcción de muchas de las edificaciones de la época romana y que se conservan en la actualidad (Levantina, 2022).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Debido a su apariencia y resistencia, los yacimientos de travertino se explotan para fabricar productos de acabados para la construcción como baldosas y revestimiento para paredes, pisos y mesones, para casas, edificios y centros comerciales; así mismo, por su alto porcentaje de carbonato de calcio (CaCO_3) es bastante útil como aditivo para la fabricación de cemento; a su vez, a raíz de su dureza y que es fácil moldearlo, se puede usar para fabricar esculturas y estatuas, en la arquitectura moderna es muy utilizado para el revestimiento de fachadas (Yerly, 2015).

En el mercado existen tres grados de calidad para el travertino: premium, estándar y comercial. El Premium o Primer Grado ofrece la mayor selección de colores sin decoloración negra o gris en las baldosas de travertino, estas se eligen cuidadosamente para que tengan un color uniforme. Las baldosas se rellenan dos veces, primero con maquinaria y luego a mano si quedan agujeros. Ninguna de las baldosas de travertino de este grado tiene agujeros grandes que hayan sido rellenados, los bordes son lisos y de tamaño uniforme, estos son biselados uniformes. El Estándar o Segundo Grado brinda la segunda selección más grande de colores de baldosas de travertino sin decoloración gris o negra, se trata de que tengan un color uniforme en todo el lote (puede tener algunas venillas) y también tienen doble relleno como en el grado premium. Se permiten algunos agujeros grandes en las baldosas de travertino de grado estándar. Por último, el Comercial o Tercer Grado, en él se encuentran grandes variaciones de color dentro de la baldosa, a su vez, pequeños agujeros sin rellenar, así como pequeños defectos en el tamaño y el pulido, las baldosas se pueden entregar sin selección de color ni clasificación (Stone-mart, 2020).

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Por otra parte, existen dos tipos de baldosa de travertino, estas se crean usando diferentes métodos de corte, no usando diferentes tipos de roca de travertino. Debido a los planos de las capas inherentes a la mayoría de los travertinos, es posible lograr una apariencia diferente según el tipo de corte elegido. Los dos tipos de corte utilizados para crear baldosas de travertino son Vein Cut y Fleuri Cut. El travertino en sí es el mismo para ambos tipos de baldosas; es solo la forma del corte lo que hace que la piedra difiera en apariencia.

En 2020, el Mármol y Travertinos divididos o cortados en bloques, placas cuadradas o rectangulares, fue el producto número 1781 más comercializado en el mundo, siendo comercializado por un total de \$1,120 M de dólares. Sin embargo, entre 2019 y 2020 las exportaciones disminuyeron en un -22.0%, desde \$1,440 M a \$1,120 M de dólares, asumiendo los efectos negativos en el campo de la construcción por la pandemia del COVID-19, y el cese de toda actividad en la industria, esto dio como resultado una caída en la demanda del material e incluso en su producción, llevando consigo la reducción de su comercialización en este periodo.

El comercio de Mármol y Travertinos cortados en bloques, en placas cuadradas o rectangulares representa el 0,0067% del total de comercio mundial (OEC, 2022). En 2020, los principales exportadores fueron Turquía (\$613M) e Italia (\$115M) (**Figura 39**). De igual forma, los principales importadores fueron China (\$784M) e India (\$110M) (**Figura 39**). Colombia no presenta un valor importante como país exportador, sin embargo, el 0.19% de las importaciones totales son atribuidas a esta región, esto corresponde a la suma de \$2.18 M de dólares.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Figura 39.

