



**ESTRATIGRAFÍA, QUIMIOESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA DE LA
FORMACIÓN ROSABLANCA: IMPLICACIONES PARA LA IDENTIFICACIÓN
DE EVENTOS ANÓXICOS OCEÁNICOS EN LA CORDILLERA ORIENTAL
COLOMBIANA**

CAROLINA BEDOYA RUEDA

HEFER EMILEC NOMESQUI ORTIZ

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

2013



**ESTRATIGRAFÍA, QUIMIOESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA DE LA
FORMACIÓN ROSABLANCA: IMPLICACIONES PARA LA IDENTIFICACIÓN
DE EVENTOS ANÓXICOS OCEÁNICOS EN LA CORDILLERA ORIENTAL
COLOMBIANA**

CAROLINA BEDOYA RUEDA

HEFER EMILEC NOMESQUI ORTIZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Geólogos**

Director

PhD. JUAN CARLOS SILVA TAMAYO

Asesor

PhD. ANDRÉS PARDO TRUJILLO

UNIVERSIDAD DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA DE GEOLOGÍA

MANIZALES

2013



NOTA DE ACEPTACIÓN

Director trabajo de grado
Manizales, Noviembre de 2013



“La muerte es solo un concepto. Reinterpretalo. Dale un sentido más mágico. Acepta la desaparición hacia una transformación” C. N

En memoria de Luz Alba Ortiz, Daniel Nomesqui y Edith Nomesqui, por siempre en mi mente.

Hefer

“Somos del mismo material del que se tejen los sueños” W.S
A mis padres y hermano por acompañarme durante todo este camino en busca de mis sueños y por compartir conmigo este gran sueño que hoy se hace realidad.

Carolina



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios y a nuestras familias, por su apoyo incondicional, por acompañarnos en este proceso de formación para nuestra vida y por su esfuerzo realizado para ayudarnos a cumplir nuestros sueños ¡gracias infinitas!

A nuestro director de tesis, el geólogo y profesor Ph.D Juan Carlos Silva-Tamayo por sus valiosas enseñanzas, confianza, amistad, paciencia y por las sugerencias brindadas durante todo el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos al geólogo y asesor Ph.D Andrés Pardo Trujillo por su colaboración y asesoría en la realización del trabajo, además agradecemos al Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas por permitirnos desarrollar el trabajo en sus respectivos laboratorios.

Agradecemos al Profesor Alcides N. Sial de la Universidad Federal de Pernambuco (Brasil) por permitirnos realizar los análisis geoquímicos de isótopos de C y O.

Especial agradecimiento a la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, la Corporación Geológica Ares y el fondo en común *Ares-ACGGP Corrigan*, por el apoyo económico para desarrollar este proyecto.

A la Fundación ProAves, por permitirnos acceder a sus predios para realizar la etapa de campo en el área de Zapatoca (Santander).

A el señor Roque Acevedo, su familia y trabajadores, en la zona rural de Zapatoca, por acogernos en su casa, durante los días de campo.

A los geólogos Raúl Trejos, Sebastián Rosero y Andrés Díaz, por la colaboración durante la fase de campo.

A todos nuestros profesores de la Universidad de Caldas – departamento de Geología, por transmitirnos todo su conocimiento y guiarnos durante todo el proceso de aprendizaje en la carrera.

También agradecemos a todos nuestros amigos y compañeros que compartieron con nosotros valiosas experiencias en especial a:



Juanfe, Dianita, José, Camilo, Cristian David, Pablo, Nata Ocampo, Marce Montealegre, Cata, Aleja, Marce Castañeda, Moni Zamudio, Jenny Grisales, Kate Galvis, Luisa Jara, Julián Beta, Raúl, Luisa Cárdenas, Marce Amaya, Dani O, Anita Salazar, Manu Tabares, Leidy Rojas.

A todo el personal del IIES y la Universidad de Caldas, Valentina Vargas, María Dolly, Juan Pablo, Rubén y Lina Marcela Cuervo por toda la colaboración durante este proceso.



RESUMEN

Los océanos globales del Cretácico inferior fueron afectados por varios periodos de baja oxigenación oceánica. Estos periodos, conocidos como eventos anóxicos oceánicos (OAE), afectaron el ciclo del carbono global, lo cual se ve reflejado en anomalías isotópicas de Carbono en registros inorgánicos (carbonatos) y de carbón orgánico de sucesiones marinas a nivel mundial. La ocurrencia de sedimentos oceánicos depositados durante los OAE's puede representar, por tanto, la ocurrencia de importantes rocas generadoras de petróleo y gas y ser de gran interés en la prospectiva de hidrocarburos no convencionales.

La Formación Rosablanca es una sucesión de rocas sedimentarias carbonáticas, la cual habría registrado las primeras incursiones marinas del mar Cretácico en el nororiente colombiano. La falta de cuadros cronostratigráficos de alta resolución no ha permitido arribar a un consenso en la edad de la Formación Rosablanca. Esto no ha permitido determinar de forma precisa la incursión del océano Cretácico en el nororiente Colombiano, ni tampoco cuantificar la presencia y preservación de los OAEs en dicha zona.

En este trabajo se presenta la quimioestratigrafía de isotopos de C, O y Sr en carbonatos de la Formación Rosablanca en el sector de La Mesa de Los Santos y Zapatoca. Los análisis quimioestratigráficos permitieron determinar una edad Valanginiano – Aptiano inferior para la Formación Rosablanca. Importantes variaciones en las composiciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ en carbonatos, junto con sus valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permitieron identificar la ocurrencia de los eventos anóxicos oceánicos Weissert, Faraoni y Selly.

Los análisis estratigráficos y petrográficos realizados permiten sugerir un ambiente de sedimentación asociado a una plataforma carbonatada epírica de poca profundidad la cual estaba siendo afectada por una fuerte subsidencia lo que le permitió acumular gran cantidad de material carbonático. Los procesos



diagenéticos presentes en las secciones tales como silicificación, compactación (química y física), cementación, sugieren que las sucesiones carbonáticas de la Formación Rosablanca registraron 3 fases diagnéticas (eodiagénesis, mesodiagénesis y telodiagénesis). Los análisis petrográficos permitieron determinar que la porosidad para la Formación Rosablanca se encuentra en un bajo porcentaje y se asocia a porosidad secundaria y fracturas.

Palabras claves: Quimioestratigrafía, Petrografía, Diagénesis, Eventos Anóxicos Oceánicos, Formación Rosablanca.



ABSTRACT

The Cretaceous global oceans were affected by several periods of low Ocean oxygenation. These periods, known as oceanic anoxic events (OAE), affected the global marine carbon cycle; something that is reflected by isotopic anomalies records inorganic carbon and organic carbon in marine successions around the world. The occurrence of ocean sediments deposited during the OAE's can, therefore, represent the occurrence of major source rocks for oil and gas, and thus important non-conventional hydrocarbon prospectus.

The Rosablanca Formation is a sequence of carbonate sedimentary rocks, which would have registered the first marine incursions of the Cretaceous sea in the Northeast Colombian. The lack of a precise high-resolution chronostratigraphic framework for this formation has not allowed reaching a consensus on the age of the Rosablanca Formation. The lack of a precise chronostratigraphic framework has not allowed accurately determining the incursion of the Cretaceous Ocean along northeastern of Colombia. It has also made difficult investigating and quantifying the occurrence of the Cretaceous OAEs along this area.

In this work we present the C, O and Sr isotope chemostratigraphy in carbonates from Rosablanca Formation cropping out along La Mesa de Los Santos and Zapatoca, northeastern Colombia. The chemostratigraphic analyses allowed to determine an age Valanginian - Lower Aptian. Important variations in the isotopic compositions of $\delta^{13}\text{C}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values in carbonates allowed identifying the occurrence of the Weissert, Faraoni and Selly OAEs.

Stratigraphic and petrographic analyzes a deposition of the studied carbonates along an epic shallow marine carbonate platform which was being affected by a strong subsidence, something that allowed the accumulation of thick carbonate successions. The paragenetic/petrographic analysis allowed identifying diagenetic



processes such as silicification, compaction (chemistry and physics) and spary cementation. This suggests that carbonate successions from Rosablanca Formation recorded three phases of diagenesis (eogenesis, mesogenesis y telogenesis). Petrographic analyzes have revealed that the porosity for Rosablanca Formation is in a low percentage and is associated with secondary porosity and fractures.

Key words: Chemostratigraphy, Petrography, Diagenesis, oceanic anoxic events, Formation Rosablanca.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. LOCALIZACIÓN	4
4. MARCO GEOLÓGICO	6
4.1. Estratigrafía	6
4.1.1. Jurásico.....	6
4.1.2. Cretácico.....	7
4.2. Marco tectónico y estructural	9
4.2.1. Fallas.....	10
4.2.2. Pliegues	11
5. MÉTODOS	13
5.1. Fase de campo	13
5.2. Fase de laboratorio.....	14
5.2.1. Elaboración y análisis de secciones delgadas:	14
5.2.2. Geoquímica isotópica:.....	15
5.3. Fase Final	16
6. QUIMIOESTRATIGRAFÍA ISOTÓPICA	18
6.1. Estudio isotópico.....	18
6.2. Isótopos de Oxígeno.....	18
6.3. Isótopos de Carbono.....	19
6.4. Isótopo de Estroncio	20
7. RESULTADOS	23
7.1. Descripción estratigráfica de campo	23
7.1.1. Segmento Inferior	23
7.1.1.1. Sección La Cascada:	23
7.1.1.2. Sección Quebrada Lagunetas:.....	24



7.1.2.	Segmento Medio	25
7.1.2.1.	Sección Quebrada El Gachal:	25
7.1.3.	Segmento Superior	25
7.1.3.1.	Sección Finca Aguada:	25
7.2.	Petrografía	31
7.2.1.	Sección La Cascada	31
7.2.2.	Sección Quebrada Lagunetas	32
7.2.3.	Sección Finca Aguada	33
	Quimioestratigrafía	40
7.3.		40
7.3.1.	Quimioestratigrafía de isótopos estables de Carbono y Oxígeno	40
7.3.2.	Quimioestratigrafía de isótopos de estroncio	44
8.	INTERPRETACIÓN	47
8.1.	Paragénesis de carbonatos	47
8.1.1.	Ambiente sedimentario de la sección estudiada	47
8.2.	Quimioestratigrafía	50
8.2.1.	Edad	50
8.3.	Identificación del evento anóxico oceánico del Cretácico Inferior (Weissert)	51
8.4.	Diagénesis	56
9.	CONCLUSIONES	60
10.	RECOMENDACIONES	61
11.	BIBLIOGRAFIA	62
	ANEXOS	67



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE LOCALIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO, ZAPATOCA Y MESA DE LOS SANTOS, TOMADO Y MODIFICADO DEL MAPA DE INGEOMINAS PLANCHA 120.	5
FIGURA 2. CUADRO CRONOESTRATIGRÁFICO DE LA CORDILLERA ORIENTA Y DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA PARA EL CRETÁCICO. TOMADO Y MODIFICADO DE COOPER ET AL., 1995	9
FIGURA 3. MAPA DE LA ZONA DE ESTUDIO DONDE SE OBSERVAN LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS QUE AFECTAN EL ÁREA.	12
FIGURA 4 METODOLOGÍA DESARROLLADA DURANTE EL PROYECTO.	13
FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DE ROCAS CARBONÁTICAS SEGÚN DUNHAN 1962, TOMADO DE HTTP://PENDIENTEDEMIGRACION.UCM.ES/INFO/PETROSED/RC/CLA/	15
FIGURA 6. CURVA DE VARIACIÓN MUNDIAL DE ISÓTOPOS DE OXÍGENO, DURANTE EL FANEROZOICO. TOMADO DE PRICE ET AL, 2013.	19
FIGURA 7. CURVA DE VARIACIÓN MUNDIAL DE ISÓTOPOS DE CARBONO, DURANTE EL CRETÁCICO.	20
FIGURA 8. CURVA DE VARIACIÓN MUNDIAL DE ISÓTOPOS DE ESTRONCIO, DURANTE EL PRECÁMBRICO Y FANEROZOICO. TOMADO DE THE GEOLOGIC TIME SCALE 2012, J.M. MCARTHUR, R.J. HOWARTH AND G.A. SHIELDS.....	21
FIGURA 9. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FM. ROSABLANCA EN EL SEGMENTO INFERIOR, SECCIÓN LA CASCADA.	27
FIGURA 10. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FM. ROSABLANCA EN EL SEGMENTO INFERIOR, SECCIÓN QUEBRADA LAGUNETAS, EN LA CUAL SE PUEDEN OBSERVAR ALGUNAS DE LAS MUESTRAS DESCRITAS EN CAMPO; DE TECHO A BASE: (A) MUDSTONE CON BIVALVOS, (B) SHALE MARGOSO, (C) MUDSTONE, (D) MUDSTONE LAMINADO.	28
FIGURA 11. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FM. ROSABLANCA EN EL SEGMENTO MEDIO, SECCIÓN, QUEBRADA EL GACHAL, EN LA CUAL SE PUEDEN OBSERVAR ALGUNAS DE LAS MUESTRAS DESCRITAS EN CAMPO; DE TECHO A BASE: (A) MUDSTONE MASIVO, (B) WACKESTONE CON GASTERÓPODOS Y BIVALVOS, (C) WACKESTONE, (D) MUDSTONE CON EQUINODERMOS.....	29
FIGURA 12. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FM. ROSABLANCA EN EL SEGMENTO SUPERIOR, SECCIÓN FINCA AGUADA, EN LA CUAL SE PUEDEN OBSERVAR ALGUNAS DE LAS MUESTRAS DESCRITAS EN CAMPO; DE TECHO A BASE: (A) MUDSTONE CON BIVALVOS, SE OBSERVA UNA VALVA DE TRIGONIA, (B) GRAINSTONE QUE PRESENTA	



METEORIZACIÓN CON BIOCLASTOS DE CUCULAE Y OSTREIDOS, (C) GRAINSTONE COMPACTO CON CONCHAS DE BIVALVOS.	30
FIGURA 13. CONTEOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS PETROGRÁFICOS, PARA LA SECCIÓN LA CASCADA.....	34
FIGURA 14. CONTEOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS PETROGRÁFICOS, PARA LA SECCIÓN QUEBRADA LAGUNETAS.....	35
FIGURA 15. CONTEOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS PETROGRÁFICOS, PARA LA SECCIÓN FINCA AGUADA.	36
FIGURA 16. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y ALGUNOS ALOQUÍMICOS REPRESENTATIVOS.....	37
FIGURA 17. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y ALGUNOS ALOQUÍMICOS REPRESENTATIVOS.....	38
FIGURA 18. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS Y ALGUNOS ALOQUÍMICOS REPRESENTATIVOS.....	39
FIGURA 19. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA, SEGMENTO INFERIOR, SECCIÓN LA CASCADA CON DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS DE C Y O.....	41
FIGURA 20. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA, SEGMENTO INFERIOR, SECCIÓN QUEBRADA LAGUNETAS CON DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS DE C Y O	42
FIGURA 21. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA, SEGMENTO SUPERIOR, SECCIÓN FINCA AGUADA CON DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS DE C Y O.....	43
FIGURA 22. GRAFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, PARA LA SECCIÓN QUEBRADA LAGUNETAS.....	45
FIGURA 23. GRAFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, PARA LA SECCIÓN FINCA AGUADA.	46
FIGURA 24. CORRELACIÓN QUIMIOESTRATIGRÁFICA DE LAS SECCIONES DEL SEGMENTO INFERIOR (SECCIÓN LA CASCADA A LA IZQUIERDA, SECCIÓN QUEBRADA LAGUNETAS A LA DERECHA), SE PUEDE OBSERVAR QUE HAY UNA CORRELACIÓN DE LOS VALORES ISOTÓPICOS Y LOS CICLOS ESTRATIGRÁFICOS.....	48
FIGURA 25. (A) MAPA PALEOGEOGRÁFICO PARA EL MAR EPÍRICO DONDE SE DEPOSITÓ LA FORMACIÓN ROSABLANCA. TOMADO Y MODIFICADO DE MORENO- SÁNCHEZ., PARDO-TRUJILLO.2003. (B) INTERPRETACIÓN DEL MODELO AMBIENTAL PARA LA SEDIMENTACIÓN HACÍA LA BASE DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA.(1) ZONAS DE ALTA ENERGÍA, EN UN ALTO DE BASAMENTO DENTRO DE LA CUENCA Y (2) ZONAS DE BAJA	



ENERGÍA, MAYOR PROFUNDIDAD DE LA PLATAFORMA EPÍRICA ASOCIADO A UNA ALTA SUBSIDENCIA, (3), ZONAS DE ALTA ENERGÍA CERCA DE LA LÍNEA DE COSTA.	49
FIGURA 26. COMPENDIO DE EDADES DADAS POR DIFERENTES AUTORES PARA LA FORMACIÓN ROSABLANCA EN LA ZONA DE ZAPATOCA Y MESAS.	50
FIGURA 27. REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES ISOTÓPICOS DE SR DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA EN RELACIÓN CON EL COMPORTAMIENTO DE LOS ISÓTOPOS DE SR EN EL AGUA DE MAR DURANTE EL CRETÁCICO.	51
FIGURA 28. IDENTIFICACIÓN DE LOS EVENTOS ANÓXICOS OCEÁNICOS REGISTRADOS EN LAS ROCAS CARBONÁTICAS DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA.	55
FIGURA 29. PRINCIPALES PROCESOS DIAGENÉTICOS OBSERVADOS EN LAS ROCAS DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA. (A) DOLOMITIZACIÓN, (B) PROCESOS DE BIOTURBACIÓN EN LA DIAGÉNESIS TEMPRANA, (C) SUPERFICIES ESTILOLÍTICAS, (D) COMPACTACIÓN MECÁNICA DE LA ROCA, (E) POROSIDAD VUGULAR ASOCIADA A DISOLUCIÓN, (F) FRACTURAS RELLENAS POR ESPARITA.	59
FIGURA 30. INTERPRETACIÓN DIAGENÉTICA DE LAS SUCESIONES CARBONÁTICAS DE LA FORMACIÓN ROSABLANCA.	59



LISTA DE TABLAS

TABLA 1. NOMENCLATURA EMPLEADA, PARA DESTACAR LAS CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE	31
TABLA 2. DATOS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS DE CARBONO Y OXÍGENO DE LAS	40
TABLA 3. DATOS QUIMIOESTRATIGRÁFICOS DE ISÓTOPOS DE ESTRONCIO DE LAS	44



LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: PETROGRAFIA

ANEXO 2: CORRELACIÓN DE EVENTOS ANOXICOS OCEANICOS Y EDAD POR EL METODO DE ISOTOPIA DE Sr

ANEXO 3: MAPA GEOLOGICO SECTOR ZAPATOCA Y LA MESA DE LOS SANTOS CON LA UBICACIÓN DE LAS SECCIONES ESTRATIGRAFICAS LEVANTADAS.



1. INTRODUCCIÓN

Al noreste de Colombia en el departamento de Santander ubicado en la Cordillera Oriental, sobre el cañón del Río Sogamoso, aflora una sucesión de rocas carbonáticas conocidas como la Formación Rosablanca. Esta unidad de origen marino reposa concordantemente sobre la Formación Los Santos de edad Berriasiano (Cediel, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985) e infrayace shales negros ligeramente calcáreos de edad Barremiano-Aptiano (Morales *et al.*, 1958) de la Formación Paja.

A pesar de los estudios realizados, la edad de depositación de la Formación Rosablanca no está bien definida. Estudios bioestratigráficos que involucran amonitas sugieren edades Valanginiano-Hauteriviano inferior (Etayo en Guzmán 1985), Hauteriviano - Barremiano (Morales *et al.*, 1958) y límite con la suprayacente Formación Paja, Barremiano medio y superior – Aptiano inferior (Gaona *et al.*, 2013).

La quimioestratigrafía de isótopos estables (C, O y Sr) ha sido ampliamente utilizada no solo para determinar la edad de depositación de sucesiones carbonáticas, sino también para determinar la ocurrencia de eventos anóxicos oceánicos a nivel global (Fölmli., 2011; Hu *et al.*, 2012). Durante el Cretácico inferior se presentaron importantes perturbaciones en el ciclo del carbono asociadas a eventos anóxicos (Weissert, Faraoni, Tally y Selly). Este proyecto de investigación tiene como enfoque restringir la cronoestratigrafía de la Formación Rosablanca en los sectores de la Mesa de Los Santos y Zapatoca, a partir de quimioestratigrafía de isótopos de C y Sr. La quimioestratigrafía de C y Sr permitirá determinar la posible ocurrencia de alguno de los eventos anóxicos cretácicos en las sucesiones carbonáticas de la Formación Rosablanca.



Análisis petrográficos fueron realizados con el objetivo de mejorar la caracterización estratigráfica y ambiental de la Formación Rosablanca; así mismo para evaluar la historia diagenética de los carbonatos.



