RECONSTRUCCIÓN DE LA SUBSIDENCIA Y EVALUACIÓN PALEOGEOGRÁFICA DE LAS POTENCIALES ROCAS GENERADORAS CRETÁCICAS EN LA CORDILLERA ORIENTAL ENTRE LOS MACIZOS DE QUETAME Y SANTANDER.

ADRIANA PATRICIA DUEÑES GARCÉS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
MAESTRIA EN GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2015

RECONSTRUCCIÓN DE LA SUBSIDENCIA Y EVALUACIÓN PALEOGEOGRÁFICA DE LAS POTENCIALES ROCAS GENERADORAS CRETÁCICAS EN LA CORDILLERA ORIENTAL ENTRE LOS MACIZOS DE QUETAME Y SANTANDER.

ADRIANA PATRICIA DUEÑES GARCÉS

Tesis de grado para optar por el título de Magíster en Geología

Director:
GIOVANNY JIMÉNEZ
PhD., Geología

Codirector:
ANDRES ROBERTO MORA BOHORQUEZ
PhD., Geología

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
MAESTRIA EN GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2015

DEDICATORIA

A mi Dios por darme la oportunidad de crecer profesionalmente

A David por ser mi Angel (+)

A mi mami Doris por ser mi ejemplo y mi apoyo siempre

A mis hermanos Julian y Laura por estar siempre conmigo

A Carlos Andrés por su ayuda y compañía en esta aventura.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Andrés Roberto Mora por haberme guiado en este proyecto y proceso de aprendizaje, al Dr. Mauricio Parra a quien doy infinitas gracias por sus horas como profesor de la Maestría y como tutor en el desarrollo del la tesis.

También debo dar las gracias a todos los profesores, de quienes saque el máximo provecho en estos dos años. A mis compañeros y compañeras de carrera por su ayuda y amistad. Les agradezco a mis estudiantes de Pregrado por la colaboración en la etapa de campo de este trabajo y el desarrollo de sus tésis de grado.

Estoy muy agradecida con el Instituto Colombiano del Petróleo por financiar mis estudios de maestría en convenio con la Universidad Industrial de Santander, gracias por depositar su confianza en mí.

Por último agradezco a cada una de las personas que pusieron su grano de arena para el desarrollo éxitoso de este trabajo.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 22
1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE EST UDIO 26
2. OBJETIVO GENERAL 28
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 28
2.2 ABREVIATURAS 28
3. MARCO DE REFERENCIA 31
3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL 31
3.1.1 Marco litológico regional 34
3.2 HISTORIA DEL RIFTING MESOZOICO 38
3.2.1 Historia De Extensión Cretácica. 38
3.3 HISTORIA DE SEDIMENTACIÓN DEL CRETÁCICO 44
4. ANTECEDENTES 53
4.1 ESPESOR DE LAS FORMACIONES FOMEQUE Y CHIPAQUE 53
4.2 COEFICIENTE (β) DE ESTIRAMIENTO DE LA CORTEZA 55
4.3 FLUJOS DE CALOR Y EDADES DE GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE 59
4.4 DATOS GEOQUIMICOS DE LAS FORMACIONES DE ESTUDIO 60
5. METODOLOGÍA 62
5.1 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES 62
5.2 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LITOFACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN. 62
5.3 ELABORACIÓN DEL MAPA PALEOGEOGRÁFICO 63