Países exportadores lado izquierdo y países importadores lado derecho, El color rojo representa a Asia, el morado a Europa, el amarillo a África, verde a Sudamérica, azul a Norte América y naranja a Oceanía. Tomado de <https://oec.world/>

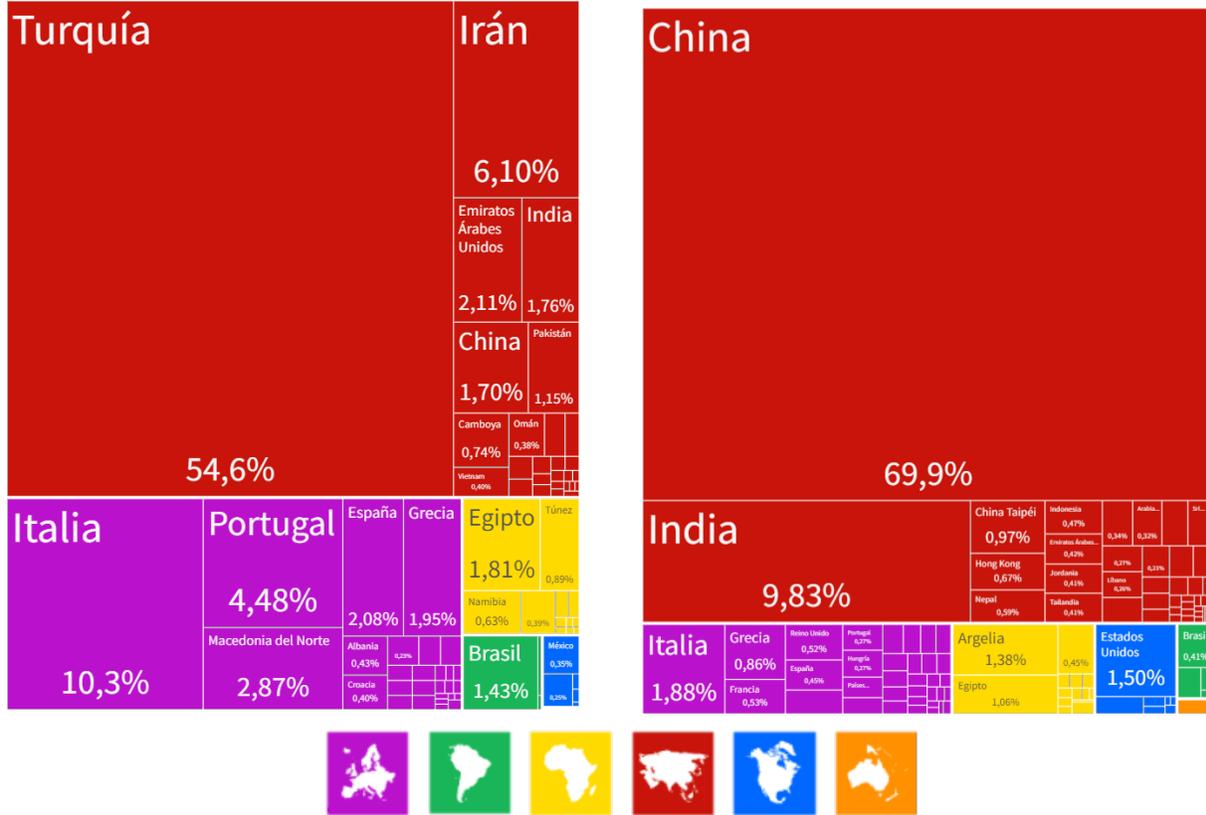


Figura 40.

Valores de exportaciones totales de Mármol y Travertino de los años 2010 a 2020. Modificado de: <https://oec.world/>



APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La **figura 40** representa la tendencia global del mercado de exportaciones de Mármol y Travertino durante el periodo comprendido entre el 2010 al 2020. Los continentes evaluados fueron Asia, Europa, África, América y Oceanía. En términos de valor, la producción de esta roca ornamental tuvo un ascenso significativo en el 2017, con un valor total de \$1,764,688,298.00 USD estimado en precios de exportación, Asia tuvo su mayor aporte en este periodo. Durante el periodo de análisis, la producción registró un patrón de tendencia con algunas fluctuaciones notables a lo largo del período analizado entre los \$1,122,615,977 USD y los \$1,764,688,298 USD alcanzando el nivel máximo con \$1,764,000,000 USD (año 2017), de los cuales los principales productores eran Turquía con un 56,5% seguido de Italia con el 10%, como mayores exportadores de la roca.