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Realizar una caracterización petrográfica, diagenética y geoquímica de las rocas carbonáticas pertenecientes a la Formación Rosablanca.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar estratigráficamente la Formación Rosablanca en el sector de la Mesa de los Santos y el municipio de Zapatoca, Santander.
- Realizar la caracterización paragenética y diagenética de los carbonatos de la Formación Rosablanca a partir de análisis petrográficos estándar.
- Realizar geoquímica isotópica de C, O y Sr para la datación de las rocas de la Formación Rosablanca en el sector de la Mesa de los Santos y el municipio de Zapatoca.
- Utilización de Isótopos de C y Sr para mejorar la cronoestratigrafía de la Formación Rosablanca y cuantificar la ocurrencia de los eventos anóxicos registrados durante el Cretácico inferior en el sector de la Mesa de los Santos y el municipio de Zapatoca.

3. LOCALIZACIÓN

Las sucesiones carbonáticas de la Formación Rosablanca; objeto de este estudio, afloran sobre el cañón del río Sogamoso al noreste de Colombia en el departamento de Santander ubicado en la Cordillera Oriental.

Las columnas estratigráficas estudiadas se localizan en la Mesa de Los Santos y en la zona rural del municipio de Zapatoca. Estas columnas se realizaron cerca de la mina el Toro (Mesa de Los Santos) y en la quebrada Lagunetas, quebrada el Gachal y cerca de la finca Aguada; zona rural del municipio de Zapatoca (**Figura1**).

Para acceder a la sección La Cascada, se llega desde el Municipio de la Mesa de Los Santos, aproximadamente a 8 kilómetros desde la cabecera municipal, en dirección SW hacia la Mina el Toro. La sección se encuentra ubicada en las coordenadas planas origen Bogotá (1975); X: 1098020.918 y Y: 1240604.226. Para las secciones descritas en el municipio de Zapatoca, se accede por la vereda El Carrizal, 2 Km en dirección al Río Sogamoso, desde el Pico la Vieja. La sección Quebrada Lagunetas se encuentra en los predios de la Fundación Proaves en las coordenadas X:1097293.192 y Y:1244261.182. La sección Quebrada el Gachal se ubica cerca de la finca la Cimarronera en las coordenadas X:1098490.844 y Y:1247356.968. Por último la sección Finca Aguada, se localiza en los predios de la finca de la cual se deriva su nombre, en las coordenadas X: 1098960.126 y Y: 1248490.322.

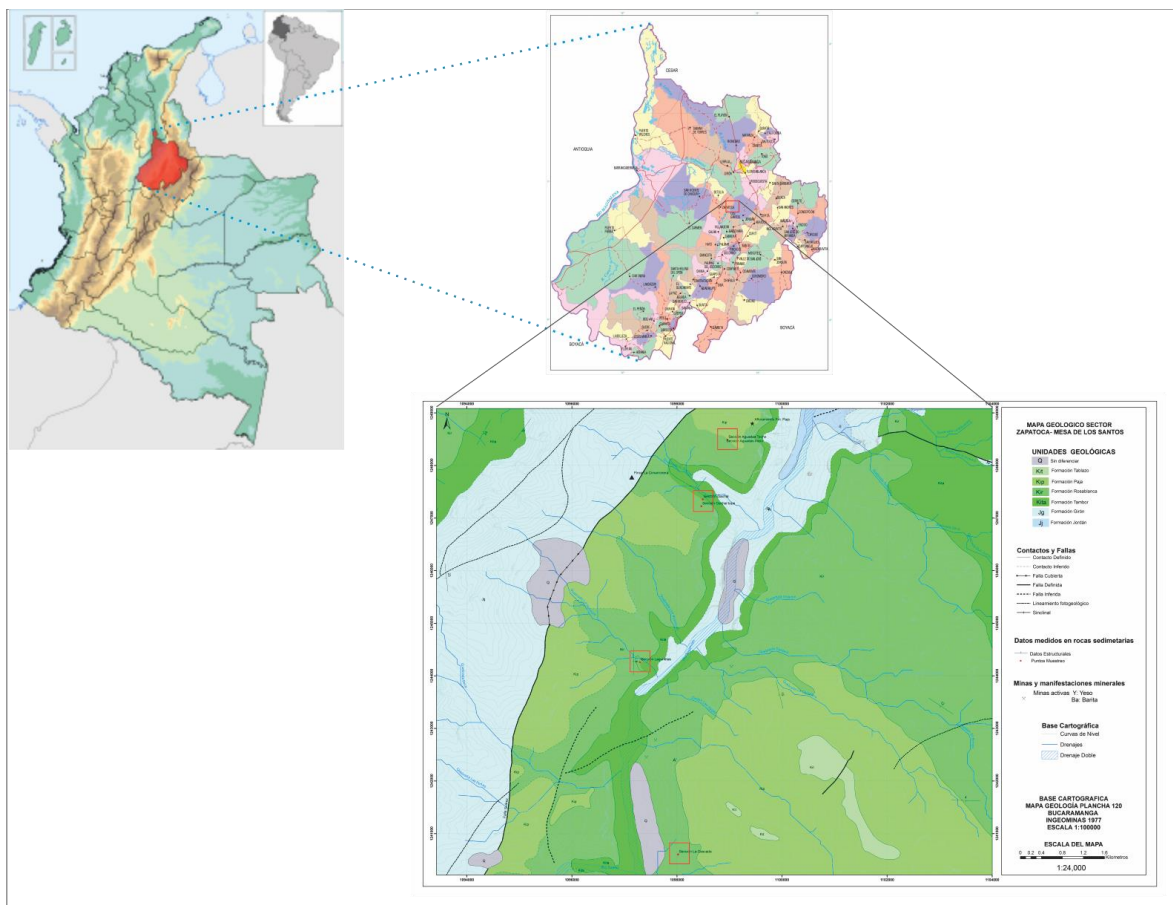


Figura 1. Mapa de localización zona de estudio, Zapatocha y Mesa de los Santos, Tomado y modificado del mapa de Ingeominas plancha 120.

4. MARCO GEOLÓGICO

4.1. Estratigrafía

4.1.1. Jurásico

4.1.1.1. Formación Jordán

La Formación Jordán fue descrita a 1 kilómetro del pueblo de Jordán donde se describe 2 facies litológicas. Las capas inferiores con espesores de 100 metros aproximadamente están compuestas por arenitas de grano grueso de color gris verdoso en capas de 1 metro de espesor y de shales de color gris verdoso de 2 metros de espesor. Las facies superiores, con un espesor de 200 metros, están compuestas por unas limolitas de un color marrón rojizo y unas areniscas de grano fino bien estratificadas en capas de 30 - 80 centímetros de espesor. La Formación Jordán está en contacto discordante a la base con rocas de la Formación Silgara y al techo con las rocas de la Formación Girón. (Cediel, 1968).

A la Formación Jordán se le da una edad de Jurásico inferior por la composición de los conglomerados de la base los cuales tienen clastos angulares del Granito de Pescadero el cual por dataciones radiométricas tiene una edad de 193 millones de años (Ward *et al.*, 1973).

4.1.1.2. Formación Girón

A la Formación Girón se le atribuye una edad de Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Pons, 1982). Esta unidad está compuesta por areniscas de grano medio a grueso a ligeramente conglomerático, toma colores rojizos, rojizos grisáceos y grises verdosos, presenta estratificaciones cruzadas en las capas más gruesas y esta interestratificado con limolitas y lodolitas, también presenta unos niveles de

poco espesor de conglomerados, con una composición de guijos de cuarzo que alcanzan tamaños de 4 cm. El espesor de esta unidad es variable, pero su máximo espesor se encuentra en el Río Lebrija donde llega a tener una potencia de 4650 metros (Cediel, 1968). Se le atribuye un ambiente de sedimentación continental, fluvial a lacustre.

4.1.2. Cretácico

4.1.2.1. Formación Los Santos

A la Formación Los Santos se le asigna una edad Berriasiano según (Cediel, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985). Esta unidad está compuesta por areniscas conglomeráticas, lodolitas, cuarzoarenitas, que presentan estratificación cruzada, los espesores de los estratos pueden ser variables, esta unidad tiene una potencia de 218 metros y su ambiente se interpreta como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas. (Clavijo, 1985; Laverde y Clavijo, 1985; Laverde, 1985).

4.1.2.2. Formación Rosablanca

A la Formación Rosablanca en la Mesa de los Santos se le ha asignado una edad Hauteriviano según la descripción de faunas de norte a sur, (Morales *et al.*, 1958). Esta unidad fue originalmente descrita por Wheeler 1929 en un informe inédito. Un estudio detallado de una sección de 318 metros de potencia en la quebrada Lagunetas al W de la Mesa de los Santos muestra que La Formación Rosablanca está compuesta por varios niveles: un nivel inferior de calizas y dolomitas intercaladas con calizas de color marrón, un nivel margoso seguido de niveles de shales intercalados con calizas, un nivel arenoso y en la parte superior un nivel lumaquelico, la variedad litológica indica que las condiciones del depósito no fueron constantes. (Zamarreño, 1963). Para entender las relaciones estratigráficas

de esta formación con con las formaciones infrayacentes y suprayacentes ver (Figura 2).

4.1.2.3. Formación Paja

La Formación Paja en la Mesa de los Santos contiene amonites como *Nicklesia* en la parte inferior, en su parte superior se encuentran *Hetroceras*, *Santandiceras*, *Chelonicerias*, *Colombiceras*. La edad definida para esta Formación es de Barremiano-Aptiano. (Morales *et al.*, 1958). La Formación Paja está compuesta por shales de color negro, ligeramente calcáreos, en la parte inferior hasta los 300 metros de espesor, se presentan concreciones fosilíferas de caliza, también se encuentran vetas de calcita y septarias, el espesor de esta unidad varía entre los 125 y 625 metros de potencia. Esta unida en su parte basal está en contacto neto con la Formación Rosablanca y en la parte superior un contacto gradual con la Formación Tablazo. (Morales *et al.*, 1958)

4.1.2.4. Formación Tablazo

Se encuentra en contacto concordante en la parte inferior con la Formación Paja y en la parte superior con la Formación Simití. Se la ha asignado una edad Aptiano superior- Albiano inferior. (Morales, *et al.*, 1958). La Formación Tablazo está compuesta por calizas grises a negras, con presencia de fósiles y localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, también presentan arcillolitas grises, calcáreas fosilíferas, con intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio. Las condiciones de depósito se atribuyen a condiciones neríticas de poca profundidad, esta Formación tiene entre 150 y 325 metros de potencia.

occidente la falla Suárez, dentro del área existen estructuras menores como el sinclinal de Zapatoca, Falla Los Santos y algunas fallas y lineamientos geológicos. (Julivert y Navas, 1964) (**Figura 3**).

4.2.1. Fallas

4.2.1.1. Falla Bucaramanga – Santa Marta

La Falla Bucaramanga es una expresión estructural regional que se extiende desde el Macizo de Santander y se prolonga hasta la región Caribe al oeste de Santa Marta (Ward *et al.*, 1973). La Falla de Bucaramanga es de rumbo, características atribuidas por su larga distancia y su buzamiento fuerte, según (Raasveld, 1950), (Rod, 1950), (Young, 1950), (Alberding, 1960), (Moddy y Hall, 1950) y (Campbell, 1965) y este último autor calcula un desplazamiento de 110 Km en (Ward *et al.*, 1973). La zona de cizalla próxima al trazo de la falla se caracteriza por tener roca fracturada, espejos de falla con distintas direcciones, la falla Bucaramanga – Santa Marta tiene una traza aproximadamente recta y solo es interrumpido por fallas de rumbo noreste. (Ward *et al.*, 1973).

4.2.1.2. Falla Suárez

La Falla Suárez en una estructura tectónica que se extiende desde el municipio de Barbosa hasta chocar con el trazo de la falla Bucaramanga- Santa Marta, esta falla en la zona de estudio se encuentra al oeste del río Sogamoso; donde pone en contacto las rocas Jurásicas de la Formación Girón con rocas cretácicas (Formación Rosablanca y Formación Paja), estimaciones del movimiento de esta falla en este sector se han calculado teniendo valores entre 1700 y 2300 metros, en la vía que conduce desde el municipio de Girón hasta el municipio de Lebrija donde la rocas de la Formación Girón, que se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios. las mediciones que se tienen en el escarpe de falla a oeste indican un desplazamiento de 400 a 500 metros aproximadamente (Ward *et al.*, 1973).

4.2.1.3. Falla Los Santos

La Falla de los santos, es una de las estructuras menores en la zona de trabajo, su trazo tiene una dirección noroeste y se identifica por el cauce de la quebrada que lleva el mismo nombre. Cerca al municipio de la Mesa de los Santos, se puede reconocer un desplazamiento de 100 metros, siendo esta una de las que mayor desplazamiento se observa en la superficie. Al proyectarse el trazo de la falla de los Santos, esta coincide con el trazo de la falla Aratoca, pero el material cuaternario en la zona inferior de la Mesa de los Santos dificulta seguir el trazo de la falla. (Ward *et al.*, 1973).

4.2.2. Pliegues

4.2.2.1. Sinclinal de Zapatoca

El sinclinal de Zapatoca es una estructura ubicada al W de la Falla de Suárez y tiene una dirección NE- SW. El flanco E tiene una inclinación entre 18 y 30 grados SE, y el flanco W, tiene una inclinación entre 17 y 26 grados NW (Según estudio de impacto ambiental del proyecto eléctrico Sogamoso, 2008). Su origen no es un verdadero plegamiento por esfuerzos tectónicos, sino que es la adaptación de las rocas cretácicas a la tectónica de bloques de la región (Julivert, 1958).

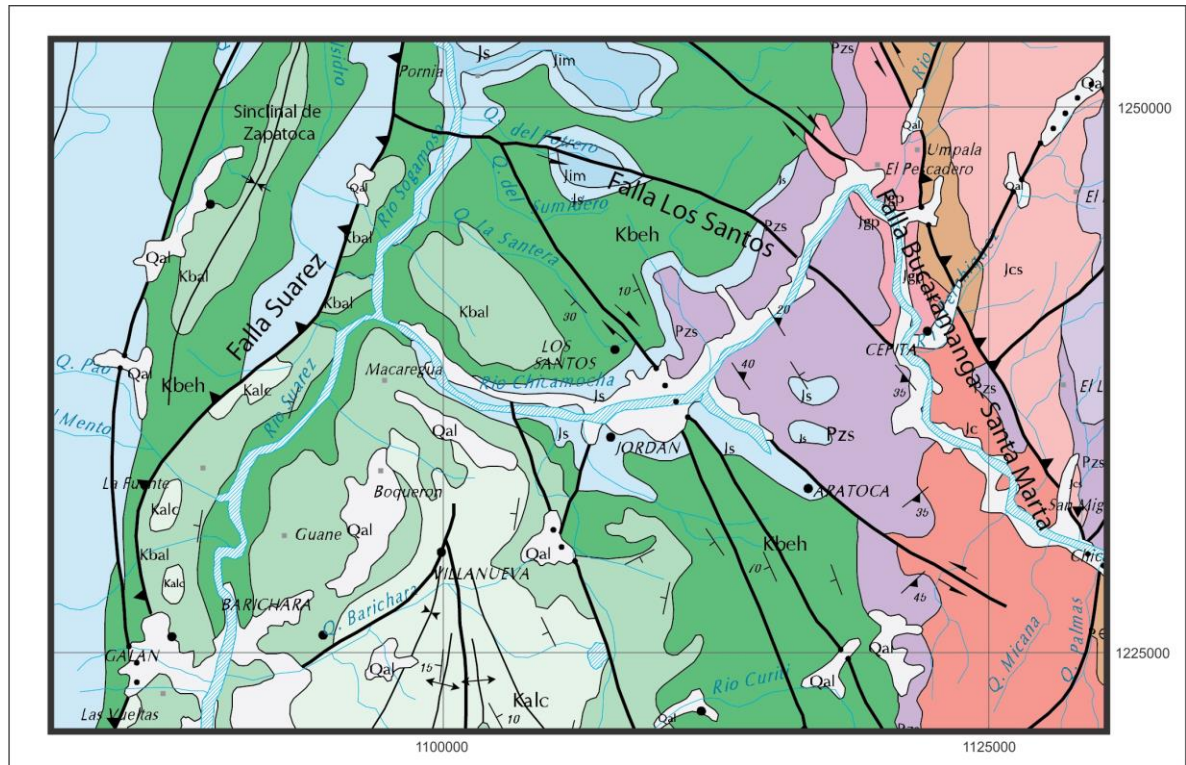


Figura 3. Mapa de la zona de estudio donde se observan las principales características tectónicas que afectan el área. Modificado de (Royer & Vargas, 1999).

5. MÉTODOS

La **Figura 4** presenta la metodología desarrollada a lo largo del proyecto.

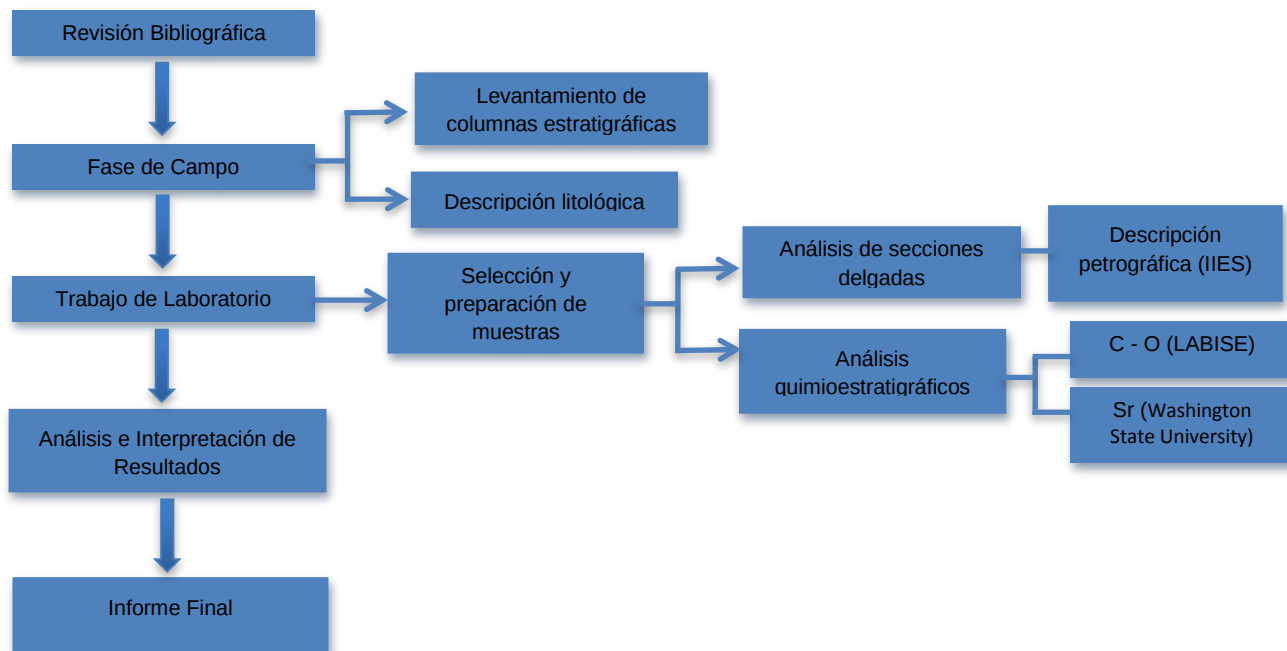


Figura 4 Metodología desarrollada durante el proyecto.

5.1. Fase de campo

El trabajo de campo se realizó en los sectores de la Mesa de Los Santos y la zona rural del municipio de Zapatoca, donde se levantaron cuatro columnas estratigráficas, en sitios estratégicos donde se encontraba mejor expuesta la formación objeto de estudio.

En esta fase se caracterizaron macroscópicamente las sucesiones carbonáticas presentes, además se identificaron las principales estructuras sedimentarias, teniendo en cuenta la clasificación de carbonatos de Dunham 1962.

El levantamiento de las columnas se llevó a cabo siguiendo el método de bastón de Jacob, en una escala 1:100, con un intervalo de muestreo cada 3 metros, obteniendo en total 64 muestras utilizadas para análisis posteriores.

5.2. Fase de laboratorio

En esta fase se llevaron a cabo la elaboración y análisis de secciones delgadas, y los análisis quimioestratigráficos.