5.4 HISTORIAS DE SUBSIDENCIA Y CÁLCULO DE LA MAGNITUD DE ESTIRAMIENTO 66
5.5 MODELOS TERMALES 1D DE CARGA DE HIDROCARBUROS 68
5.5.1 Calibración de parametros límite 68
5.5.2 Cinética usada para los modelos 1D 72
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 73
6.1 UBICACIÓN, LITOFACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN DE SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS. 74
6.1.1 Sección compuesta de la Formación Chipaque – Municipio de El Crucero (Boyacá) – Mongua (Boyacá). 74
6.1.2 Sección Formación Chipaque – Municipio de Pajarito (Boyacá) 85
6.1.3 Sección Formación Chipaque – Municipio de Choachí (Cundinamarca) 91
6.1.4 Sección Formación Tibasosa – Tibasosa (Boyacá) 104
6.1.5 Sección compuesta Formación Tibasosa – Municipio de Cuche - Duitama (Boyacá) 114
6.2 MAPA PALEOGEOGRÁFICO DEL CRETÁCICO SUPERIOR 121
6.3 ANÁLISIS DE HISTORIAS DE SUBSIDENCIA Y FACTOR (β) DE ESTIRAMIENTO DE LA CORTEZA. 123
6.3.1 Sección Sur, Chipaque Choachí 125
6.3.2 Sección Chipaque área Pajarito 128
6.3.3 Sección Tibasosa 131
7. ANÁLISIS DE MODELOS 1D PARA LAS FORMACIONES CHIPAQUE Y TIBASOSA 135
7.1 SECCIÓN CHIPAQUE CHOACHÍ 135
7.2 SECCIÓN CHIPAQUE PAJARITO 139
7.3 SECCIÓN TIBASOSA-MUNICIPIO DE CUCHE 143
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 147
BIBLIOGRAFÍA 155
ANEXOS 165

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: principales elementos tectónicos y unidades estratigráficas de la Cordillera Oriental, Valle Medio del Magdalena y Cuenca de los Llanos. FM=Macizo de Floresta. 25
Figura 2. Mapa geológico del área de estudio y ubicación de secciones medidas sobre la Cordillera Oriental. En rojo se observan los sitios de levantamiento de secciones. 26
Figura 3. Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia. Marco tectónico de Colombia y sus principales provincias Geológicas Tectónicas 33
Figura 4. Estratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental. 37
Figura 5. Historia de extensión y deformación de la Cordillera Oriental. 39
Figura 6. Sección de la CEB donde se observa la evolución tectónica del Mesozoico, Neógeno y Cretacico. 41
Figura 7. División tectónica de ECB en el Cretácico Temprano.....42
Figura 8. Diagrama estratigráfico de weeler del BCE, MMB, LlAB y cuencas cercanas. 46
Figura 9. Mapa de distribución de paleo-facies durante el Cretácico en BCE, durante el syn-rift del Cretácico Temprano (Berriasiano a Aptiano) la sedimentación se restringió a grabens limitados por fallas normales. La sedimentación del Cretácico Tardío fue más regional por el aumento de subsidencia durante la fase de subsidencia termal post-rift. Sarmiento-Rojas (2001). 52
Figura 10. mapa de contornos de factores de estiramiento subcortical (β) calculados a partir de modelos de eventos de estiramiento del Berriasiano-Valanginiano (144-127 Ma, Cretacico).....56

Figura 11. mapa de contornos de factores de estiramiento subcortical (β) calculados a partir de modelos de eventos de estiramiento del Aptiano (121 – 102.6 Ma, Cretácico).....57
Figura 12. Ubicación de las áreas piloto Norte y Sur restituidas en 9 tiempos. 64
Figura 13. Perfil actual, el punto azúl indica las coodenadas de la sección actualmente después de la interpolación a la sección 14 del área Norte. 65
Figura 14. Sección restituida a edad Turoniano.....65
Figura 15. Variación de los datos de Ro y Temperatura.....67
Figura 16. Imagen del módulo Global Mean Surface Temparature. 70
Figura 17. Flujos de calor básicos asociados a cuencas sedimentarias.....71
Figura 18. Mapa geológico de ubicación de las 5 secciones medidas en campo. Se observan los puntos de inicio y fin de cada sección 74
Figura 19. Correlación de la base de la Formación Chipaque en el área de trabajo para conocer el espesor de la base 76
Figura 20. Ubicación de sección intermedia y tope Formación Chipaque, Municipio El Crucero, vía Sogamoso – Yopal. 77
Figura 21: Columna compuesta generalizada de la Formación Chipaque – Municipio de El Crucero y Vía La Salina (Boyacá).....79
Figura 22. Fotografía segmento 2, donde se observa una asociación de litofacies de arenitas masivas (Am) sin estructura interna definida, intercalada con arenitas con estratificación ondulosa (Ao). 80
Figura 23. Segmento 11: Capas de Lodolita gruesas intercalada con capas delgadas de areniscas, como se puede observar los contactos son ondulosos....82
Figura 24. Fotografías segmento 15: Lodolitas con laminación interna ondulosa, con bioturbación incipiente 82
Figura 25. Fotografías segmento 23: Contacto neto con las areniscas del grupo Guadalupe, se observan litofacies de lodolitas arenosas infrayaciendo el contacto con el Grupo Guadalupe.....84
Figura 26. Ubicación Formación Chipaque, Pajarito, Boyacá. Coorenadas X: 1153721 Y: 1076033.....86