En el 2020, como resultado de la pandemia sanitaria de COVID-19, el mercado mundial de baldosas de travertino fue gravemente afectado, la disminución en el crecimiento económico en casi todos los países principales alteró los patrones de gasto de los consumidores, debido al bloqueo implementado en varios países, el transporte nacional e internacional se obstaculizó, lo que disminuyó significativamente la cadena de suministro de numerosas industrias en todo el mundo, aumentando así la brecha entre la oferta y la demanda. Esto se vio reflejado en la insuficiencia en el suministro de materia prima, interrumpiendo la tasa de producción de baldosas de travertino y, por ende, el crecimiento del mercado (Allied market research, 2022), sin embargo, a medida que los gobiernos reanudan las actividades comerciales entre las naciones importadoras y exportadoras se espera que la demanda de baldosas de travertino aumente en la industria de la construcción debido al aumento del nivel de vida y al desarrollo de la industria y la infraestructura en todo el mundo.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Resulta importante recalcar que la demanda a su vez puede depender de los usos secundarios debido a su pureza, pues los productos pueden variar desde polvos hasta baldosas. Por lo tanto, las compañías pueden comercializar a su vez cal en polvo con alto contenido de calcio en trozos, línea de alto contenido de calcio molida fina, cal hidratada con alto contenido de calcio, masilla de cal, cales especiales y demás derivados.

Por otra parte, el mercado del travertino en Colombia se da principalmente como roca ornamental, la calidad de las baldosas está dada por cada una de las empresas que lo comercializan, ya sea debido a la explotación y posterior tratamiento o a la importación de otros países.

La **figura 41** corresponde a un Benchmark en el cual se tuvo en cuenta las empresas que comercializan este material como bloques o baldosas cuadradas y rectangulares en Colombia, en esta se aprecian los precios de diferentes tamaños de baldosas con variación en los tonos y sus posibles usos.

Figura 41.

Benchmark de empresas comercializadoras de travertino en Colombia.

Empresa	Holztek	Corona	Apimar	Decorcera mica	Travercol
Muestra					
Descripción	Piedra travertino clásica	Travertino clasica	Travertino Villa de Leyva	Travertino porcelanato	Travertino Calichal
Tamaño	40 x 40 cm	41x90	placas 2 cm espesor	30x60	60x60, 20mm espesor
Color	Beige mate	Beige Multitono	Beige	Beige	Claro alizal
Costo	\$96.900,00 m ²	\$61.900 m ²	\$211.500+ iva m ²	\$124.001 m ²	\$106.148 m ²
Usos	piso, pared	piso, pared	fachadas interiores	piso y pared	piso, pared, interiores y exteriores

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

La variación en los precios está dada por diversos factores, entre ellos el espesor de las tableta, los tonos, la dimensión y principalmente la calidad, esta última varía según el travertino, un ejemplo de ello se da en la empresa Travercol, donde ofrecen travertino Calichal el cual presenta muy poca porosidad y por ende poco relleno, a su vez tiene poca variación en el color sin embargo también ofrecen travertino Primavera, este último presenta mayor cantidad de poros y también más variación en color por lo cual su costo se ve reducido. Otro factor para considerar es el desgaste que sufrirá el travertino según su uso, pues con el debido mantenimiento se previene su deterioro prolongando la vida útil del mismo.

Por otro lado, al estar compuesto en un 98% de carbonato de calcio y presentar un alto grado de pureza, el travertino puede comercializarse en otras industrias para un máximo aprovechamiento del yacimiento; debido al alto porcentaje de Carbonato de Calcio, este es de gran importancia en la industria del cemento, puesto que al combinarse con arcillas y calcinarse, da paso a la formación del Clinker, el cual al ser triturado es empacado como cemento.

Otro campo de interés para el carbonato de calcio es el siderúrgico, ya que este material tiene la capacidad de modificar la composición de los productos de las acerías para purificarlos, el óxido de calcio es utilizado para la formación de la escoria, esta acumula los desechos que se generan en la composición del acero, protegiéndolo de elementos como el nitrógeno y el hidrogeno; a su vez, la cal viva, producto de la calcinación de este material calcáreo, es utilizada en el proceso siderúrgico para captar el fosforo y el azufre del acero, disminuyendo su proporción para evitar reducción en la ductilidad del material (Calcinor, 2020).