5.2.1. Elaboración y análisis de secciones delgadas:

Para la elaboración de las secciones delgadas se escogieron 13 muestras teniendo en cuenta las características en la roca más relevantes: texturales y/o composicionales. Estas muestras fueron teñidas con alizarina roja para determinar la posible presencia de dolomita e impregnadas con epóxido azul para el análisis de porosidad. Después las muestras fueron caracterizadas por medio de microscopio de luz polarizada óptico (Nikon Eclipse 50i Pol), (luz transmitida y reflejada) realizados en el laboratorio de petrografía sedimentaria del Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas. Para el análisis de estas rocas se utilizó un formato de clasificación que utiliza ciertos parámetros, tales como 1) descripción y/o caracterización textural la cual especifica la cantidad de matriz y/o cemento incluyendo el material que está remplazando los fragmentos fósiles, esto se realiza con un conteo estadístico de 100 puntos en la sección delgada. 2) caracterización del almacén calcáreo, en el cual se diferencian los aloquímicos fosilíferos de los no fosilíferos, diferenciándolos de los fragmentos que conservan su estructura original y de los que han sido afectados por procesos diagenéticos, también se tienen en cuenta el material terrígeno y los minerales autigénicos, todos estos en un conteo de 290 puntos. 3) caracterización de la fábrica primaria de acumulación, donde se diferencian 3 constituyentes principales, almacén calcáreo, almacén siliciclástico y material intersticial primario, este conteo se realiza en 100 puntos. (**Anexo 1**)

Después de realizar estas descripciones se hace una clasificación textural según Dunham 1962 (**Figura 5**); seguido de una descripción de la historia diagenética

registrada en las rocas y por último se describe la porosidad observada.

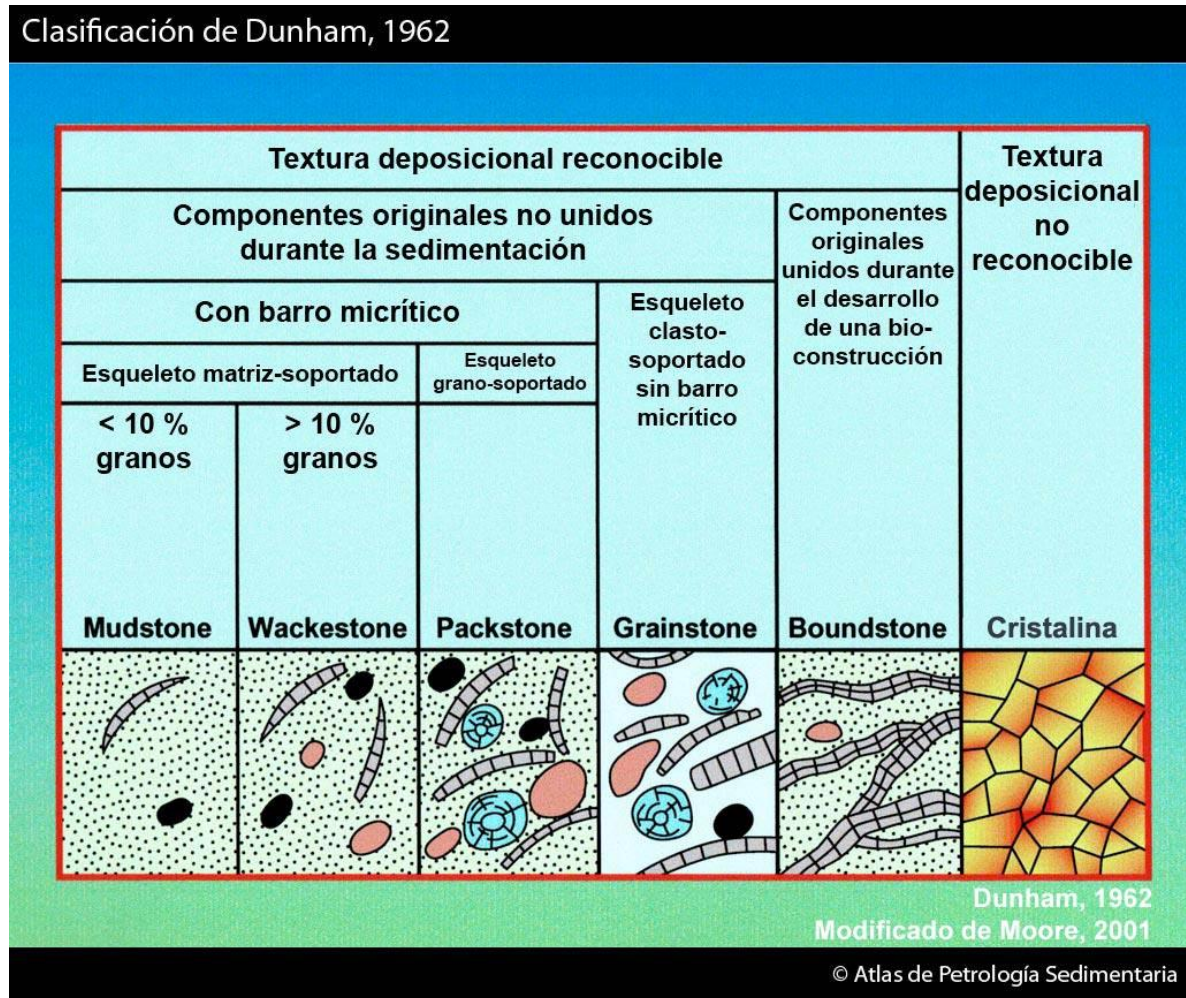


Figura 5. Clasificación de rocas carbonáticas según Dunham 1962, tomado de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/petrosed/rc/c/a/>

5.2.2. Geoquímica isotópica:

Para realizar los análisis de isótopos estables de C y O se seleccionaron 34 muestras y 7 muestras para análisis quimioestratigráficos de Sr. La preparación de estas muestras se realizó a partir de microdrilling para obtener polvo de roca. Este proceso se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Investigaciones en

Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas y este procedimiento permitió coleccionar muestras de carbonatos libres de superficies de meteorización, fracturas y facies recrystalizadas que pudiesen afectar la calidad de los análisis isotópicos de C, O y Sr.

Las micromuestras de roca preparadas para análisis isotópicos de carbono y oxígeno, se enviaron y fueron analizadas en el Laboratorio de Isótopos Estables (LABISE), del departamento de geociencias, en la Universidad Federal de Pernambuco, Brasil. Los análisis fueron realizados, con un espectrómetro de masas de fuente gaseosa, SIRA II (multi-collector double-inlet gas source). Para la realización de los análisis, cada una de las muestras de carbonato puro se pone a reacciones con ácido ortofosfórico al 100% durante 12 horas a 25 °C. El CO₂ expulsado en esta reacción se colecta en una línea de extracción de alto vacío a través de captura criogénica, de acuerdo al método propuesto por (Craig, 1957). Las muestras de CO₂ se analizaron en un espectrómetro de masa con triple colector y doble entrada de fuente gaseosa, SIRA II. Los datos obtenidos de la composición isotópica de las muestras analizadas se reportan en unidades internacionales delta per mil ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) referentes a la composición isotópica del estándar Belemnite Americana de la Formación Pee Dee del Cretácico, en Carolina del Sur, Estados Unidos (Silva-Tamayo *et al.*, 2005). Las muestras preparadas para análisis isotópicos de estroncio, fueron enviadas y analizadas en la Washington State University, Washington, Estados Unidos, donde se analizaron en un espectrómetro de ionización térmica (TIMS) siguiendo los métodos descritos por Silva-Tamayo *et al* (2005).

5.3. Fase Final

Esta etapa comprende el análisis e interpretación de los datos arrojados en campo y en la etapa de laboratorio, a su vez el procesamiento de los mismos. Los análisis petrográficos son utilizados para hacer una interpretación tanto ambiental como depositacional de la secuencia carbonática expuesta, también estos análisis son



utilizados para realizar una caracterización diagenética. Los datos geoquímicos de isótopos de C, O y Sr son utilizados con el fin de mejorar el cuadro cronoestratigráfico mediante quimioestratigrafía de estos elementos. Estos son además utilizados para determinar los eventos paleoceanográficos y paleoclimáticos ocurridos durante el Cretácico Inferior en la cuenca Cretácica Colombiana. Los análisis quimioestratigráficos de C y Sr fueron comparados con las curvas globales de variaciones de C y Sr en carbonatos (Hu *et al.*, 2012., Bralower *et al.*, 1997) para determinar la presencia de posibles eventos anóxicos y la edad de sedimentación de las sucesiones carbonáticas estudiadas.

6. QUIMIOESTRATIGRAFÍA ISOTÓPICA

6.1. Estudio isotópico

Un isótopo es cada uno de los diferentes átomos de un mismo elemento con un número de neutrones y por tanto también difieren en masa atómica (Arnett, 1996). Estos han sido divididos en isótopos radiactivos o inestables y estables no radiogénicos, estos últimos son el resultado de la desintegración del mismo elemento, mientras que los radiactivos se generan por el decaimiento radiactivo de otro elemento. Debido a su abundancia en la naturaleza y la importancia en aplicaciones como análisis paleoecológicos y cronoestratigráficos algunos de los isótopos más usados son los de carbono, oxígeno y estroncio (Vera-Torres, 1994).

6.2. Isótopos de Oxígeno

El oxígeno es quizá el elemento más abundante en la tierra, ya que éste forma parte de la corteza terrestre de la atmósfera, hidrosfera y litosfera. En geoquímica isotópica, se analiza la relación de isótopos $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (expresada en partes por mil, $\delta^{18}\text{O}$) (Vera-Torres, 1994). La composición isotópica del agua de mar se ve afectada por el volumen de hielo en los polos y en las montañas, por la salinidad y por la temperatura ya que en épocas de glaciaciones es atrapado ^{16}O en el hielo, provocando así que se enriquezca el agua de mar en ^{18}O . Las relaciones entre los isótopos de oxígeno, se pueden medir en carbonatos que se depositaron en el mar. Las mediciones de estos valores pueden arrojar valores $\delta^{18}\text{O} \gg 0$ que son interpretados como periodos glaciares, bajos en temperaturas y con mayor salinidad; mientras que $\delta^{18}\text{O} \ll 0$ serían el resultado de periodos interglaciares de temperaturas más elevadas pero menor salinidad de las aguas (Vera-Torres, 1994). (**Figura 6**)

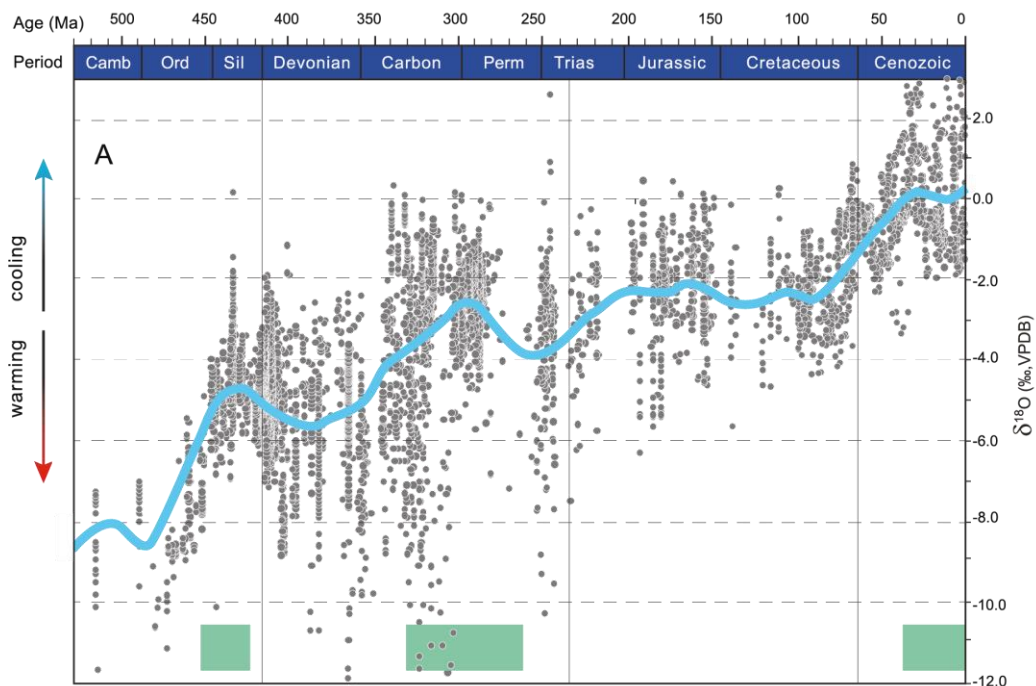


Figura 6. Curva de variación mundial de isótopos de Oxígeno, durante el Fanerozoico. Tomado de Price et al, 2013.

6.3. Isótopos de Carbono

La geoquímica de isótopos de carbono se enfoca en determinar la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de diferentes materiales. Como en el caso de los isótopos de oxígeno, la composición isotópica de los materiales se presenta en valores de delta per mil, $\delta^{13}\text{C}$, con respecto a el estándar conocido como PDB (Pee Dee Belemmite) de edad Cretácico, en la Formación Pee Dee en Carolina del Sur (Rollinson, 1993, en Hincapié y Moreno, 2010). la composición isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ del agua del mar es controlada por el ciclo del carbono en el planeta, el cual es controlado por la actividad fotosintética de organismos marinos, la actividad orgánica terrestre y la interacción de estos en la litosfera. A menudo son utilizados los análisis en secuencias oceánicas con fines cronoestratigráficos, para detectar eventos globales e independientes y variaciones en la temperatura o actividad orgánica. (Vera-Torres, 1994., Martín-Chivelet, 2010). (**Figura 7**)

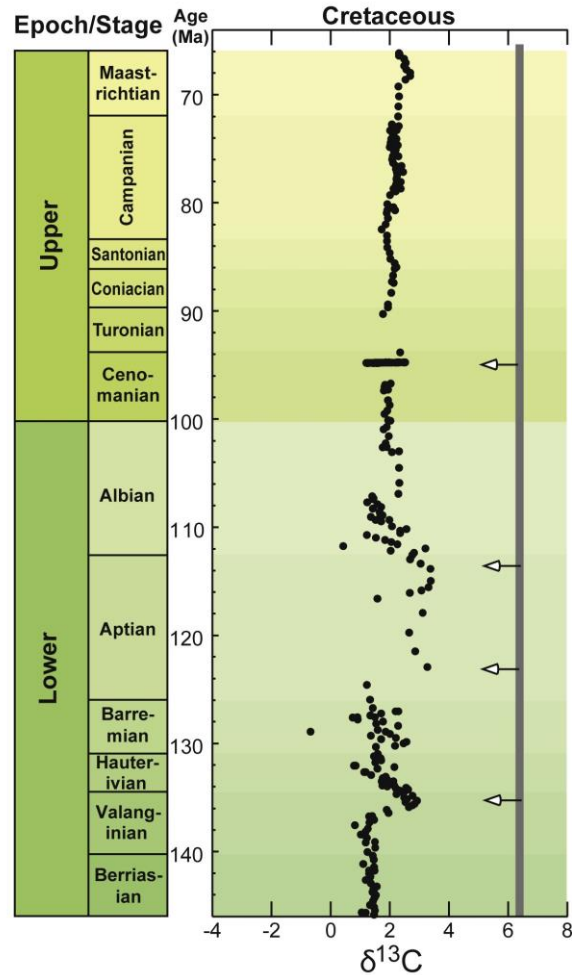


Figura 7. Curva de variación mundial de isótopos de Carbono, durante el Cretácico.

Tomado de *The Geologic Time Scale 2012*, M.R. Saltzman and E. Thomas.

6.4. Isótopo de Estroncio

La composición isotópica de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) del agua del mar ha variado a través del tiempo geológico con valores desde 0.709 en el Cámbrico, un valor mínimo en el Pérmico Superior de 0.707 y desde inicios del Jurásico un aumento progresivo hasta llegar a valores actuales de 0.709 (Vera-Torres, 1994). El aporte de Sr para

el agua marina proviene en general de dos fuentes: corteza continental y manto. La alta abundancia de isótopos de ^{87}Sr en la corteza continental se debe al enriquecimiento del material magmático diferenciado en ^{87}Rb , el cual decae a ^{87}Sr y es la responsable de los valores más altos en la relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.720). Por otra parte el manto es responsable de los valores más bajos de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.703). Esto se debe por el contrario a la poca abundancia de ^{87}Rb en el material indiferenciado del manto (Wadleigh, 1982). La relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la composición del agua de mar refleja el balance de masas entre isótopos de Sr provenientes de la erosión de los continentes (radiogénicos) y aquellos provenientes de actividad medio-oceánica (no radiogénicos). Esta relación por tanto ha sido utilizada comúnmente como herramienta paleogeográfica y geocronológica. (Figura 8)

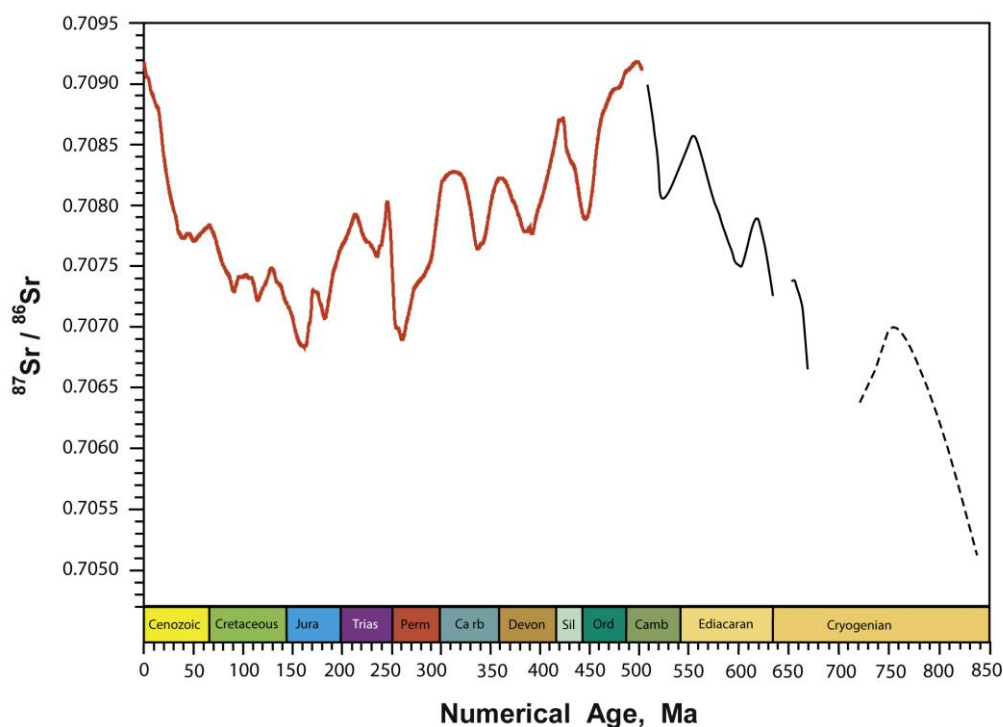


Figura 8. Curva de variación mundial de isótopos de Estroncio, durante el Precámbrico y Fanerozoico. Tomado de *The Geologic time Scale 2012*, J.M. McArthur, R.J. Howarth and G.A. Shields



El uso de estos 3 isótopos, sirve para interpretar y generar hipótesis acerca de la evolución de la atmósfera, el clima y la sedimentación durante el Cretácico Inferior. dado que la variación de la composición isotópica de C y Sr en el agua de mar es homogénea en un determinado momento del tiempo geológico, las curvas isotópicas de agua de mar de Sr y C (**Figuras 7 y 8**) pueden ser utilizadas para la correlación estratigráfica, en particular para secuencias que carecen de un marco bioestratigráfico adecuado (Jacobsen & Kaufman, 1999).

7. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de este trabajo de investigación y se descompone en 3 ítems: 1) Descripción estratigráfica de campo, 2) Petrografía y 3) Químioestratigrafía.

7.1. Descripción estratigráfica de campo

Para el trabajo estratigráfico de campo se realizó una columna compuesta por 4 secciones estratigráficas, ya que realizar el levantamiento en una sola sección se dificulta por condiciones topográficas y por la poca continuidad de los estratos en la zona. En total se levantaron 95 metros de sección estratigráfica en la base de la Formación Rosablanca; que están representados por 65 metros para la sección Quebrada Lagunetas y 30 metros para la sección La Cascada; que en este trabajo se denomina segmento inferior. En la sección Quebrada el Gachal, que representa el segmento medio, se levantaron 26 metros de columna, más un intervalo de 19 metros donde se tomaron 7 muestras en estratos resistentes a la meteorización para análisis isotópicos. El techo de la Formación Rosablanca, descendiendo estratigráficamente desde el contacto con la Formación Paja se levantaron aproximadamente 18,5 metros y se realizó un muestreo en 10 metros donde se obtuvieron 6 muestras; esta sección se denominó segmento superior.

7.1.1. Segmento Inferior

7.1.1.1. Sección La Cascada:

Estratigráficamente, esta sección comienza a 30 metros aproximadamente sobre el contacto de la Formación Los Santos con la Formación Rosablanca (**Figura 9**).