Figura 27. Columna generalizada de la Formación Chipaque, Pajarito (Boyacá). .87
Figura 28. Afloramiento de areniscas de color gris claro intercalado con lutitas color negro pertenecientes al segmento 1. Asociación de facies: Aw-A-lam-Lw. ..88
Figura 29. Fotografía de afloramiento que muestra capas delgadas de Lutita intercalada con láminas muy delgadas de areniscas con estructuras lenticulares arenosas y con alto contenido de sílice. 90
Figura 30. Ubicación Formación Chipaque, Choachí, Cundinamarca. Coordenadas X: 1013632, Y: 997545 92
Figura 31. Columna generalizada de la Formación Chipaque en el Municipio de Choachí (Cundinamarca). 93
Figura 32. Fotografía donde se observa la base de la Formación Chipaque, capas muy gruesas de lutitas negras con laminación planoparalela intercalada con capas de arenitas y caliza tipo grainstone. En la capas de arenitas se observa abundante bioturbación (thallasinoides en diversas posiciones). 94
Figura 33. Fotografía del segmento 2, se observan capas muy gruesas de lodolitas oscuras, con abundante materia orgánica y estructura interna planoparalela. Intercalas con calizas tipo mudstone y areniscas en capas delgadas a gruesas. .95
Figura 34. A: Fotografía del segmento 2, asociación de facies (Llam-biot-Am-G) donde se aprecian lutitas con nódulos de caliza tipo mudstone y capas delgadas de caliza. B: Se aprecian las capas delgadas de arenisca de grano fino con lodolitas en láminas, lo cual indica un ambiente de depósito cercano al continente, el depósito de las areniscas probablemente se debe a cambios climáticos como fuertes lluvias. Por análisis donde se observaron palinomorfos de origen marino y continental. 96
Figura 35. A: estratos potentes de lodolitas negras, con abundante materia orgánica, laminación planoparalela. B: detalle de amonite. 97
Figura 36. Estratos potentes de arenitas con intercalaciones de lodolitas y calizas tipo mudstone con impresiones de bivalvos. 98

Figura 37. Fotografía donde se observa el segmento 5, calizas tipo mudstone con impresiones de fósiles de conchillas de bivalvos intercaladas con lodolitas negras, en algunas ocasiones calcáreas. 99
Figura 38. Fotografía donde se observan los estratos de lodolitas y caliza tipo mudstone del segmento 6. 100
Figura 39. Segmento 7, se observan los estratos gruesos de lodolitas negras intercaladas con capas muy delgadas a delgadas de arenitas de color amarillo. 101
Figura 40. Correlación de la Formación Tibasosa, Sección 4 y Sección 5 con la sección tipo en el área de estudio 103
Figura 41. Ubicación Formación Tibasosa, Tibasosa, Boyacá. Coordenadas X: 1123871, Y: 1123935 105
Figura 42. Columna compuesta generalizada de la Formación Tibasosa, Tibasosa, (Boyacá). 106
Figura 43. Capa donde se observa la facie A (sl), int,C,m. 108
Figura 44. Se observa el segmento 3. Capas de arenitas con cemento calcáreo intercaladas con lodolitas negras. 109
Figura 45. Segmento 5, se observan las colonias de Trigonias en las cuales se aprecian las costillas producto de su adaptación a ambientes de alta energía. .. 110
Figura 46. Segmento 8, se observan Lodolitas con concreciones calcáreas de gran tamaño (30 – 60 cm). 111
Figura 47. Segmento 8; Lutitas rojizas con intercalación de calizas tipo mudstone... 112
Figura 48. Segmento 9, tope de la Formación Tibasosa 113
Figura 49. Columna generalizada compuesta de la Formación Tibasosa, Cuche - Duitama, (Boyacá). 115
Figura 50. Ubicación Formación Tibasosa, Cuche – Duitama, Boyacá. A partir de la interpretación de las litofaciesfacies se determinaron 10 segmentos en los cuales se analizaron los diferentes ambientes de depósito 116