9. Conclusiones

- El depósito de travertino en el área de Málaga, Santander, está favorecido por la presencia de la formación de carácter principalmente calcáreo Tibú-Mercedes, la cual estuvo siendo afectada por la fuente de agua ácida que también está presente en la zona.
- Las muestras de travertino son clasificadas como rocas calcáreas microcristalinas según Folk (1974) con textura depositacional wackestone según Dunham (1962).
- Los resultados de Rayos X evidenciaron que las muestras de travertino están compuestas principalmente por carbonato de calcio, lo cual, concuerda con las secciones delgadas analizadas y su alto contenido de lodo calcáreo microcristalino y de cemento calcáreo (micrita y esparita respectivamente).
- Por medio del trabajo de campo realizado junto con los análisis de laboratorio, se define la formación de este cuerpo de travertino como un proceso supérgeno meteógeno, donde la principal causa de formación es el aporte de material transportado por una fuente de agua acida que se sobresatura en carbonato de calcio y que posteriormente lo precipita.
- Como uso principal, debido a las características físicas, color y bandeamiento, el travertino puede ser usado para la fabricación de pisos y fachadas.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

- Teniendo en cuenta el alto porcentaje de Carbonato de Calcio (CaCO_3) presente en el yacimiento, este puede servir como corrector en mezclas y a su vez, para procesos siderúrgicos, teniendo en cuenta que esta roca derretida purifica el hierro y actúa como fundente absorbiendo el azufre, fósforo e impurezas.
- Así mismo, el travertino que no sea aprovechable a causa de la fracturación o disolución que muchas veces se presenta y no permite un corte ideal para baldosas, se puede usar a manera de material de construcción, sus derivados son de gran utilidad para una variedad de industrias, entre ellas, la agricultura y la medicina, etc.

10. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio estructural para entender la dinámica del basculamiento y el espacio de depositación que permitió la precipitación y acumulación que dio origen a la formación del yacimiento de travertino.

Se sugiere también realizar datación de carbono en cada uno de los subtipos de travertino para entender de forma precisa la edad de este tipo de depósitos cuaternarios y su relación con la roca fuente de aporte.

Teniendo en cuenta las diferentes fuentes de acidificación del suelo, subsuelo y las fuentes hídricas, resultaría relevante un estudio del flujo hídrico ácido de la zona y su capacidad de remoción y transporte, debido a que el proceso de formación es cíclico, pues se podría estimar el potencial de lixiviación y precipitación del depósito en la zona.

Al proceso de formación del travertino resultaría útil añadirle un estudio de la actividad biológica con el fin de establecer una mejor relación del contenido micrítico en el travertino dependiendo de las condiciones del ambiente biológico en el que se formó.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER

Referencias bibliográficas

Acosta, C. E. (1960). Estratigrafía de García Rovira. *Boletín de Geología* .

Allied market research. (2022). Obtenido de <https://www.alliedmarketresearch.com/travertine-market-A09674>

Azpeleta, S. (2014). *Laboratorio de Técnicas Instrumentales UVa*. Obtenido de <https://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectrometra-de-fluorescencia-de-rayos-x>

Binkley D, Richter DD. 1987. Nutrient cycles and H⁺ budgets of forest ecosystems. *Advances in Ecological Research* 16: 1 – 51.

Buduba, C. (2006). *Modificaciones en el pH y contenido de materia orgánica en suelos del ecotono estepa / bosque andino patagónico por implantación de pino ponderosa* . Buenos Aires.

Caballero, V., & Sierra, H. (1991). *Estratigrafía del Cretácico en el área de San Andrés Santander*. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.

Calcinor. (2020). Obtenido de <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/cal-siderurgia-procesos>

CAMPBELL, C. (1965). The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting.

Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental: Servicio Geológico Nacional (Colombia). *Boletín Geológico*.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER

Cruz, L. E., & Caballero, V. M. (2007). *Guía para la descripción y clasificación de rocas sedimentarias calcáreas*.

Dunham, R. J. (1962). *Clasificación de las rocas carbonatadas según la textura depositacional*.