Estos 30 metros se encuentran cubiertos por depósitos de vertiente. La sección empieza con un nivel de aproximadamente 3 metros de lodolitas, el cual es seguido por un paquete de 9 metros con un predominio litológico de mudstone que solo se ven interrumpido por niveles delgados de wackestone en los metros 7.5 y 9. Suprayaciendo este paquete, se observa una variación en la composición litológica la cual consiste en la aparición de intercalación de wackestone, packstone y mudstone predominando las 2 primeras, con un espesor de 13 metros. En el último nivel de esta sección se observa un predominio litológico de facies gruesas, wackestone y packstone con unos estratos de lodolitas aislados. El contenido fósil de esta sección se ve afectado por recristalización. Sin embargo se reconocen algunos fragmentos de bivalvos y gasterópodos y también algunos aloquímicos no fosilíferos como ooides, oolitos y pellets. En total para esta sección se levantaron 36.5 metros (**Figura 9**).

7.1.1.2. Sección Quebrada Lagunetas:

En esta sección se levantaron 65 metros desde el contacto de la Formación Rosablanca con la Formación Los Santos (**Figura 10**). El inicio de esta sección se ve marcado por estratos de mudstone con algunas intercalaciones de shale, este nivel prevalece más o menos hasta el metro 12, a partir del cual unos estratos de wackestone comienzan a aparecer. Los mudstone se comienzan a ser reemplazados por niveles de shale margoso, (el cual en campo se diferenció de los niveles con lodolitas, por presentar fisilidad y por dejar rastro de materia orgánica al tacto) arenitas calcáreas e intercalación con lodolitas, este segmento tiene un espesor de 8 metros. A partir del metro 25 se evidencia de nuevo un predominio de mudstone, con algunos niveles de menor espesor de arenitas y shale. Suprayaciendo estos estratos se encuentra un segmento de 10 metros de wackestone laminado el cual es seguido por intercalaciones de shale margoso, arenita de grano fino y mudstone. El segmento superior de esta sección (11 metros de espesor) está compuesto por una intercalación de wackestone y

mudstone, predominando este último. El contenido fósil de esta sección se ve representado por bivalvos y gasterópodos donde la mayoría de estos se encuentran en los estratos de wackestone (**Figura 10**).

7.1.2. Segmento Medio

7.1.2.1. Sección Quebrada El Gachal:

En esta sección se levantaron 26 metros de columna continua (**Figura 11**) y se realizó un muestreo de estratos que mostraban mayor resistencia a la meteorización, tomando muestras que fueran representativas para análisis geoquímicos; este muestreo se realizó cada 1.5 metros aproximadamente.

La secuencia inicia con un paquete de aproximadamente 2 metros de wackestone con un nivel de packstone rico en fósiles como equinodermos, gasterópodos y bivalvos, seguidos de unos niveles de mudstone masivos, intercalados en menor proporción por niveles de lodolita. Estos estratos son interrumpidos por un nivel de arenita calcárea de grano medio, con presencia de gasterópodos y bivalvos. Por encima de este nivel arenoso, se vuelven a presentar facies de grano fino de lodolita y mudstone con un espesor de 2.5 metros. Subiendo hacia el tope de esta sección se observa un cambio facial, donde predominan estratos de packstone fosilíferos intercalados con arenitas y wackestone. A partir del metro 26,5, los niveles que se muestrean, son en su gran mayoría lodolitas y mudstone. El contenido fósil para esta sección se ve representado por bivalvos, gasterópodos y equinodermos. (**Figura 11**)

7.1.3. Segmento Superior

7.1.3.1. Sección Finca Aguada:

Esta sección de 18,5 metros de espesor, es la parte superior de la Formación Rosablanca que está en contacto con la Formación Paja (**Figura 12**). Ésta sección se caracteriza por ser un nivel fosilífero que inicia con un paquete de grainstone intercalado con paquetes de packstone y wackestone en los cuales se hacen evidentes los fragmentos de conchas de bivalvos (Ostreidos y Cuculae). Hacia el contacto con la Formación Paja se hace evidente una disminución en el tamaño de grano, pasando de unos estratos de grainstone hasta llegar a un estrato de mudstone con bivalvos. Las rocas de esta sección son muy compactas y algunas presentan meteorización esferoidal. Esta sección es rica en fósiles como bivalvos, gasterópodos y equinodermos. (**Figura 12**).

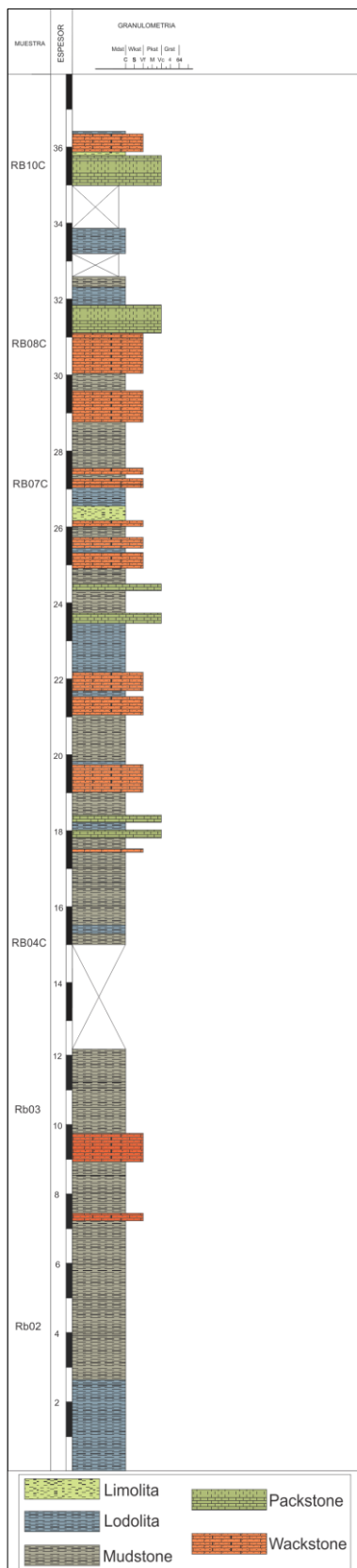


Figura 9. Columna estratigráfica de la Fm. Rosablanca en el segmento inferior, sección la Cascada.

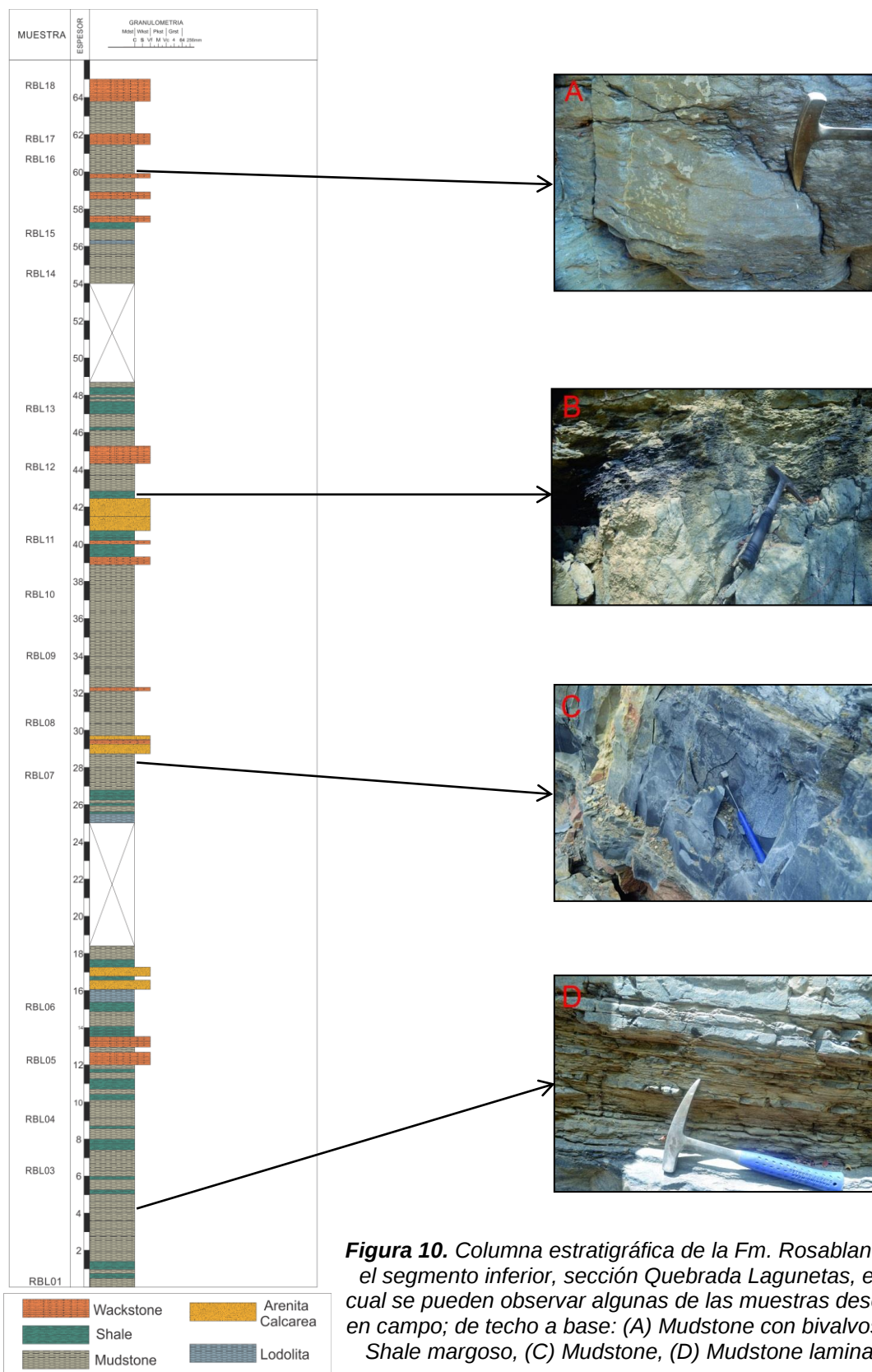


Figura 10. Columna estratigráfica de la Fm. Rosablanca en el segmento inferior, sección Quebrada Lagunetas, en la cual se pueden observar algunas de las muestras descritas en campo; de techo a base: (A) Mudstone con bivalvos, (B) Shale margoso, (C) Mudstone, (D) Mudstone laminado.

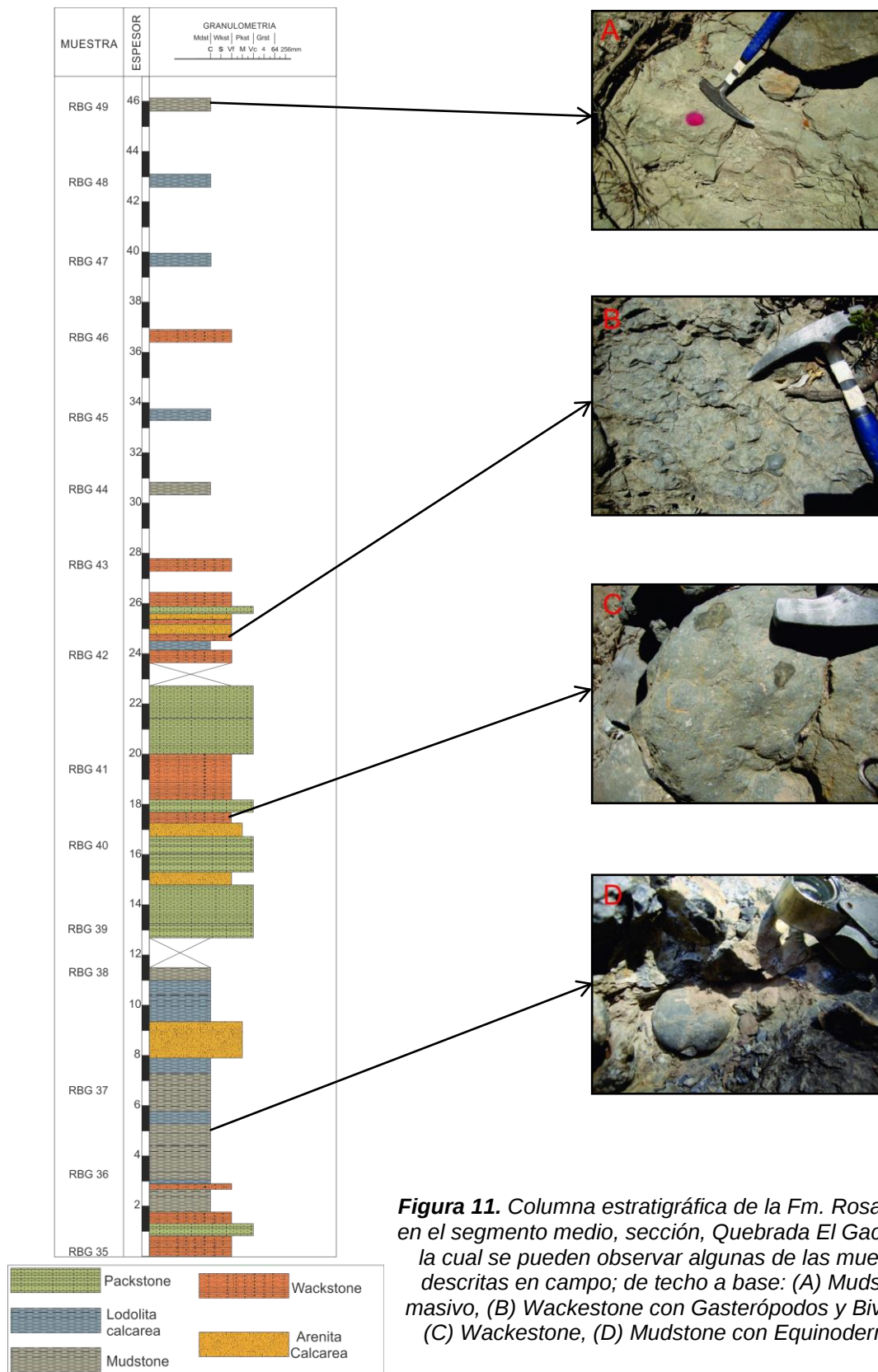


Figura 11. Columna estratigráfica de la Fm. Rosablanca en el segmento medio, sección, Quebrada El Gachal, en la cual se pueden observar algunas de las muestras descritas en campo; de techo a base: (A) Mudstone masivo, (B) Wackestone con Gasterópodos y Bivalvos, (C) Wackestone, (D) Mudstone con Equinodermos.

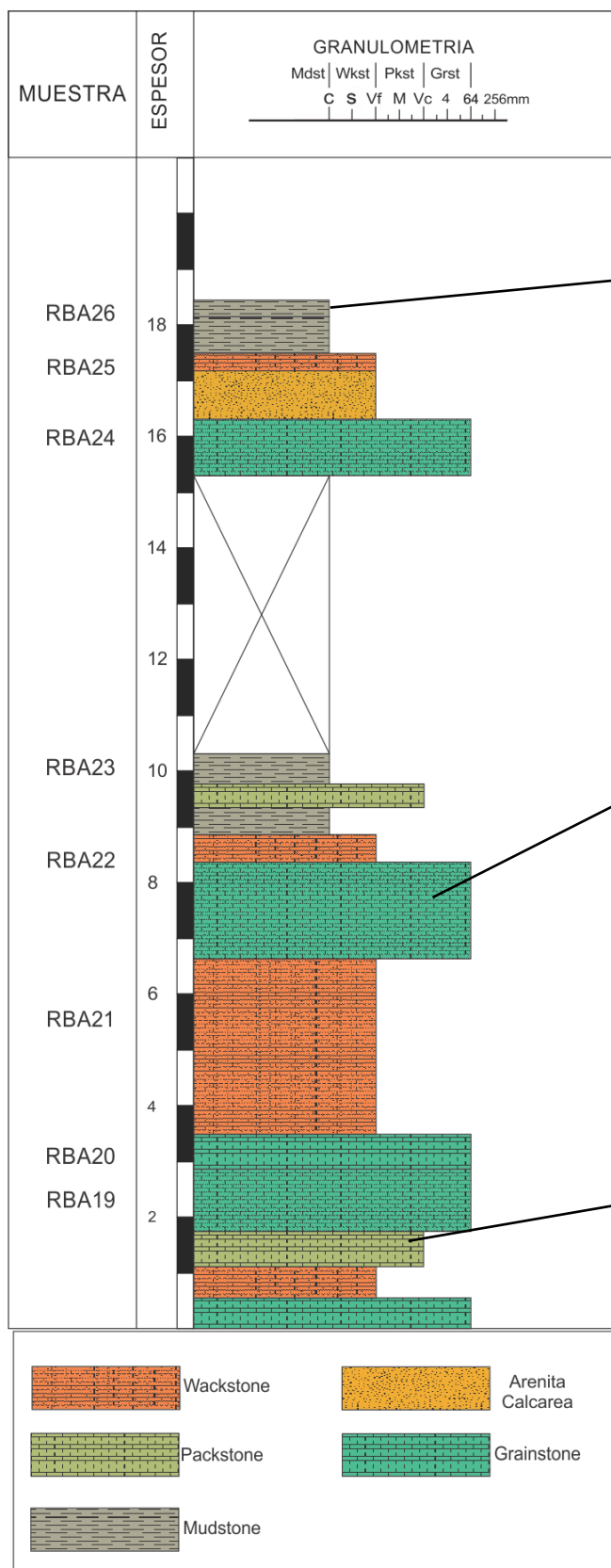


Figura 12. Columna estratigráfica de la Fm. Rosablanca en el segmento superior, sección Finca Aguada, en la cual se pueden observar algunas de las muestras descritas en campo; de techo a base: (A) Mudstone con Bivalvos, se observa una valva de *Trigonia*, (B) Grainstone que presenta meteorización con bioclastos de *Cuculæ* y *Ostreids*, (C) Grainstone compacto con conchas de bivalvos.

7.2. Petrografía

En este ítem se describen las características petrográficas observadas durante el análisis en las secciones delgadas, en los diferentes conteos (**Figuras 13,14,15**), de las sucesiones carbonáticas de la Formación Rosablanca donde se evalúan las principales características texturales y composicionales de la roca.

En la **Tabla 1** se enlistan las abreviaturas utilizadas para destacar las características más relevantes en las fotos de las secciones delgadas.

Matriz/ Cemento	Símbolo	Aloquímicos	Símbolo	Terrígenos	Símbolo	Autigénicos	Símbolo	Otros minerales	Símbolo	Características	Símbolo
Esparita	Es	Ostreidos	Os	Cuarzo	Qz	Material Ferruginoso	Mf	Dolomita	DI	Porosidad por fractura	Pf
Microesparita	Ms	Equinodermos	Eq	Feldespato Plagioclasa	Fp			Yeso	Ys	Porosidad Vugular	Pv
Micrita	Mc	Ostrácodos	Osc							Porosidad Moldica	Pm
		Gasterópodos	Ga							Estilolitos	Et
		Foraminíferos	Fo							Bioturbación	Bt
		Ooides	Oo							Compactación	Co
		Pellets	Pe								

Tabla 1. Nomenclatura empleada, para destacar las características relevantes de las secciones estudiadas en cada una de las imágenes.

7.2.1. Sección La Cascada

En las secciones delgadas analizadas se observó un importante aporte de material terrígeno hacia la base de la sección (**Figura 16-A**). También se observan aloquímicos fosilíferos como equinodermos, foraminíferos, gasterópodos y bivalvos y no fosilíferos tales como pellets, peloides y oolitos (**Figura 16-B**).

Se observa micritización, cementación, estilolitización, compactación física y neomorfismo, los cuales afectan considerablemente la roca impidiendo en ocasiones la clasificación de algunos fósiles. También se puede observar procesos de dolomitización que en ocasiones rompen la fábrica de la roca (**Figura 16-C**) y en otras se encuentran reemplazando el cemento esparítico en los aloquímicos. Se reconocen cristales de yeso que se encuentran rellenando fracturas. La porosidad observada para las muestras está en un porcentaje bajo, y se asocia a fracturas y superficies estilolíticas (**Figura 16-E**).

7.2.2. Sección Quebrada Lagunetas

Las secciones delgadas analizadas para ésta sección evidencian una gran cantidad de aloquímicos fosilíferos y no fosilíferos; fragmentos de ostrácodos, bivalvos, gasterópodos, foraminíferos y aloquímicos no fosilíferos como pellets, peloides y algunos ooides, los cuales son abundantes tanto en la base como en el techo. Muchos de los aloquímicos se encuentran preservando su estructura original como es el caso de las conchas de los Ostreidos (**Figura 16-F**), mientras que otros han sufrido procesos de reemplazamiento y se encuentran rellenos por esparita (**Figura 17-A**).

En muchas de las muestras analizadas el material que se encuentra en la matriz es micrita, donde también se nota un predominio de la cementación dada por la esparita y/o microesparita (**Figura 17-B**), este mismo material se encuentra rellenando fracturas y otras en cambio se encuentran rellenas por óxidos de hierro y en un caso puntual de dolomita (**Figura 17-C**). Las rocas de esta sección muestran que aunque sufrieron procesos de compactación tanto física como química, la cual se ve asociada a la deformación de clastos, esta no fue tan intensa ya que predominan los contactos entre granos flotantes y puntuales. Otro proceso diagenético al cual se ven expuestas las rocas de esta sección son la

corrosión del material terrígeno (cuarzo) por los carbonatos. La micritización es otra de las características importante en las muestras, ya que produce neomorfismo retrogrado tanto en el material intersticial como en los aloquímicos.