Figura 51. Segmento 1 y 2, se observan depósitos de arenitas cuarzosas conglomeráticas, mal calibradas. Indicando ambiente de ríos trenzados. Con asociación de litofacies A(c) int Cal. 117
Figura 52. Fotografía de Arenisca Lodosa con presencia de Bivalvos y fragmentos de conchas.....118
Figura 53. (A) Fotografía de la muestra de caliza tipo Mudstone. (B) Fotografía de una capa de caliza tipo Wackestone.....119
Figura 54. Afloramiento ubicado en la Zona La Calera. Se observa la coloración rojiza típica del segmento 9. 120
Figura 55. Mapa Paleogeográfico del Turoniano, Cretácico Superior, tomado y modificado de Caballero (2015) e Ingeominas (1996). 121
Figura 56. Historia de subsidencia de la sección Sur. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua). 126
Figura 57. Historia de subsidencia de la sección Sur. Modelada por PetroMod. .127
Figura 58. Historia subsidencia de la sección Pajarito. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua). 129
Figura 59. Historia de subsidencia de la sección Pajarito modelado en PetroMod.... 130
Figura 60. Historia de subsidencia de la sección Tibasosa. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua).... 133
Figura 61. Historia de subsidencia de la sección Tibasosa modelada en PetroMod 133

Figura 62. Calibración del modelo 1 (Formación Chipaque) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita.En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 4355m= 1.55, 4156m = 1.2, 3809m= 1.0, 3743m= 1.0, 3601m=1.1, 3517m=1.1, 3407m=0.95. En cuadro amarillo Ro Fomeque: 5718m= 2.46, tomado de Mora et al., (2008). 135
Figura 63. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Chipaque (Sección Sur). Edad Vs Profundidad 136
Figura 64. Curva de Paleotemperatura de la Formación Chipaque (Sección Sur). 138
Figura 65. Calibración del modelo 2 (Formación Chipaque) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita. En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 1662m= 0.60, 1606m = 0.89, 1495m= 0.64, 1313m= 0.65, cuadro amarillo Ro Fomeque: 3017m= 1.31, tomado de pozo Golconda-1-compilados Nemcok-ICP. 139
Figura 66. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Chipaque (Sección Pajarito). Edad Vs Profundidad..... 140
Figura 67. Curva de Paleotemperatura de la Formación Chipaque y Formación Tibasosa (Sección Pajarito). 142
Figura 68. Calibración del modelo 3 (Formación Tibasosa, municipio de Cuche) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita. En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 5395m= 1.41, 5305m = 1.2, 5180m= 1.3, En cuadro amarillo Ro Chipaque: 4230m= 1.12, tomado de Bayona et al., (2008a). 143
Figura 69. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Tibaosa (Sección Tibasosa). Edad Vs Profundidad..... 144

Figura 70. Curva de Paleotemperatura de la Formación Tibasosa (Sección Tibasosa). 146
Figura 71. Mapa Paleogeográfico de edad Turoniano, tomado de (Ingeominas, 1996). Se observan los puntos restituidos a 90Ma de las secciones medidas y las falla existentes para esta edad. 148
Figura 72. Tomado de Sarmiento 2001, Mapa con factores de estiramiento hallados por Sarmiento, 2001 para compartimientos de la Cordillera Oriental. En rojo se indican los valores hallados en este trabajo. 150