Espectrometría. (20 de Octubre de 2020). Obtenido de [https://espectrometría.com.mx/que-es-la-difraccion-de-rayos-x-xrd-y-por-que-es-tan-importante-para-la-industria/#:~:text=La%20difracci%C3%B3n%20de%20rayos%20X%20\(XRD\)%20es%20una%20herramienta%20anal%C3%ADtica,interat%C3%B3mico%20dentro%20de%20un%20cristal](https://espectrometría.com.mx/que-es-la-difraccion-de-rayos-x-xrd-y-por-que-es-tan-importante-para-la-industria/#:~:text=La%20difracci%C3%B3n%20de%20rayos%20X%20(XRD)%20es%20una%20herramienta%20anal%C3%ADtica,interat%C3%B3mico%20dentro%20de%20un%20cristal)

Etayo, F., Renzoni, G., & Barrero, D. (1969). *Contornos sucesivos del mar Cretáceo en Colombia*. INGEOMINAS, Bogotá.: Memoria Primer Congreso Colombiano de Geología.

Fabre, A. (1981). Estratigrafía de la Sierra Nevada del Cocuy. *Geología Norandina*, 4.

Folk, R. (1962). Spectral subdivision of limestone types. *American Association of Petroleum Geologists*.

Folk, R. L. (1974). Petrology of carbonate rocks. En R. L. Folk, *Petrology of carbonate rocks* (págs. 159 – 182).

Folk, R., Chafetz, H., & Tiezzi, P. (1985). Formas extrañas de calcita deposicional y diagenética en travertinos de aguas termales, en carbonatos de cemento.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER

- Garner, A. H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of the geological formations in Venezuela: Petroleum development and technology in 1925. *Symposiums of the Petroleum Division/American Institute of Mining and Metallurgical Engineers.*
- Gramar. (2022). Obtenido de <https://www.gramar.com/piedras-naturales-travertino/#:~:text=El%20travertino%20se%20forma%20por,capacidad%20de%20adquirir%20brillo%20natural>
- Hass, O. (1960). Lower Cretaceous ammonites from Colombia, South America. . *American Museum novitates.*
- Hedberg, H. (1931). Standard stratigraphic section of the Department of Santander, Colombia (inérito). *Venezuela Gulf Oil Company.*
- Hedberg, H., & Sass, L. (1937). Synopsis of the geologic formations of the western part of the Maracaibo Basin, Venezuela. *Boletín de Geología y Minas (Venezuela).*
- Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogotá. *Pettermanns Mitt.*
- HOLMES, A. (1929) "The nomenclatura of petrology: a dictionary of rock names" 2 el. ed. Thomas Murby and Co. London.
- Intermarmol. (2017). Obtenido de <https://www.grupointermarmol.com/travertinos/>
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2003. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry* 64: 205 – 229.
- Julivert, M. (1960). Geología de la región occidental de García Rovira (Cordillera Oriental de Colombia). *Boletin de Geologia.*

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Julivert, M. (1961). Geología de la Vertiente oeste de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga. *Boletín de Geología*.

Kempenaers, L. (7 de Enero de 2020). *Malvern Panalytical* . Obtenido de <https://www.materials-talks.com/the-basics-of-elemental-analysis-with-xrf-qa/>

Levantina. (2022). Obtenido de <https://www.levantina.com/es/producto/travertino/ventajas>

Lifeder. (01 de Abril de 2022). Obtenido de Bicarbonato de calcio. Lifeder: <https://www.lifeder.com/bicarbonato-de-calcio/>

López, J. (1996). Manual de rocas ornamentales.

Maldonado, Y. (1 de Enero de 2018). *Geología web*. Obtenido de https://geologiaweb.com/rocas/travertino/#Minerales_asociados

Michaud, D. (13 de Septiembre de 2015). *911 Metallurgist*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/blog/difference-between-xrf-and-xrd#:~:text=In%20summary%2C%20the%20difference%20between,as%20well%20as%20identify%20phases>

Mingarro, E. (1964). Consideraciones sobre la génesis de los yacimientos uraníferos. I. Madrid.