La porosidad para las muestras de esta sección no es muy abundante y la que se observa en su mayoría es por disolución asociada a las fracturas y a granos que están recrystalizados; otro tipo de porosidad puede ser móldica pero ésta se encuentra en un estado muy primario (**Figura 17-D**).

7.2.3. Sección Finca Aguada

Esta sección fue descrita en el levantamiento de campo como una secuencia fosilífera; característica que se pudo corroborar en las secciones delgadas ya que se nota un predominio de los aloquímicos fosilíferos entre los que se encuentran equinodermos, algas y moluscos (*Ostreidos*) (**Figura 17-E**), que en su mayoría preservan su estructura original, estos acompañados por algunos aloquímicos no fosilíferos como lo son pellets, peloides y ooides, pero en menor proporción.

El material intersticial que se encontró dominante en la secuencia fue el cemento esparítico, que se ve afectado por procesos de micritización y en un caso muy puntual se observa un reemplazamiento por cristales de yeso (**Figura 17-F**). Los contactos entre los granos en su mayoría son de tipo puntual y la evidencia de la compactación química se puede comprobar por la presencia de superficies estilolíticas. Otro aspecto importante que se notó en algunas de las muestras fue la evidencia de bioturbación la cual a su vez se encontraba rellena con cemento esparítico (**Figura 18-A**), así mismo las fracturas presentes.

La porosidad observada se da por efecto de la disolución, ésta se asocia a las superficies estilolíticas y a cristales dispersos en la roca. (**Figura 18-B**).

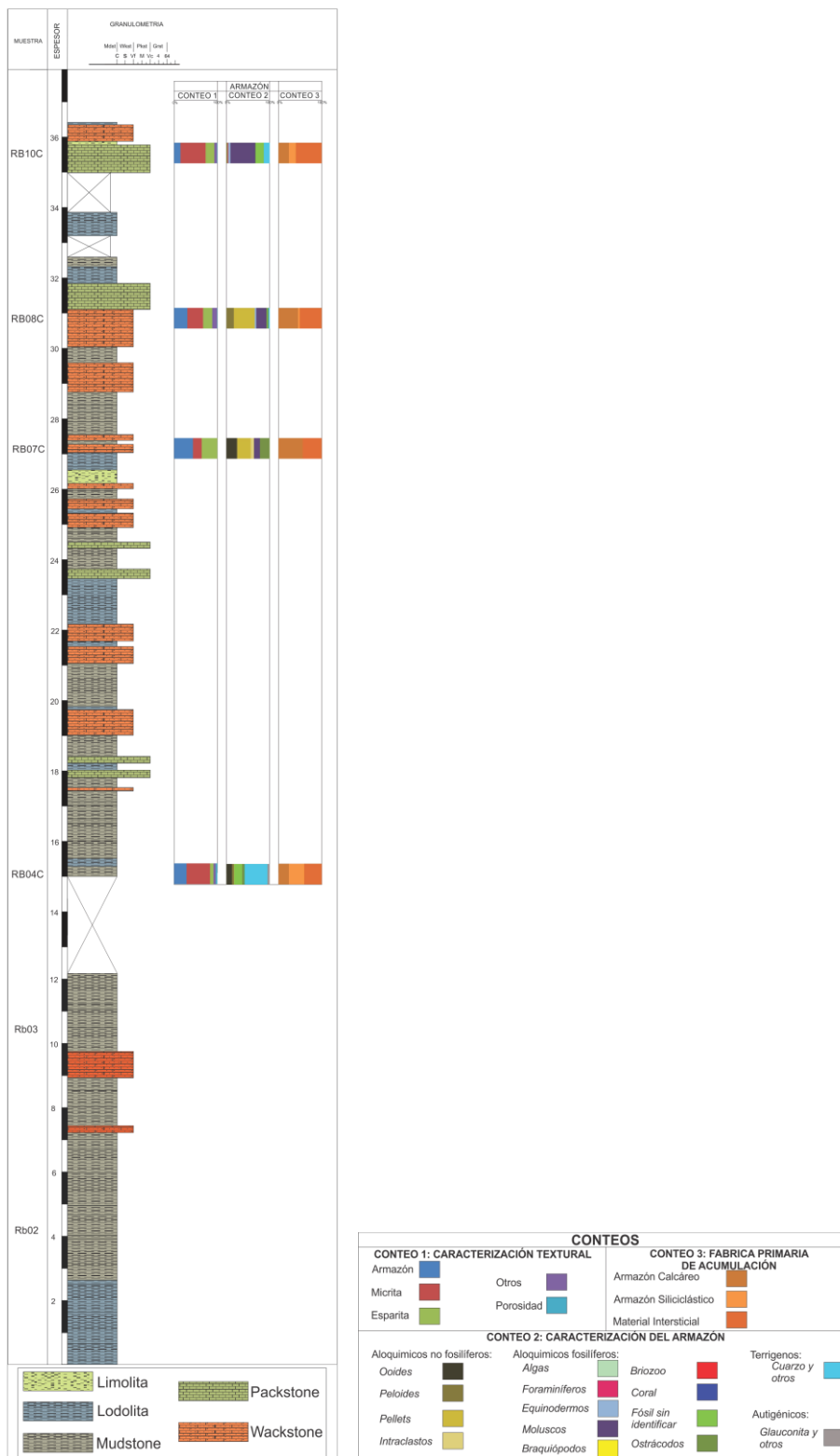


Figura 13. Conteos obtenidos a partir de análisis petrográficos, para la sección La Cascada

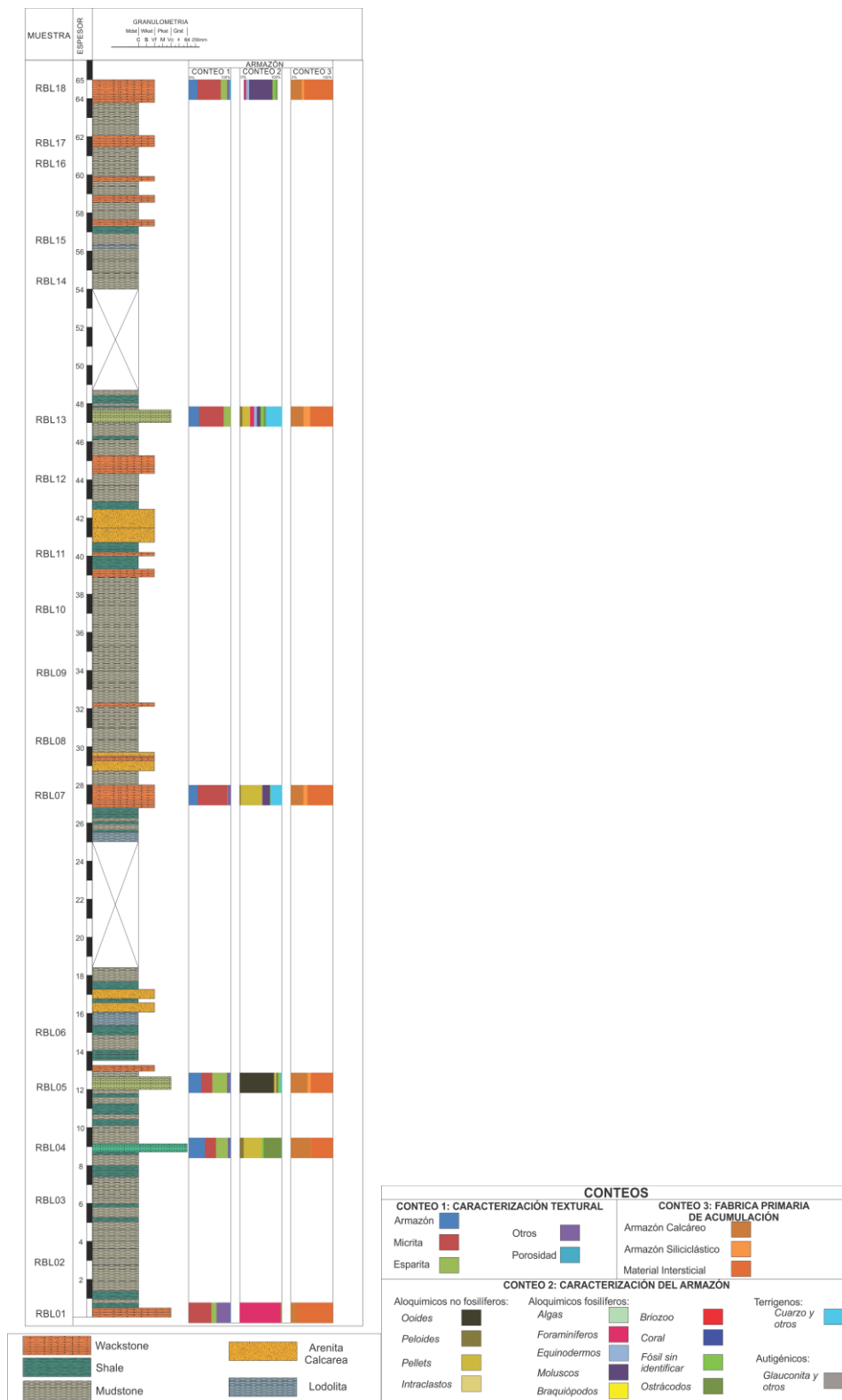


Figura 14. Conteos obtenidos a partir de análisis petrográficos, para la sección Quebrada Lagunetas.

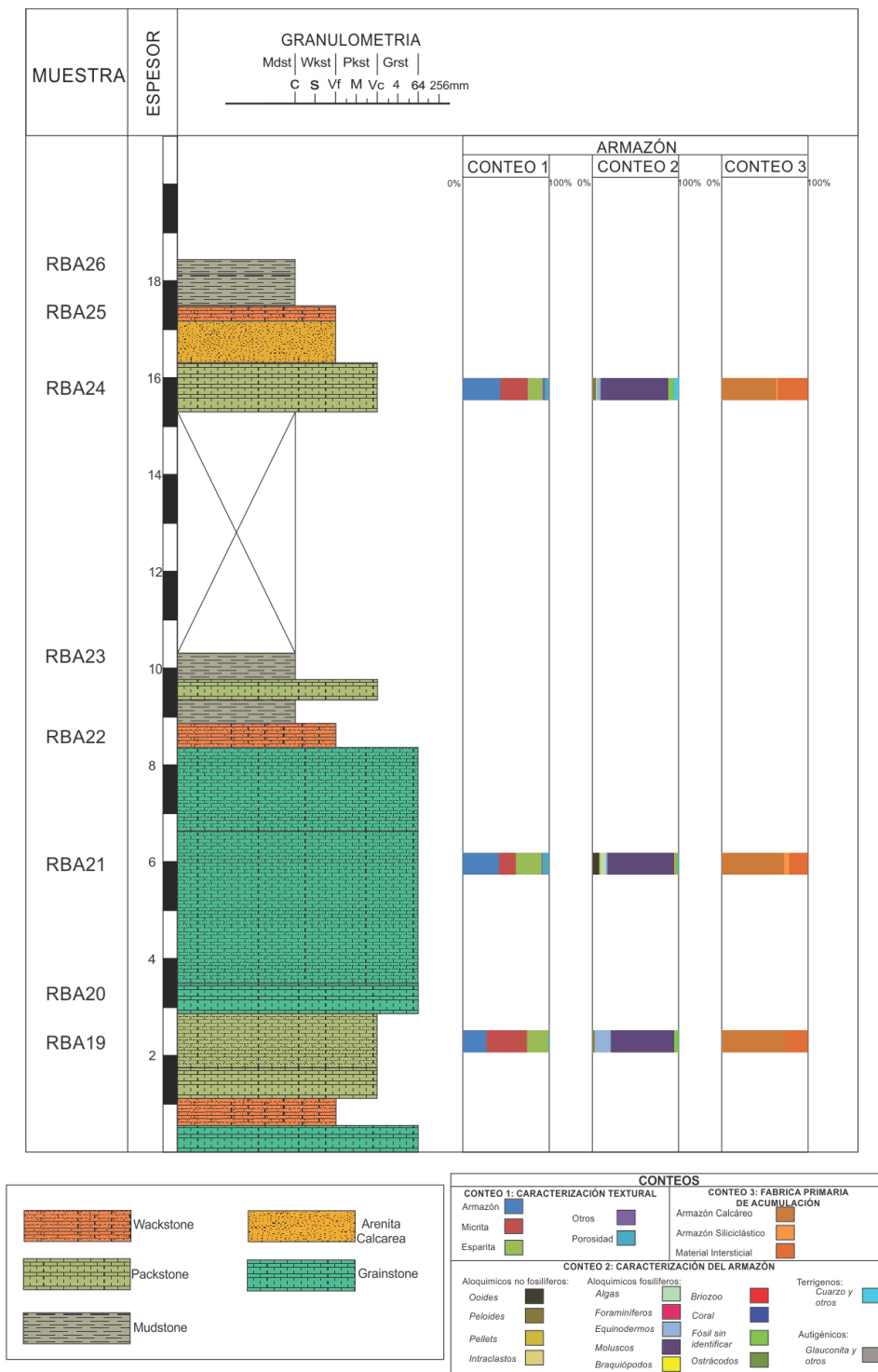


Figura 15. Conteos obtenidos a partir de análisis petrográficos, para la sección Finca Aguada.

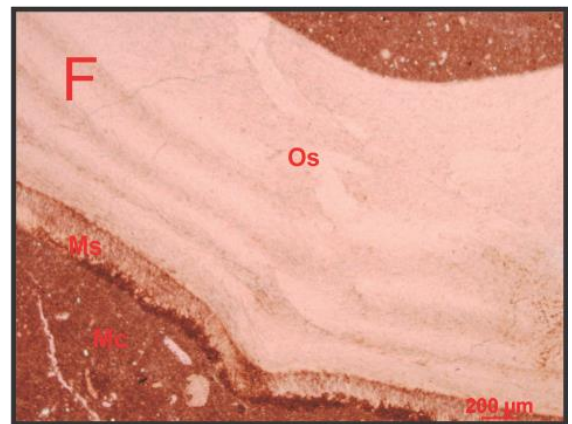
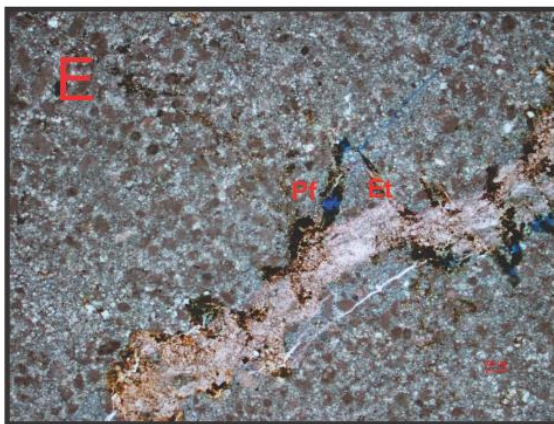
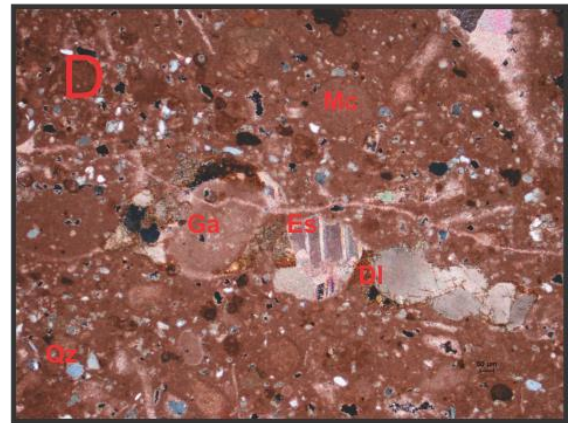
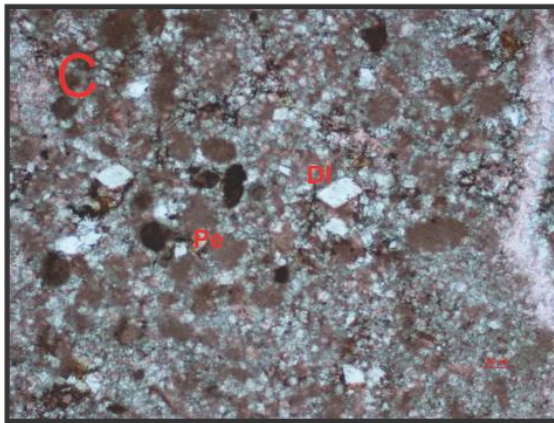
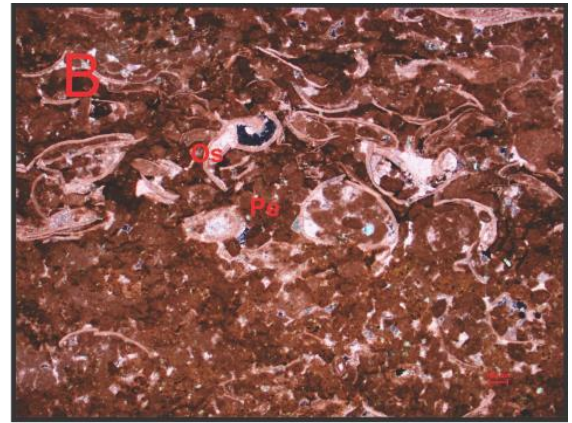
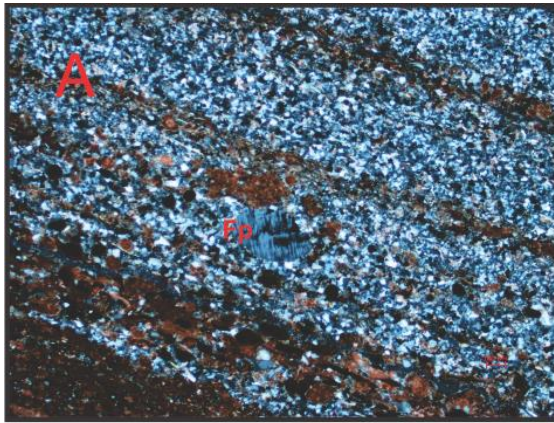


Figura 16. Características petrográficas y algunos aloquímicos representativos observados en las secciones delgadas de la Formación Rosablanca. (A) Fp: Feldespato plagioclasa. XPL. (B) Os: Ostrácodo, Pe: Pellets XPL. (C) Dl: Dolomita, Pe: Pellets. PPL. (D) Mc: Micrita, Ga: Gasterópodo, Es: Esparita, Dl: Dolomita, Qz: Cuarzo. XPL. (E) Pf: Porosidad por fractura, Et: Superficie estilolítica. PPL. (F) Os: Ostreido, Ms: Microesparita, Mc: Micrita. PPL.