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Litofacies, nomenclatura. 29
Tabla 2. Atributos.....30
Tabla 3. Abreviaturas usadas para designar cuencas afectadas por el estiramiento cortical del Cretácico.....30
Tabla 4. Espesores reportados para el Macizo de Floresta. 54
Tabla 5. Espesores reportados en la zona Sur, al este de Bogotá. 54
Tabla 6: Eventos de estiramiento en el Mesozoico y factores de estiramiento. Eventos de estiramiento del Cretácico y factores de estiramiento litosférico de columnas estratigráficas donde el registro sedimentario está presente.....58
Tabla 7. Datos geoquimicos de las formaciones de estudio 61
Tabla 8. Cálculo de la profundidad de enterramiento teniendo los datos de Ro. ...68
Tabla 9. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Chipaque – Municipio de El Crucero (Boyacá).....85
Tabla 10: Ambientes de depósito definidos para la sección Formación Chipaque – Municipio de Pajarito (Boyacá). 91
Tabla 11. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Chipaque – Municipio de Choachí (Cundinamarca).....102
Tabla 12. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Tibasosa – Municipio de Tibasosa (Boyacá).....113
Tabla 13. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Tibasosa – Municipio de Cuche (Boyacá) 121
Tabla 14. North Sea (Allen and Allen, p. 268).....124
Tabla 15. Valores constantes y variables para cálculo de coeficiente de estiramiento. 124

Tabla 16. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección. .....
.....125
Tabla 17. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 32500, β: 1.62), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación. 126
Tabla 19. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección. .....
.....128
Tabla 20. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 28000, β: 1.57), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación. 130
Tabla 21. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección Tibasosa. Tomados de: Montoya y Reyes (2005), Martinez (1995), Sarmiento (1992), Ulloa y Rodriguez (1974). 131
Tabla 22. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 29000, β: 1.41), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación. 132

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Litofacies e interpretación de ambientes de depósito (Medio magnético)

ANEXO B. Resultados de laboratorio (Geoquímica y palinología) (Medio magnético)

ANEXO C. Secciones estratigráficas (Medio magnético)

RESUMEN

TITULO: RECONSTRUCCIÓN DE LA SUBSIDENCIA Y EVALUACIÓN PALEOGEOGRÁFICA DE LAS POTENCIALES ROCAS GENERADORAS CRETÁCICAS EN LA CORDILLERA ORIENTAL ENTRE LOS MACIZOS DE QUETAME Y SANTANDER.*

AUTORA: ADRIANA PATRICIA DUEÑES GARCÉS**

PALABRAS CLAVE: Analisis De Cuencas, Paleogeográfia, Analisis De Litofacies, Historia De Subsidencia, Modelamiento 1d, Paleotemperatura, Cordillera Oriental, Colombia, Macizo Quetame, Macizo Floresta

DESCRIPCION

Los modelos de enterramiento generados en diversos sectores de la Cuenca Cordillera Oriental indican un evento de estiramiento de la Corteza durante el Cretácico Inferior (etapa de Sinrift) y posteriores eventos menores seguidos de subsidencia tectónica. Dichos eventos generaron grandes espacios de acomodación de sedimentos en los cuales se dio el depósito de la Formación Macanal, Las Juntas, Tibasosa, Une y Chipaque. Esta última Formación es posiblemente la generadora de la mayoría de los hidrocarburos que hoy en día son explotados; teniendo en cuenta que la Formación Tibasosa generó gran cantidad de hidrocarburos que no se entramparon debido a la edad de generación y la falta de depositación de roca reservorio para ese momento.

Los modelamiento 1D son utililes para determinar las edades de inicio de transformación de la materia orgánica y edades de expulsión de los hidrocarburos generados. El modelo de Paleotemperaturas define picos de máxima generación de aceite y de esta forma indica la cantidad de sedimentos que se habían depositado para definir con esto un entrampamiento o no del hidrocarburo. La zona de Piedemonte arroja una etapa productiva de hidrocarburos actualmente. Se observa una Reflectancia de Vitrinita de 0.9 a 1.0, un enterramiento de 1600m y Temperatura de 90°C. Hacia la zona Suroeste de la Cordillera se observa la máxima profundización de la Cuenca y se concluye igualmente la máxima generación de hidrocarburos al Sur de la Cuenca Cordillera Oriental.