Morales, L. G., Podesta, D. J., Hatfield, W. C., Tanner, H., Jones, S. H., Barker, M. H., . . . Goss, C. R. (1958). General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat od Oil . *American Association of Petroleum Geologists* .

Mota, A. (2011). UGR. Obtenido de <https://www.ugr.es/~mota/>

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER

- Mussini E, Crespo G, Bianco H. 1984. Evolución de la materia orgánica de la Provincia del Neuquén. *Ciencia del Suelo* 2: 53 – 60.
- Noble AD, Little IP, Randall PJ. 1999. The influence of *Pinus radiata*, *Quercus suber*, and improved pasture on soil chemical properties. *Aust. J. Soil Res.* 37: 509 – 526.
- Notestein, F., Hubman, C., & Bowler, J. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Bulletin of the Geological Society of America*.
- OEC. (2022). Obtenido de Observatorio de Complejidad Económica:
<https://oec.world/es/profile/hs92/marble-and-travertine-in-blocks-etc>
- Pentecost, A. (1995). The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor. *Quaternary Science Reviews*.
- Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer Science & Business Media.
- Pentecost, A., & Viles, H. (1944). A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*.
- Prieto, G., Guatame, C. L., & Cárdenas, S. C. (2019). Recursos minerales de Colombia. *Servicio Geológico Colombiano, 1*.
- Raasveldt, H. (1956). Fallas de rumbo en el nordeste de Colombia.
- Restrepo, J. (2010). *PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA ILB-08031- MINA DE TRAVERTINO MÁLAGA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER*. Instituto Colombiano de Antropología e Historia.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN
MÁLAGA, SANTANDER

- Richards, H. (1968). Cretaceous section in Barco area of Northeastern Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*.
- ROD, R. (1956). Strike-slip faults of northern Venezuela.
- Salvador, R. (1961). *Guidebook to the Geology of Northeastern Trujillo*. Caracas.
- Sandoval, J., & Sanjuán, S. (2020). *INFORME SOBRE RESERVAS A EXPLOTAR EN EL ÁREA DEL TÍTULO MINERO ILB-08031, UBICADO EN EL MUNICIPIO DE MÁLAGA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER*. Travercol.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *La caliza en Colombia: geologías, recursos, calidad y potencial*. Bogotá: Publicaciones geológicas especiales.
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Clasificacion-de-yacimientos-minerales.html
- SGS . (2022). Obtenido de <https://www.sgs.co/es-es/mining/metallurgy-and-process-design/high-definition-mineralogy/x-ray-diffraction-xrd>
- Sievers, W. (1888). Die cordillera von Merida, nebst bemerkungen uber das karbische gebirge. *Geographische Abhandlungen*.
- Smirnov, V. I. (1976). *Geology of mineral deposits*. Mir Publishers
- Stone-mart*. (2020). Obtenido de <https://www.stone-mart.com/blogs/types-and-grades-of-stone-mart-travertine-tile/>
- Sutton, F. (1946). Geology of Maracaibo Basin. *American Association of Petroleum Geologists*.

APORTE A LA CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO DE TRAVERTINO EN MÁLAGA, SANTANDER

Transparency market research. (2022). Obtenido de

<https://www.transparencymarketresearch.com/travertine-market.html>

Urrego B. 1997. La reforestación con coníferas y sus efectos sobre la acidificación, podsolización y pérdida de fertilidad de los suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. INPOFOS 28: 6 – 12.

Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., & Téllez, N. (1976). Geología de la plancha 136 Málaga. Escala 1:100 000. *INGEOMINAS*. Bogotá.

Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., & Téllez, N. (1981). GEOLOGÍA DE LAS PLANCHAS 136 MÁLAGA Y 152 SOATÁ, CUADRÁNGULO I-13. *Boletín Geológico INGEOMINAS*.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., & Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. . *Boletín Geológico*, 1-134.

Yerly, R. (18 de Junio de 2015). *Thermo Fisher Scientific*. Obtenido de

<https://www.thermofisher.com/blog/mining/better-together-xrf-and-xrd/>

Young, G. e. (1956). Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos. *Boletín de Geología*.