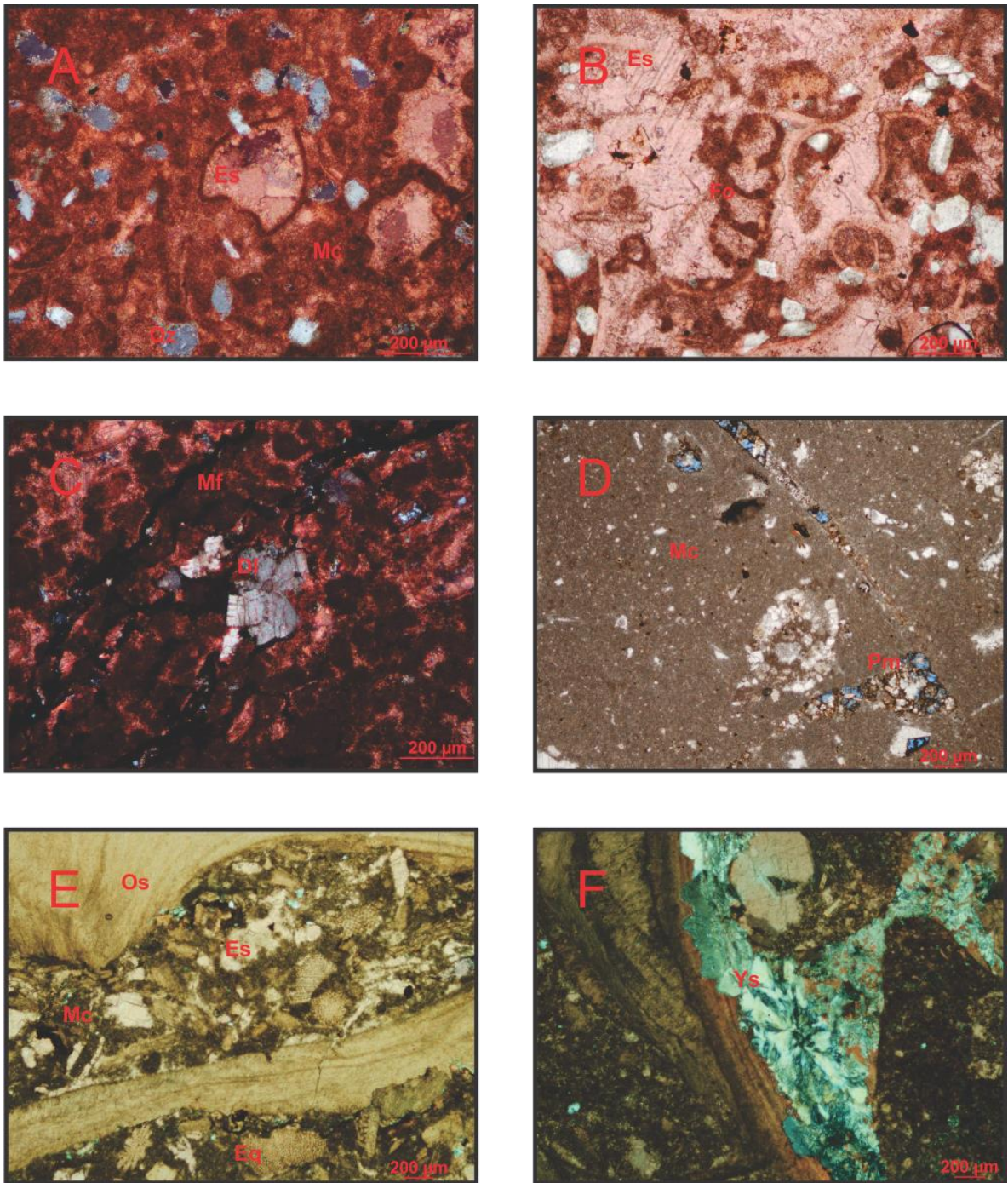


Figura 17. Características petrográficas y algunos aloquímicos representativos observados en las secciones delgadas de la Formación Rosablanca. (A) Es: Esparita, Mc: Micrita, Qz: cuarzo. XPL. (B) Es: Esparita, Fo: Foraminífero. XPL. (C) Dl: Dolomita, Mf: Material ferruginoso. XPL. (D) Mc: Micrita, Pm: Porosidad móldica. PPL. (E) Os: Ostreido, Mc: Micrita, Es: Esparita, Eq: Equinodermo. PPL. (F) Ys: Cristales de yeso. XPL.

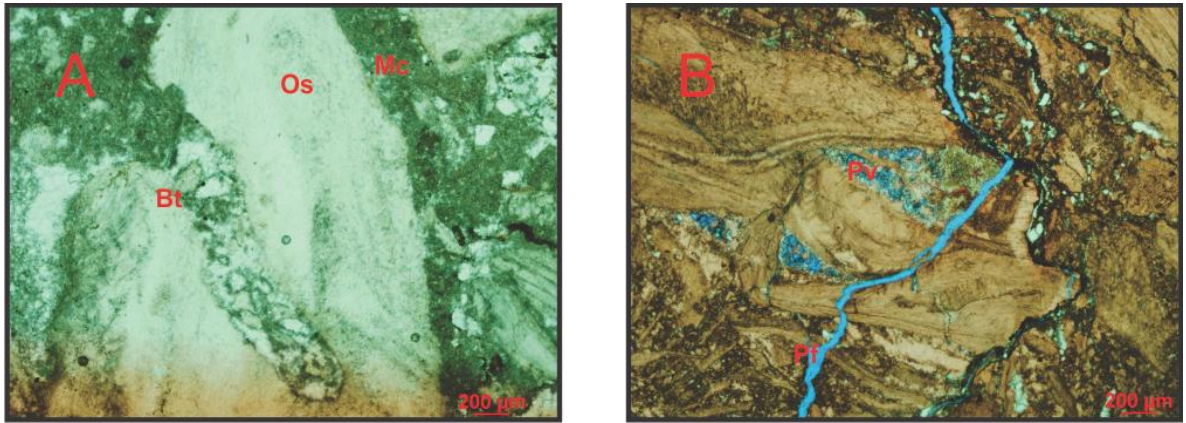


Figura 18. Características petrográficas y algunos aloquímicos representativos observados en las secciones delgadas de la Formación Rosablanca. (A) Os: Ostreido, Mc: Micrita, Bt: Bioturbación. PPL. (B) Pv: Porosidad Vugular. PPL

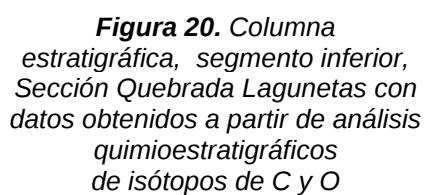
7.3. Quimioestratigrafía

7.3.1. Quimioestratigrafía de isótopos estables de Carbono y Oxígeno

En la **Tabla 2** se presentan los valores y la curva resultante a partir de análisis isotópicos de carbono y oxígeno que fueron realizados en las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca. Las **Figuras 19, 20 y 21** presentan la variación estratigráfica de las composiciones isotópicas de C y O en las secciones estudiadas.

Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
RB 02	-13,34	-6
RB 03	-3,53	-6,64
RB 04	-11,14	-9,09
RB 05C	-4,25	-7,21
RB07C	-3,9	-7,3
RB 08C	-1,26	-3,61
RB 09C	-1,37	-7,07
RB 10C	-0,63	-6,49
RBL 1	-6,19	-11,97
RBL 2	-2,74	-9,94
RBL 3	-3,94	-10,24
RBL 4	-4,37	-10,01
RBL 5	-6,43	-11,36
RBL 6	-10,32	-4,6
RBL 7	-8,46	-7,28
RBL 8	-6,98	-7,9
RBL 9	-4,29	-7,19
RBL 10	-2,57	-7,03
RBL 11	-1,23	-6,38
RBL 12	-0,41	-7,08
RBL 13	0,14	-6,69
RBL 14	0,21	-6,25
RBL 15	0,29	-6,25
RBL 16	0,41	-6,28
RBL 17	0,55	-6,09
RBL 18	0,72	-6,46
RBA 19	0,16	-7,14
RBA 20	0,52	-6,7
RBA 21	-1,13	-6,35
RBA 22	-0,5	-6,93
RBA 23	-4,01	-6,39
RBA 24	-0,33	-6,98
RBA 25	-0,72	-6,73
RBA 26	-3,95	-5,53

Tabla 2. Datos quimioestratigráficos de isótopos de Carbono y Oxígeno de las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca.



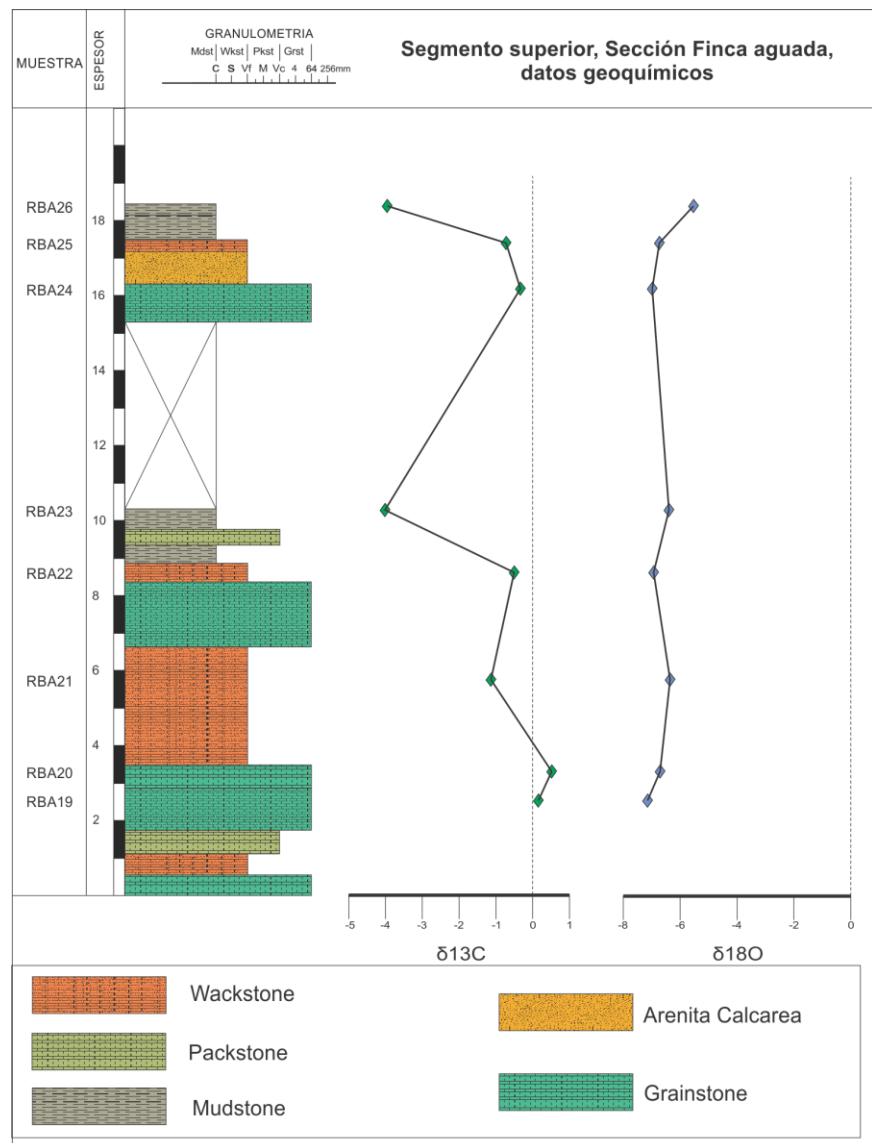


Figura 21. Columna estratigráfica, segmento superior, Sección Finca Aguada con datos obtenidos a partir de análisis quimioestratigráficos de isótopos de C y O.

7.3.2. Quimioestratigrafía de isótopos de estroncio

La **Tabla 3** reporta los valores y la curva resultante a partir de análisis isotópicos de estroncio que fueron realizados en las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca. Las **Figuras 22 y 23** muestra la variación estratigráfica de los valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Muestra	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
RBL 2	0,707302
RBL 4	0,70731
RBL 8	0,707369
RBL 14	0,707401
RBA 20	0,707504
RBA 23	0,707521
RBA 25	0,7075113

Tabla 3. Datos quimioestratigráficos de isótopos de Estroncio de las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca.

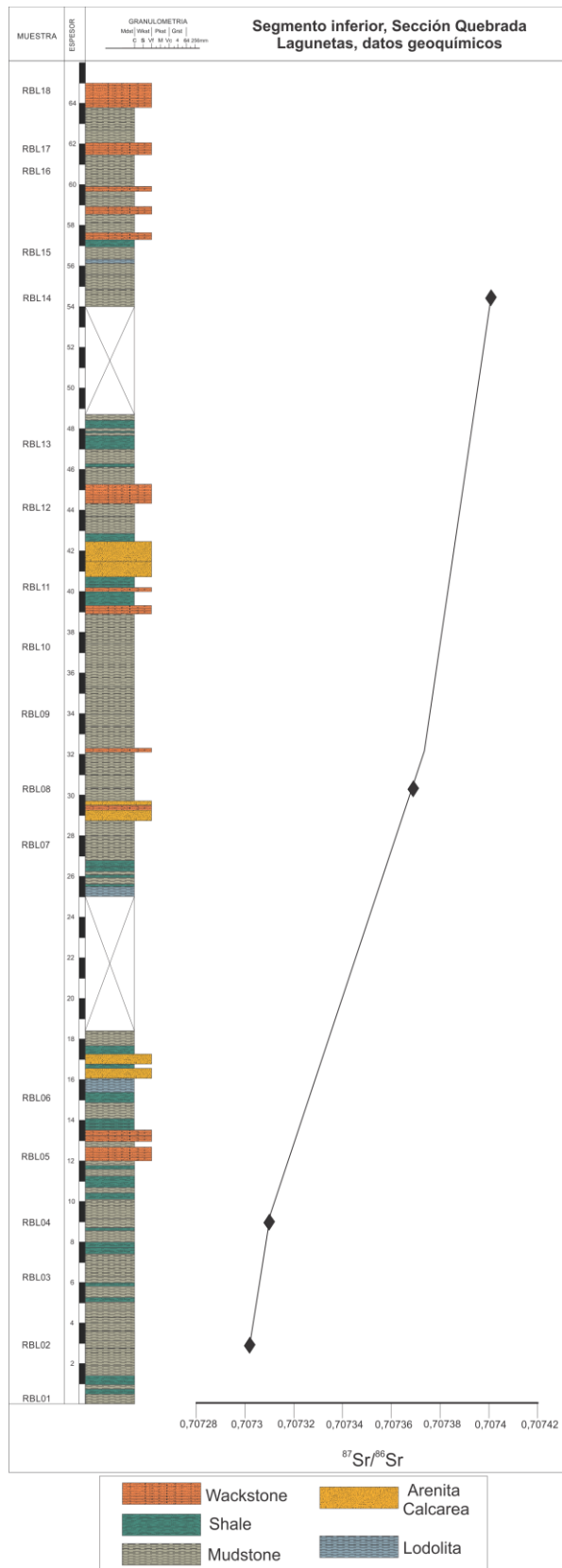


Figura 22. Grafica de los datos obtenidos a partir de análisis quimioestratigraficos de isótopos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, para la sección Quebrada Lagunetas.

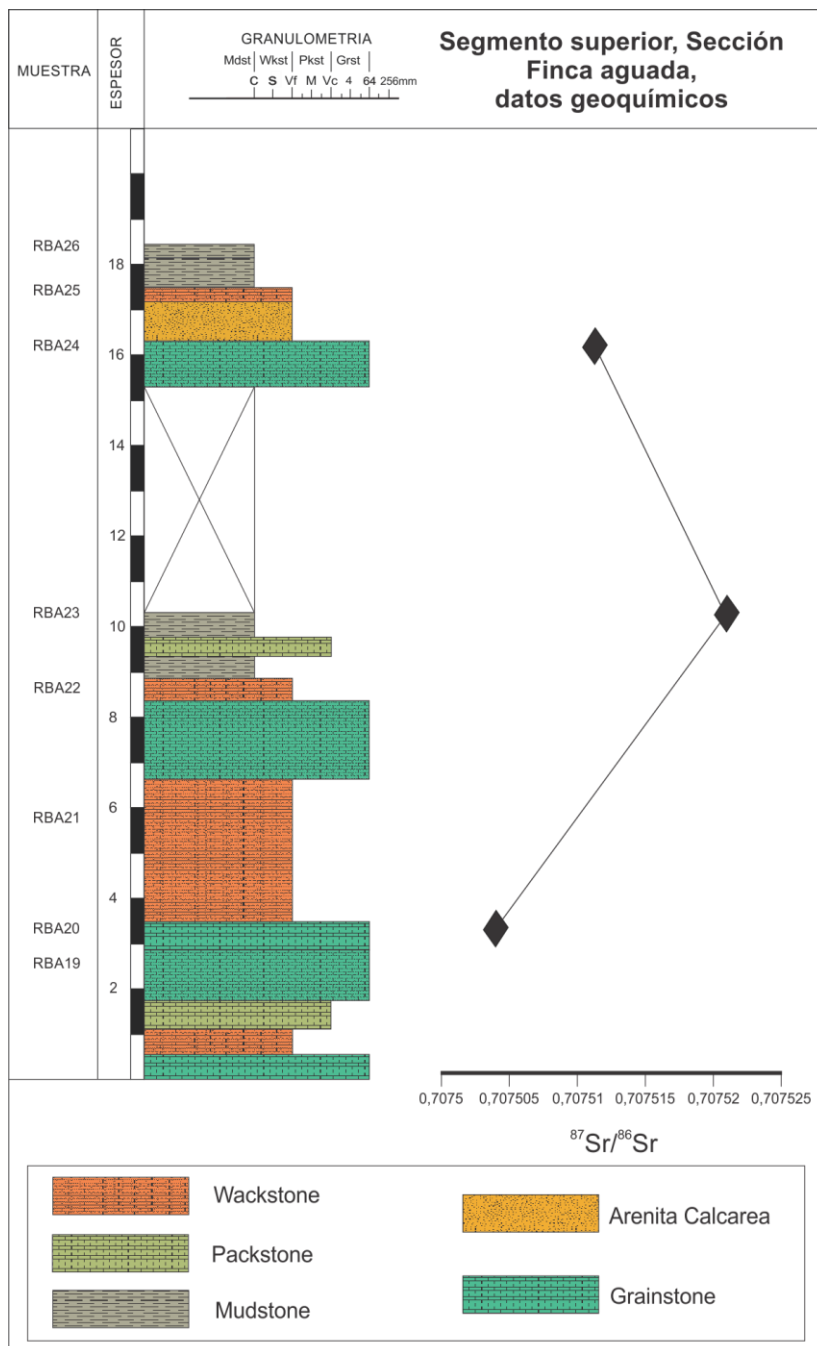


Figura 23. Grafica de los datos obtenidos a partir de análisis quimioestratigraficos de isótopos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, para la sección Finca Aguada.

8. INTERPRETACIÓN

8.1. Paragénesis de carbonatos

8.1.1. Ambiente sedimentario de la sección estudiada

La sucesión estratigráfica de la Quebrada Lagunetas inicia con un paquete de mudstone masivo con un espesor aproximado de 12 m desde la base, con presencia de moluscos, ostrácodos y foraminíferos. Esta litología y la fauna fósil se asocian generalmente a zonas someras y aguas tranquilas (Flügel, 2004). A medida que se avanza en la sucesión se encuentran unos paquetes de wackestone y arenitas calcáreas los cuales indican un descenso en el nivel del mar. Luego en el metro 29 se vuelve a evidenciar una disminución en la energía y a predominar la tendencia granodecreciente representada por paquetes de mudstone, suprayacido por un paquete de arenita calcárea intercalada con wackestone conteniendo gran cantidad de ooides y con aporte de material terrígeno como cuarzo. La tendencia general en esta sección es presentar periodos de sedimentación fina los cuales son asociados a ambientes de baja energía que se ven interrumpidos por cortos periodos de sedimentación de partículas de granulometría gruesa que están representadas por arenitas y wackestone.

Comparando la sección de la Quebrada Lagunetas con la sección La Cascada (ambas del segmento inferior), se observa que hay una correlación en los ciclos estratigráficos los cuales corresponden a variaciones granodecrecientes y granocrecientes (**Figura 24**). En la Quebrada Lagunetas los ciclos estratigráficos representan la intercalación entre mudstone y wackestone y en la sección La Cascada están representados por la intercalación entre packstone y wackestone (**Figura 24**). Esto Sugiere que la sección la Cascada estaba más somera que la sección Lagunetas, posiblemente en un alto de basamento dentro de la cuenca (**Figura 25B-1**) y que la sección Q. Lagunetas estaba afectada por fallas de

crecimiento y tenía mayor velocidad de subsidencia pudiendo acumular mayor porcentaje de sedimento en el mismo periodo de tiempo, esto a su vez explica el cambio lateral de facies (**Figura 25B-2**)

Hacia el segmento medio y superior (secciones Q. El Gachal y Finca Aguada) de la Formación Rosablanca, se comienza a evidenciar el predominio de facies wackestone – packstone- grainstones, demostrando la transición de una zona moderadamente profunda a una zona somera. Esto es corroborado por el aumento de la granulometría relacionado a una tendencia granocreciente, con predominio de fósiles como moluscos tipo Cuculae, Ostreidos y Trigonias, equinodermos y algas los cuales sugieren una sedimentación en un ambiente somero con relativamente alta energía y afectada por la acción del oleaje (Flügel, 2004) (**Figura 25B-3**). Esto se puede confirmar en las secciones delgadas donde se encuentran gran cantidad de aloquímicos fosilíferos fragmentados.

La presencia de mudstone y shale en la base de la sucesión indica sedimentación de grano fino en la parte más profunda de la plataforma (Flügel, 2004). Posteriormente se evidencia un aumento de energía seguido de una tendencia granocreciente vinculado a una transición de una zona relativamente profunda a una un poco más somera (somerización de la cuenca). Esto se evidencia por el aumento de facies gruesas hacia el techo de la secuencia.

Por lo anteriormente dicho se establece para la base de la Formación Rosablanca un ambiente de baja energía, y hacia el techo un ambiente de alta energía asociados a una plataforma carbonatada epírica de poca profundidad la cual estaba siendo afectada por una fuerte subsidencia lo que le permitió acumular gran cantidad de material carbonático. (**Figura 25A**)

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ arrojados por los carbonatos de la Formación Rosablanca son muy bajos comparados con los encontrados en otros carbonatos de la misma edad depositados a nivel mundial (ver discusión de la edad en siguiente ítem).