La calibración de los modelos fue de gran importancia para conocer el inicio de la transformación de la materia orgánica, deformación y levantamiento de la Cordillera Oriental. Conociendo estas edades se puede saber si el hidrocarburo generado por las Formaciones Chipaque y Tibasosa se entrampo en la roca reservorio superior, se perdió por el levantamiento ó migró hacia nuevas trampas de tipo estratigráfico o estructural.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Fisicoquimicas. Escuela de Geología. Maestria en Geología.Director: Giovanny Jiménez, PhD., Geología. Codirector: Andrés Roberto Mora Bohórquez, PhD., Geología

SUMMARY

TITLE: RECONSTRUCTION OF SUBSIDENCE AND PALEOGEOGRAPHIC EVALUATION OF POTENTIAL CRETACEOUS SOURCE ROCKS IN THE EASTERN CORDILLERA BETWEEN THE MASSIFS OF QUETAME AND SANTANDER.*

AUTHOR: ADRIANA PATRICIA DUEÑES GARCÉS**

KEYWORDS: BASIN ANALYSIS, PALEOGEOGRAPHY, LITHOFACIES ANALYSIS, SUBSIDENCE HISTORY, 1D MODELING, PALEOTEMPERATURE, EASTERN CORDILLERA, COLOMBIA, QUETAME MASSIF, FLORESTA MASSIF.

ABSTRACT:
The generated subsidence models in several sectors of the Cordillera Oriental Basin, indicate an event of Cortical stretching, during the early Cretaceous (Sinrift stage) and subsequent events followed by tectonic subsidence. Those events generated large sediment accommodation spaces in which were deposited the formations of Macanal, Las juntas, Tibasosa, Une and Chipaque. This latest formation is possibly the source of most hydrocarbons today exploited; considering that the Tibasosa formation generated lots of hydrocarbons which weren't entrapped due to the source age and the lack of deposition of reservoir rock at that time.

The 1D modelings are useful for determining the onset ages of the organic matter transformation and the expulsion ages of generated hydrocarbons. The paleotemperatures model helps define the oil generation maximum peaks and thereby to know the amount of deposited sediments to define this way the entrapment or not of the hydrocarbon. Piedemonte zone show a currently productive stage of hydrocarbons. A Vitrinite Reflectance of 0.9 to 1.0, subsidence of 1600m and a tempreature of 90°C, can be observed. Towards the Southwest zone of the Cordillera, the maximun depth of the Basin is observed and also concludes the maximun hydrocarbons generation to the South of the Cordillera Basin.

The models calibration was of great significance to know the onset of the organic matter transformation, deformation and exhumation of the eastern Cordillera. Knowing these ages you can tell if the hydrocarbon generated by the Chipaque and Tibasosa Formations, was entrapped on the superior reservoir rock, was lost because of the uprising or migrated to new stratigraphic or structural traps.

* Work degree

** Faculty of Engineering physicochemical. School of Geology. Master of Geología.Director: Giovanny Jimenez, PhD, Geology. Co-Director: Andrés Roberto Mora Bohórquez, PhD, Geology

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo reúne actividades relacionadas con medición de secciones, análisis de subsidencia y construcción de modelos 1D de generación de hidrocarburos en la Cuenca Cordillera Oriental. El área de estudio corresponde a cinco secciones ubicadas en diferentes municipios entre el Macizo de Floresta y el Macizo de Quetame, área en la que se encuentran depositadas las principales rocas generadoras de los hidrocarburos que hoy posiblemente están en Los Llanos Orientales y Piedemonte Llanero. A las muestras seleccionadas de las secciones medidas se les realizaron análisis palinológicos y geoquímicos, con estos resultados se reforzó el análisis de litofacies y ambientes de depósito y posterior elaboración de un mapa Paleogeográfico con nuevos aportes en edad Turoniano. Los resultados de Reflectancia de Vitrinita fueron necesarios para determinar los periodos de erosión y realizar calibración de los modelos 1D, el análisis de subsidencia con la elaboración de las historias de enterramiento se realizó para determinar los periodos de Sinrift y Postrif de las secciones definidas y con esto hallar los coeficientes de estiramiento (β).