Correlación Quimioestratigráfica Sección La Cascada y Sección Quebrada Lagunetas

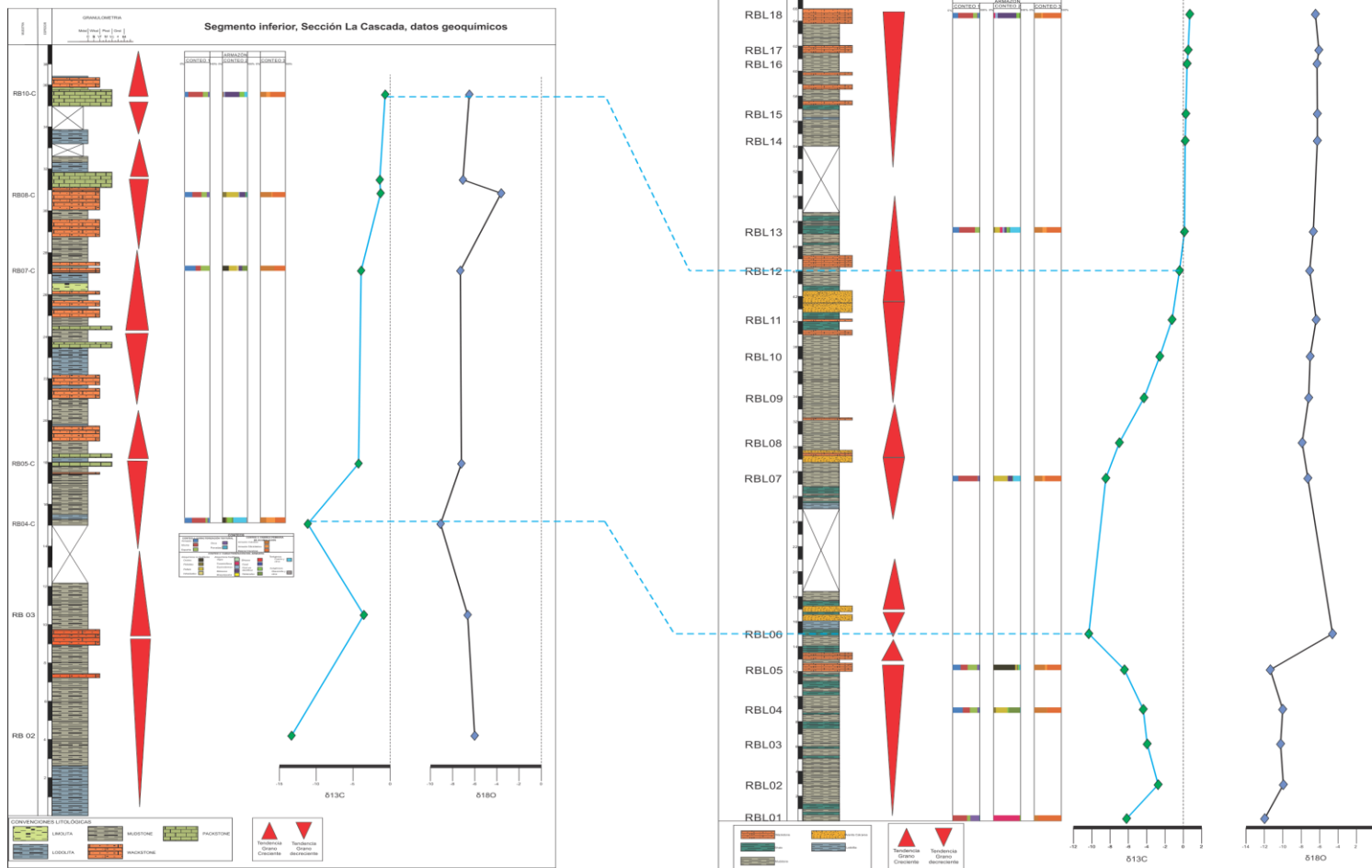


Figura 24. Correlación quimioestratigráfica de las secciones del segmento inferior (Sección La Cascada a la izquierda, Sección Quebrada Lagunetas a la derecha), se puede observar que hay una correlación de los valores isotópicos y los ciclos estratigráficos.

Los valores bajos sugieren la depositación en ambientes carbonaticos semirestricto. Estos ambientes se relacionan a zonas de baja oxigenación y de altos niveles de materia orgánica y baja productividad. Se sugiere que la sedimentación de la Formación Rosablanca en el sector de La Mesa de Los Santos y Zapatoca, donde se han propuesto ambientes tipo lagoon o sabkha (Alfonso -Pava, 1985), ocurrió en una zona semirestringida de mar epírico.

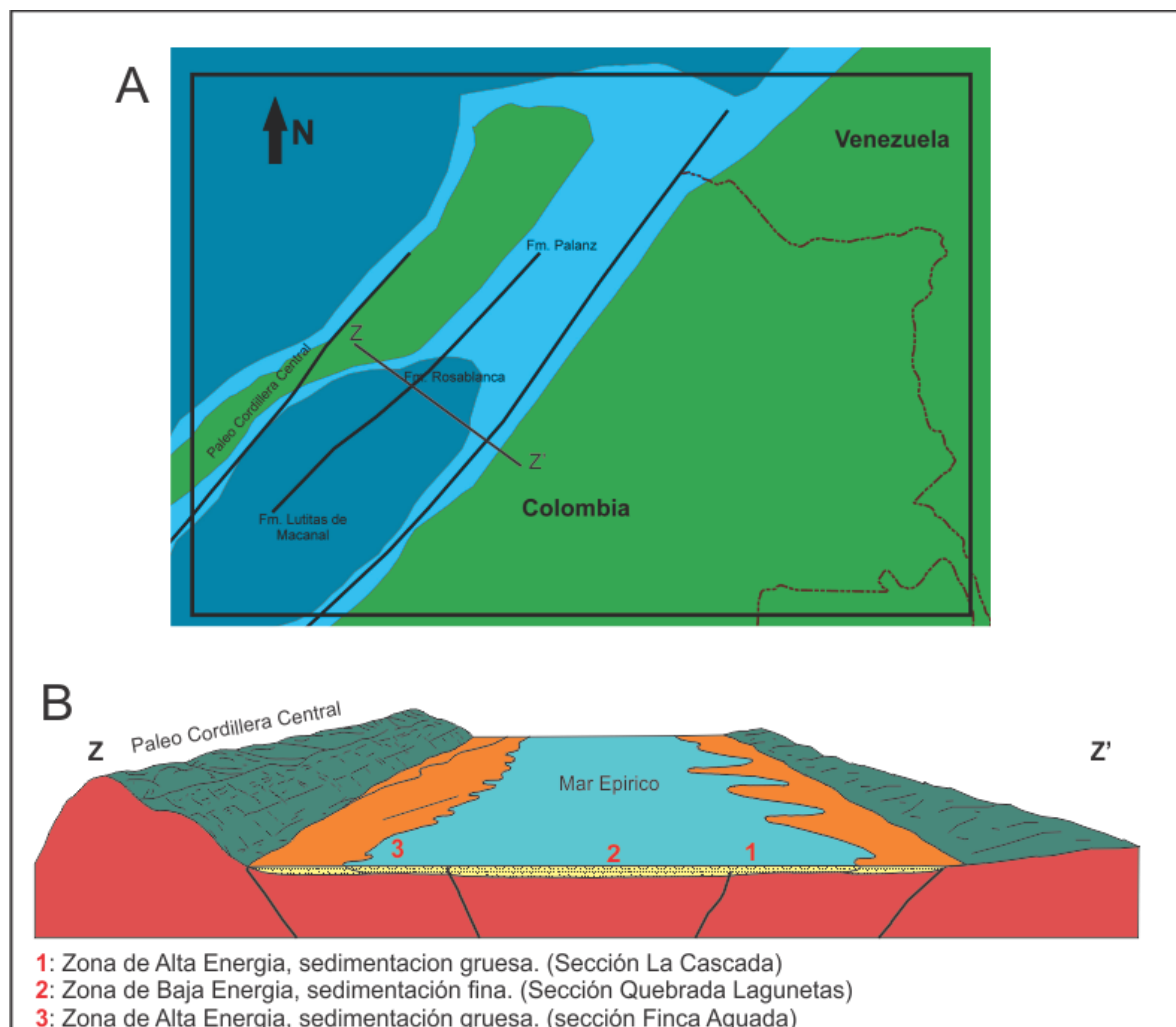
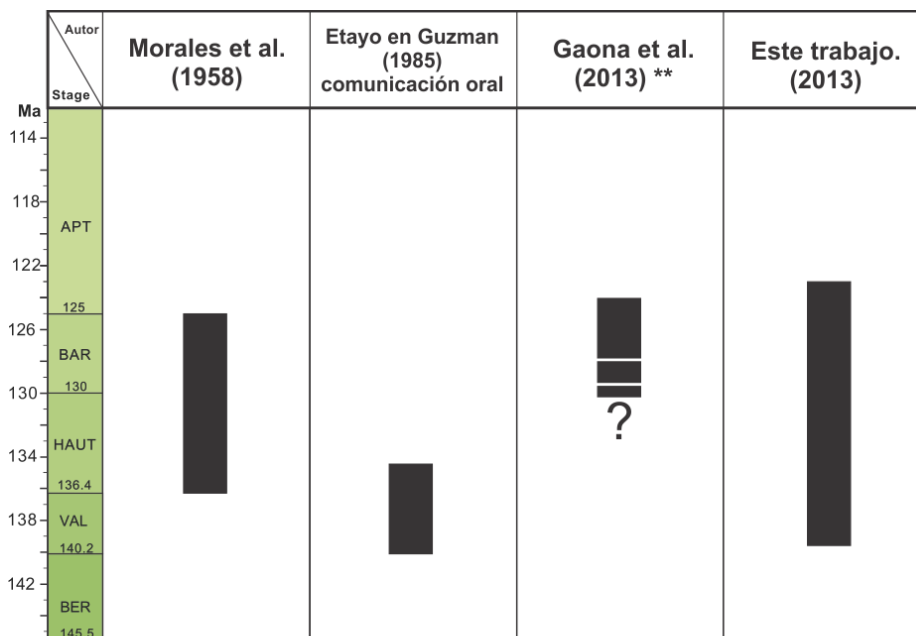


Figura 25. (A) Mapa paleogeográfico para el mar epírico donde se depositó la Formación Rosablanca. Tomado y modificado de Moreno- Sánchez., Pardo- Trujillo.2003. (B) Interpretación del modelo ambiental para la sedimentación hacia la base de la Formación Rosablanca.(1) Zonas de alta energía, en un alto de basamento dentro de la cuenca y (2) Zonas de baja energía, mayor profundidad de la plataforma epírica asociado a una alta subsidencia, (3), Zonas de alta energía cerca de la línea de costa.

8.2. Quimioestratigrafía

8.2.1. Edad

Las muestras analizadas con isotopía de Estroncio arrojaron valores que van desde 0,707302 a 0,7075113 base y techo respectivamente (**Tabla 3**). Distintos autores han propuesto diferentes edades para la Formación Rosablanca basados en análisis bioestratigráficos (**Figura 26**). Los valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtenidos para la Formación Rosablanca fueron graficados y comparados con la curva global de isótopos de Estroncio para el agua de mar en el Cretácico (Bralower *et al.*, 1997), teniendo como resultado un rango de edad de sedimentación que va desde Valanginiano hasta Aptiano Inferior para la secuencia carbonática de la Formación Rosablanca, en La Mesa de Los Santos y Zapatoca. (**Figura 27**).



** Este autor propone una edad de Barremiano medio a superior - Aptiano inferior, para el límite entre la Fm. Rosablanca y la Fm. Paja.

Figura 26. Compendio de edades dadas por diferentes autores para la Formación Rosablanca en la zona de Zapatoca y Mesas.

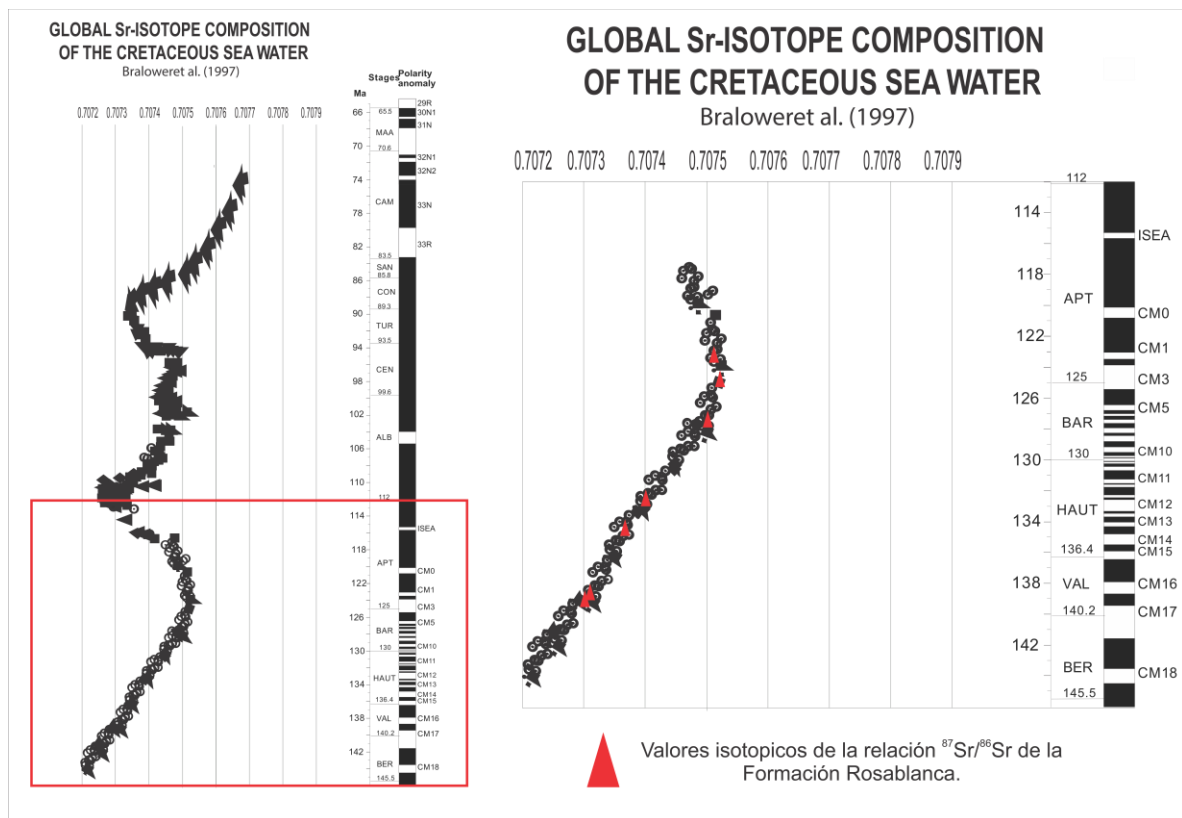


Figura 27. Representación de los valores isotópicos de Sr de la Formación Rosablanca en relación con el comportamiento de los isótopos de Sr en el agua de mar durante el Cretácico.

8.3. Identificación del evento anóxico oceánico del Cretácico Inferior (Weissert)

Las Figuras 18 y 19 muestran que las curvas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ presentan tendencias muy paralelas. La curva de $\delta^{13}\text{C}$ evidencia para ambas secciones una excursión positiva que va en incremento en la base de las secciones con valores que van desde -6,19 a -2,74 para la sección Quebrada Lagunetas y -13,34 a -3,53 para la sección La Cascada. Calibrando estas curvas isotópicas con la edad registrada en la composición isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, esta excursión positiva podría representar el evento anóxico oceánico Weissert de edad Valanginiano - Hauteriviano, donde la química del agua de mar para esta cuenca restringida reflejaría el cambio

isotópico a nivel global. Los valores isotópicos tan bajos pueden relacionarse a la baja productividad biológica en la cuenca, debido a su configuración semirestricta, donde pocos organismos pueden sobrevivir debido a la falta de oxígeno en el medio. A medida que se va registrando este evento anóxico, la productividad primaria aumenta a nivel global, lo cual se ve reflejado en la expresión isotópica, donde los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ aumentan. El aumento en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ por tanto sugieren que el evento anóxico Weissert respondió a un aumento de productividad primaria del océano, lo cual llevo a una disminución en su oxigenación .

Por otra parte, se propone que en el techo de la Formación Rosablanca se pudo haber registrado la firma isotópica del evento anóxico Faraoni y la excursión isotópica asociada al evento anóxico oceánico OAE1a. Esta hipótesis se basa en las excursiones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ donde a la base de la sección Finca Aguada se inicia con valores positivos (0,16‰ a 0,52‰), seguida de una excursión negativa (-4,01‰) donde se vuelve a presentar una excursión positiva seguida de una nueva excursión negativa (-0,33‰ a -3,95‰) (**Figura 21**). Calibrando estas muestras con los valores isotópicos de Sr y los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ globales, se observa que la sección Finca Aguada registra la misma tendencia global entre el Barremiano superior y el Aptiano inferior (**Figura 28**). Esto concuerda con la edad propuesta por Gaona *et al.*, (2013), la cual da un rango de edad para el límite entre la Formación Rosablanca y la Formación Paja de Barremiano Superior a Aptiano Inferior. En su trabajo, Gaona *et al.*, (2013) proponen que la suprayacente Formación Paja no registró el evento anóxico oceánico OAE1a y que este evento pudo estar registrado en un estrato condensado fosfatado el cual toma como límite de la Formación Rosablanca. Estos autores también sugieren que dicho evento no se registró por un periodo de no sedimentación en la zona que estudiaron. De acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo, la Formación Rosablanca en el sector de Zapatoca tiene un rango de edad hasta el Aptiano Inferior; al comparar la curva local de variaciones de $\delta^{13}\text{C}$ con la curva global, se puede observar una



correlación de la curva local con la curva global para dicha época que registra la misma firma isotópica, donde se identifica el evento anóxico oceánico OAE1a.(Figura 28).

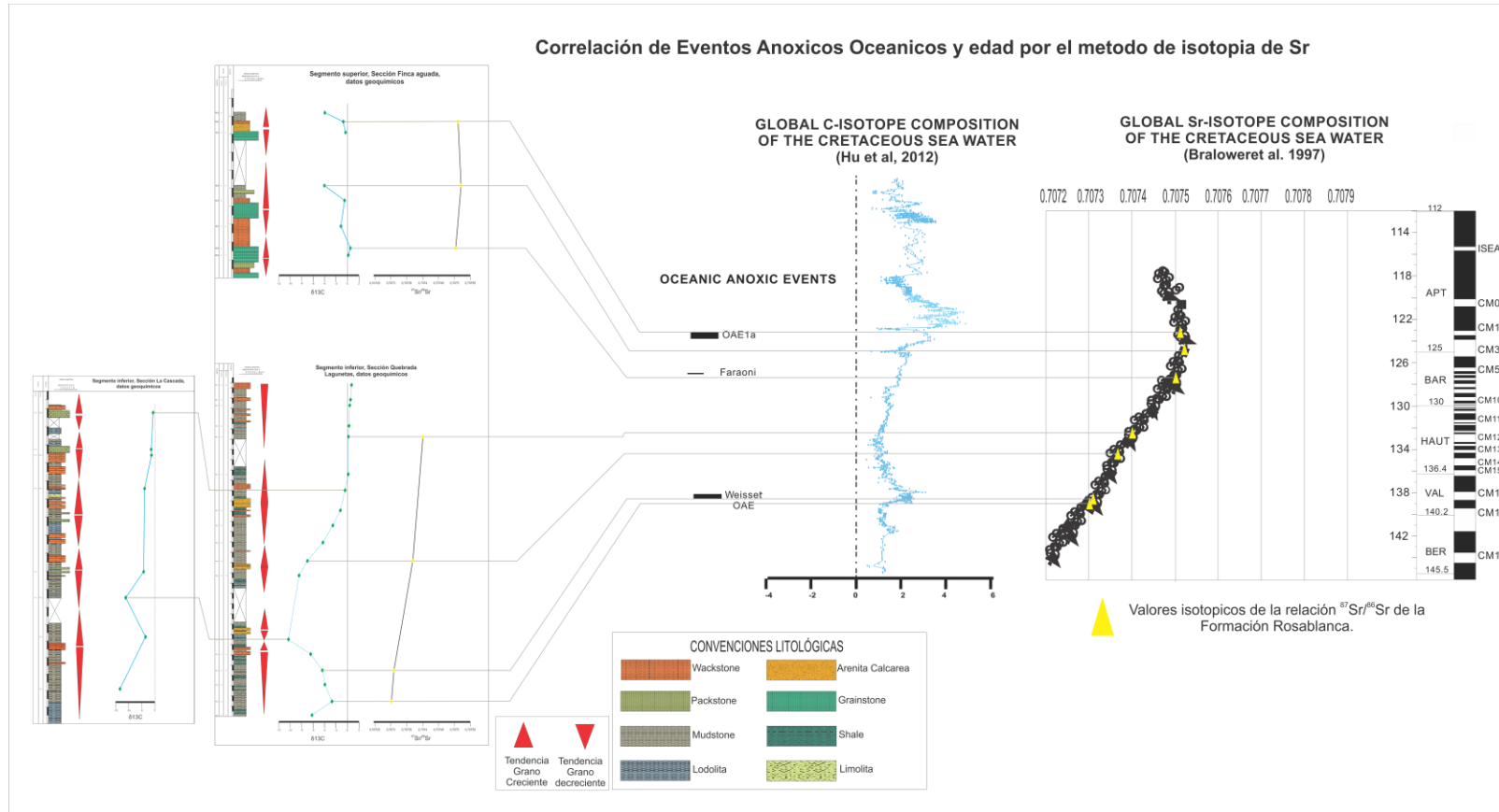


Figura 28. Identificación de los Eventos Anóxicos Oceanicos registrados en las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca.

8.4. Diagénesis

La diagénesis es el conjunto de procesos químicos, físicos y biológicos que transforman los sedimentos en rocas sedimentarias. Este proceso se inicia justo después de la depositación y se acentúa durante el enterramiento del sedimento (Vera-Torres, 1994., Flügel, 2004). Estos procesos ocurren a temperaturas relativamente bajas, por lo general debajo de 250°C aproximadamente (Nichols, 2009).

Los principales procesos diagenéticos a los que se ven expuestas las rocas carbonatadas son la micritización, disolución y cementación, compactación, dolomitización, y el reemplazamiento de los granos de carbonato y la matriz por minerales que no son carbonatos (e.g silicificación y chertificación) (Flügel, 2004). Los principales controles sobre la diagénesis de los carbonatos son la mineralogía, la química del agua intersticial, el movimiento del agua, la disolución y precipitación y la interacción con sustancias orgánicas (MacInnys and Brantley 1992, en Flügel, 2004).

En el estudio petrográfico realizado en las secciones delgadas de la Formación Rosablanca, se observó que la mayoría de aloquímicos como pellets, peloides y ooides están compuestos principalmente por material micrítico; en algunas conchas de bivalvos que conservan su estructura original se observan procesos de bioturbación (**Figura 29 A**), estos procesos se podrían asociar a características relictas de una fase diagenética inicial; eodiagénesis (Scholle and Ulmer, 2003).

Las muestras analizadas muestran señales de compactación física y química, evidenciada por superficies estilolíticas (química)(**Figura 29 B**) y los contactos entre los constituyentes de la roca (Cóncavo-convexo, suturados, puntuales)(**Figura 29 C**), además de la deformación de los granos y la ruptura de aloquímicos (física). Estas características asocian a una fase diagenética de

enterramiento; mesodiagénesis (Scholle and Ulmer, 2003). Apoyando esta idea también está la presencia de material esparítico reemplazando aloquímicos y cementando la roca (cemento esparítico tipo equan y sintaxial), además se observa dolomita tipo saddle, la cual es característica de esta fase diagenética.

En las secciones delgadas analizadas en la Formación Rosablanca, se evidenció el predominio de carbonato tipo calcita respecto al tipo dolomita. La calcita se encuentra recristalizada por cemento esparítico y microesparita tipo equant y sintaxial. Este material se encuentra reemplazando aloquímicos, rellenando fracturas y poros al igual que el material micrítico que se encontró como matriz en las secciones. Los cristales de dolomita se presentan en forma subhedral y en su mayoría se encuentran asociados a microfracturas, superficies estilolíticas, reemplazando el cemento esparítico y en un caso puntual se encuentra rompiendo la fábrica actuando como matriz de la roca. Este mineral se puede observar con mayor facilidad hacia la base de la formación. (**Figura 29 D**). Estas características sugiere la acción de diagénesis por enterramiento; telodiagenesis (Scholle and Ulmer, 2003).

Es importante resaltar que la dolomita también se encuentra en forma euhedral en algunos intraclastos de la sección Quebrada Lagunetas, mientras que en la sección La Cascada se encuentra a lo largo de toda la sección (**Figura 29 E**). Esto sugiere que los intraclastos dolomitizados en la sección Quebrada Lagunetas fueron retrabajados sindepositacionalmente de la sección La Cascada, la cual se depositó en zonas más someras. Este proceso de retrabajamiento intercuenca de los carbonatos explica la inexistencia de dolomita en los otros componentes y matriz de los carbonatos de la sección Quebrada Lagunetas.

Posterior a estos eventos, las rocas sufrieron una etapa de exhumación relacionada a la telodiagénesis, en la cual se pueden observar efectos como la disolución en los granos y/o material intersticial formando porosidad secundaria en



la roca (vugular)(**Figura 29 F**), también se presentan fracturas en las rocas, las cuales se encuentran rellenas por diferente tipo de materiales como esparita, dolomita y óxidos de hierro. Procesos de silicificación se hacen presentes en menor proporción en las rocas.

En la **Figura 30**, se presenta una interpretación de los principales procesos diagenéticos que actuaron en las rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca.

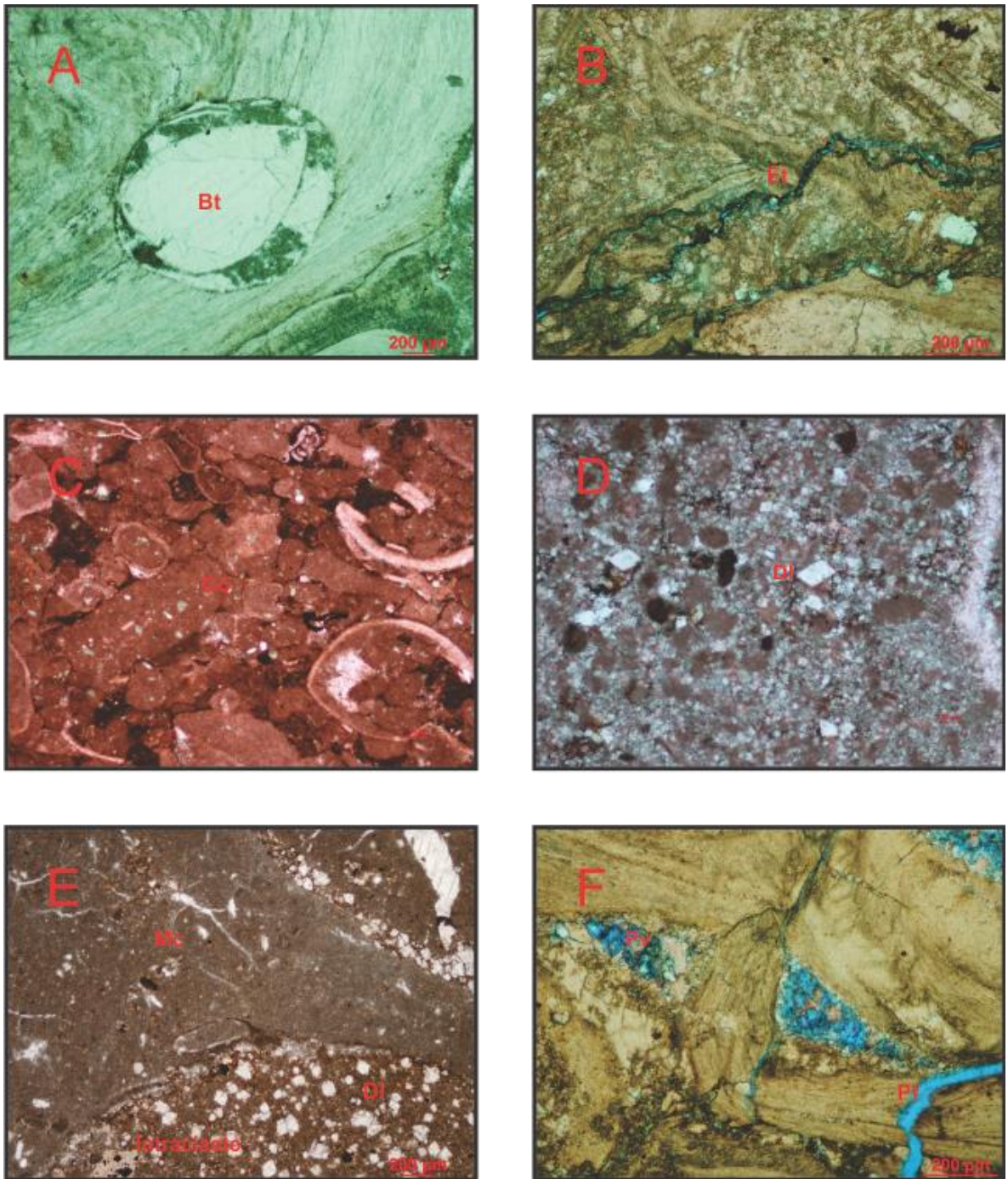


Figura 29. Principales procesos diagenéticos observados en las rocas de la Formación Rosablanca., (A) Procesos de bioturbación en la diagénesis temprana, (B) superficies estilolíticas, (C) Compactación mecánica de la roca, (D) Dolomitización, (E) Intraclasto con dolomita, (F) Porosidad vugular asociada a disolución.

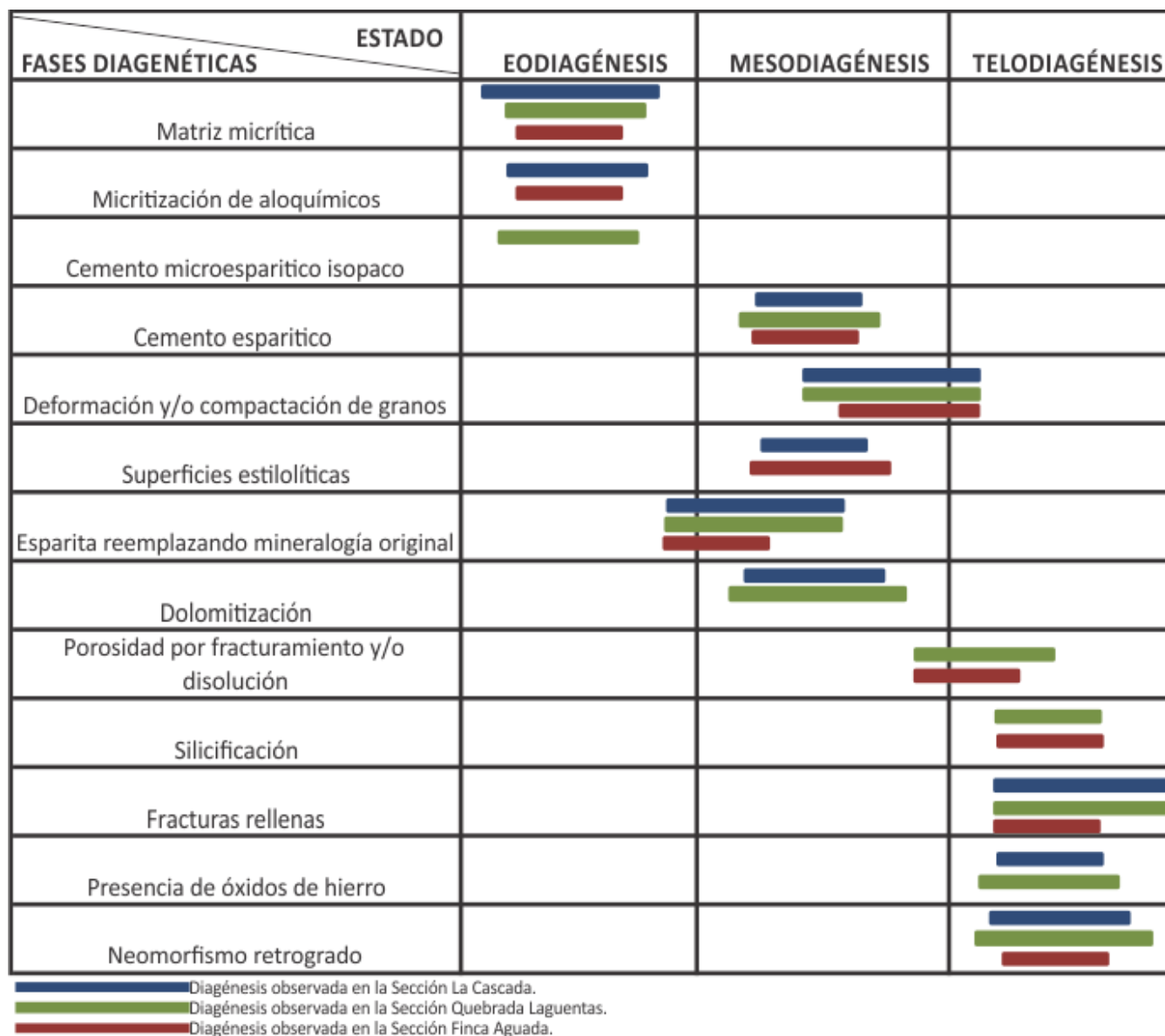


Figura 30. Interpretación diagénética de las sucesiones carbonáticas de la Formación Rosablanca.

9. CONCLUSIONES

- A partir de análisis petrográficos y sedimentológicos para la Formación Rosablanca, se estableció un ambiente de sedimentación en una plataforma carbonatada epírica de poca profundidad, afectada por una rápida subsidencia lo que le permitió acumular gran cantidad de material carbonático.
- Los valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ que van hasta $-13,34\text{‰}$, indican una semirestricción importante en la cuenca, lo que corrobora la interpretación ambiental realizada con análisis sedimentarios y petrográficos.
- Se le atribuye una edad Valanginiano – Aptiano Inferior a la Formación Rosablanca, determinada por los valores de isótopos de Estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) que van desde 0,707302 a 0,7075113.
- La excursión positiva de los isótopos de $\delta^{13}\text{C}$, en las secciones Lagunetas y La Cascada registran el evento anóxico oceánico Weissert en la Formación Rosablanca.
- Se plantea que en la parte superior de la Formación Rosablanca, en la sección Finca Aguada se podría registrar la fase final del evento anóxico oceánico Faraoni y las fases isotópicas iniciales del evento anóxico oceánico OAE1a.
- La interpretación de la paragénesis diagenética en las secciones delgadas, determinó que la suceción de rocas carbonáticas de la Formación Rosablanca, registró las 3 fases diagenéticas (Eodiagénesis, mesodiagénesis y telodiagénesis).

10.RECOMENDACIONES

- Realizar levantamientos de columnas estratigráficas en otros sectores de la Cordillera Oriental, donde aflore la Formación Rosablanca y sucesiones lutíticas correlacionables (e.j. Lutitas de Macanal) para confirmar la ocurrencia regional de los eventos anóxicos oceánicos del Cretácico Inferior.
- Se recomienda llevar a cabo análisis de multi-elementos y catodoluminiscencia para esclarecer los procesos diagenéticos que puedan explicar muchas de las propiedades petrofísica de las sucesiones carbonatadas, y pueden determinar así, su valor como posibles rocas de un yacimiento.
- Es recomendable realizar análisis quimioestratigráficos en la Formación Paja para determinar el registro de posibles eventos anóxicos como el OAE1a que se pudieron registrar durante el Cretácico en esta formación.
- Se sugiere realizar dataciones de U-Pb en los carbonatos y circones de la Formación Rosablanca, para contribuir al entendimiento del tiempo de apertura de las cuencas cretácicas en Colombia.

11. BIBLIOGRAFIA

Alfonso-Pava, C.A., 1985. Los episodios evaporíticos de la Formación Rosablanca. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas ,16, Capítulo XVI, pp. 1-19.

Arnett, D.,1996. Supernovae and Nucleosynthes. Princeton University, Princeton, New Jersey.Bodin, S.E., 2006. The late Hauterivian Faraoni oceanic anoxic event in the western. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 235, pp. 245 – 264.

Bralower, T.J., Fullagar, P.D., Paull, C.K., Dwyer, G.S., Leckie, R.M., 1997. Mid-Cretaceous strontium-isotope stratigraphy of deep-sea sections. Geological Society of America. Bulletin, 109.

Cediel, F., 1968. El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional. Boletín Geológico, 5, Capítulo XVI, pp. 5-96.

Clavijo, J., 1985. Secuencia facial de la Formación Los Santos por la Quebrada Piedra Azul: Registro de una hoya fluvial evanescente. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, 16, Capítulo IV, pp. 1-18.

Cooper, M. A., Addison, F. T. Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A., 1995. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. The American Association of Petroleum Geologists. Bulletin, V. 79,10 , pp. 1421–1443.



Craig, H., 1957. Isotope standard for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometry analysis of carbon dioxide. *Geochim Cosmochim. Acta* 12, pp. 133-149.

Dunham, R., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. -Classification of carbonate rocks, a symposium. American Association of Petroleum Geologist. Memoir 1. Tulsa, Oklahoma.

Etayo, F., Rodríguez, G.I., 1985. Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, 16, Capítulo XXVI. pp. 1-12.

Föllmi, K. B., 2011. Early Cretaceous life, climate and anoxia. *Cretaceous Research*, 35. pp. 230 – 257.

Flügel, E., 2004. Microfacies of carbonate rocks, analysis, interpretation and application. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 996.

Gaona-Narvaez, T., Maurrasse, F.J,M-R., Etayo-Serna,F., 2013. Geochemistry, palaeoenvironments and timing of Aptian organic-rich beds of the Paja Formation (Curití, Eastern Cordillera, Colombia).Geological Society, London, Special Publications, First published. doi 10.1144/SP382.6.

Golonka, J., Bocharova, N.Y., 2000. Hot spot activity and the break-up of Pangea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161, pp. 49–69.

Guzmán, G., 1985. Los Griferidos Infracretácicos *Aetostreon couloni* y *Ceratostreon boussingaulti*, de la Formación Rosablanca, como Indicadores de Oscilaciones Marinas. Proyecto Cretácico, Publicaciones Geológicas especiales del Ingeominas, 16, Capítulo XI, pp. 1-16.



Hincapié, G., Moreno-Sanchez, M., 2010. Estudio de isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) en los depósitos Cretáceos-Terciarios de la Cordillera Oriental. Universidad de Caldas, pp. 63-66.

Hu, X., Wagreich, M., Yilmaz, I.O., 2012. Marine rapid environmental/climatic changes in the Cretaceous greenhouse world. *Cretaceous Research*, 38, pp. 1- 6.

Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J., 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161, pp. 37 – 57.

Julivert, M., 1958. La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de geología*, 1, pp. 7 – 44.

Julivert, M., Barrero, D., Navas, G., 1964. Geología de la Mesa de Los Santos. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de geología*, 18, pp. 5-11.

Laverde, F., 1985. La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del Cretácico. Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, 16, Capítulo XX, pp. 1-22.

Laverde, F., Clavijo, J., 1985. Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tu y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, 16, Capítulo VI, pp. 1-9.

Martín-Chivelet, J., 2010. Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18.1, pp. 33- 46.

McArthur, J.M., Howarth, R.J., Shields, G.A., 2012. Strontium Isotope Stratigraphy. In: Gradstein, F. M., Ogg, J.G., Schmitz, M., Ogg, G. *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, pp. 127- 144.



Morales, L.G., 1958. General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In *habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. pp. 641-695. Tulsa.

Moreno-Sanchez, M., Pardo-Trujillo, A., 2003. Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, p. 891– 924.

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley – Blackwell, 2nd., pp. 1-432.

Pons, D., 1982. Etude paleobotanique et palynologique de la Formation Girón (jurassique moyencretace inferieur) dans la region de Lebrija, Departamento de Santander, Colombie. *Nat. Savantes Brest. Sci. Jasc.1*, pp. 53-78.

Price, G.D., Twitchett, R.J., Wheeley, J.R., Buono, G., 2013. Isotopic evidence for long term warmth in the Mesozoic. *Nature – SR 3(1438)*, pp. 1-5.

Saltzman, M.R., Thomas, E., 2012. Carbon Isotope Stratigraphy. In: Gradstein, F. M., Ogg, J.G., Schmitz, M., Ogg, G. *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, pp. 207 – 232.

Silva, J. C., Sial, A. N., Ferreira, V. P. Y. Pimentel, M. M., 2005. C and Sr isotope stratigraphy of the São Caetano Complex, northeastern Brazil: A contribution to the study of the Meso- Neoproterozoic seawater geochemistry. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 140, 142-149.

Schlanger, S.O., Jenkyns, H.C., 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*. 55, pp. 79-184.



Scholle, P. A., Ulmer-Scholle, D. S., 2003. A color guide to the petrography of carbonate rocks : grains, textures, porosity, diagenesis. Tulsa, Ok.: American Association of Petroleum Geologists, pp. 303-387.

Toussaint., J.F., 1996. Evolución Geológica de Colombia - Cretácico. Universidad Nacional de Colombia. pp 77.

Vera–Torres, J.A., 1994. Estratigrafía. Principios y métodos. Madrid. Editorial Rueda. pp. 806.

Wadleigh, M.A.,1982. Marine Geochemical Cycle of Strontium. University of Ottawa, ON, pp. 187.

Ward, D.; Goldsmith, R.; Cruz, J. & Restrepo, A., 1973. Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Ingeominas, Boletín Geológico ,21, pp. 1- 132.

Zamarreño, D. J., 1963. Estudio Petrográfico de las Calizas de la Formación Rosablanca de la Región de la Mesa de los Santos. Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander. pp. 5-34