Los resultados muestran que la Formación Chipaque aumenta su espesor hacia el Sur-Occidente de la Cordillera Oriental indicando mayor espacio de acomodación y mayor subsidencia termal en el Cretácico; los coeficientes de estiramiento indican que la zona con mayor estiramiento fue en el área de Tibasosa (Boyacá); lo cual puede ser por acción de la Falla de Guaicáramo. Los modelos 1D indican que la Formación Tibasosa inició a transformar la materia orgánica a los 84 Ma y su expulsión en esta misma edad. La Formación Chipaque al Sur-Occidente de la Cordillera Oriental fue posiblemente la primera en entrar en ventana de generación de hidrocarburos. Hacia el Piedemonte Llanero la Formación Chipaque se encuentra en ventana de generación en la actualidad.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto de Arenas Bituminosas tiene la necesidad de saber la procedencia de los hidrocarburos que se encuentran en La Cuenca de Los Llanos Orientales de Colombia, y la región del Caguan. El análisis detallado de las facies, ambientes sedimentarios y de la subsidencia tectónica asociada a la extensión del Cretácico Temprano, y el cálculo del estiramiento de la corteza factor (β) integrados con los espesores verdaderos de la sección Cretácica y Terciaria permitirán obtener flujos de calor con los cuales se puede modelar cuando las formaciones orgánicas del Cretácico Temprano y Tardío estuvieron en ventana de generación con el fin de complementar estudios de correlación crudo - roca.

Como consecuencia del interés por la evolución de la Cordillera Oriental en las dos últimas décadas y su relación con la existencia de los hidrocarburos que hoy son extraídos de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, los cuales son originados en rocas del Cretácico Superior o más jóvenes según Villamil[1], se crea este proyecto el cual se enfoca en un análisis facial de secciones medidas en cercanías a los Macizos de Quetame y Santander sobre la Cordillera Oriental, y pretende también desarrollar la historia de la subsidencia termal asociada en parte a la extensión que se generó en el Cretácico Temprano[2]; el interés se centra en dicho evento debido a que la magnitud de la extensión del Cretácico Tardío depende de la subsidencia termal generada en el evento anterior y por lo tanto ejerce un control fundamental en la paleotemperatura de la Formación Chipaque la cual pertenece al Cretácico Tardío. La posible generación de hidrocarburos en

[1] VILLAMIL, T., Relative sea level, chronology, and a new sequence stratigraphy model for distal offshore facies, Albian to Santonian, Colombia. In: Pindell, J.A., Drake, C.D. (Eds.), Mesozoic-Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Evolution of the Caribbean Region/Northern South America: Implications for Eustasy from Exposed Sections of a Cretaceous-Eocene Passive Margin Setting. Geol. Soc.Amer. Memoir, paper C-8. 1993

[2] SARMIENTO-ROJAS, L.F., WESS, J.D.V., and CLOETINGH, S., Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models.: Journal of South American Earth Sciences, v. 21, p. 383-411. 2006

rocas del Cretácico Inferior no se ha evaluado en estudios previos debido a que los datos geoquímicos las muestran siempre sobremaduras. La paleotemperatura de las rocas está controlada por diversos factores como: (1) el flujo de calor, (el cual es función de la magnitud de extensión), (2) la subsidencia, la cual depende de la magnitud de extensión y en menor medida de la litología y determina el enterramiento total de la roca, y (3) la conductividad térmica de las rocas. Durante el Cretácico Temprano en Colombia se generó extensión y rápida subsidencia que llevó a la depositación de espesos estratos marinos a lo largo de la Cuenca de Bogotá que cubría la mayor parte de lo que hoy ocupa la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena[3] La zona Norte de la Cuenca de Bogotá se dividió en dos Subcuencas separadas por un alto de basamento (Macizo de Floresta)[4],. Una Subcuenca al Noroeste conocida como la subcuenca del Cocuy la cual fue limitada al este por fallas normales del sistema de paleo-fallas del borde Llanero[5]; este sistema de fallas normales se evidencia debido a que en el flanco este de la Cordillera rocas recientes del Jurásico y Cretácico Temprano (Macanal, Las Juntas, Fómeque y formaciones equivalentes) tienen más de 5000 metros de espesor, mientras que en la posición opuesta al sistema de fallas normales las rocas de esta edad están ausentes. Las tasas de subsidencia al oriente de la falla del Borde Llanero son más rápidas en el Cretácico temprano en la margen occidental de la Subcuenca del Cocuy, por tanto se ha interpretado la presencia de un semi - graben[6]. La otra Subcuenca se ubica al Noroeste de la Cuenca de Bogotá y se extiende en gran parte en el Flanco Occidental de la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena. (Figura 1).

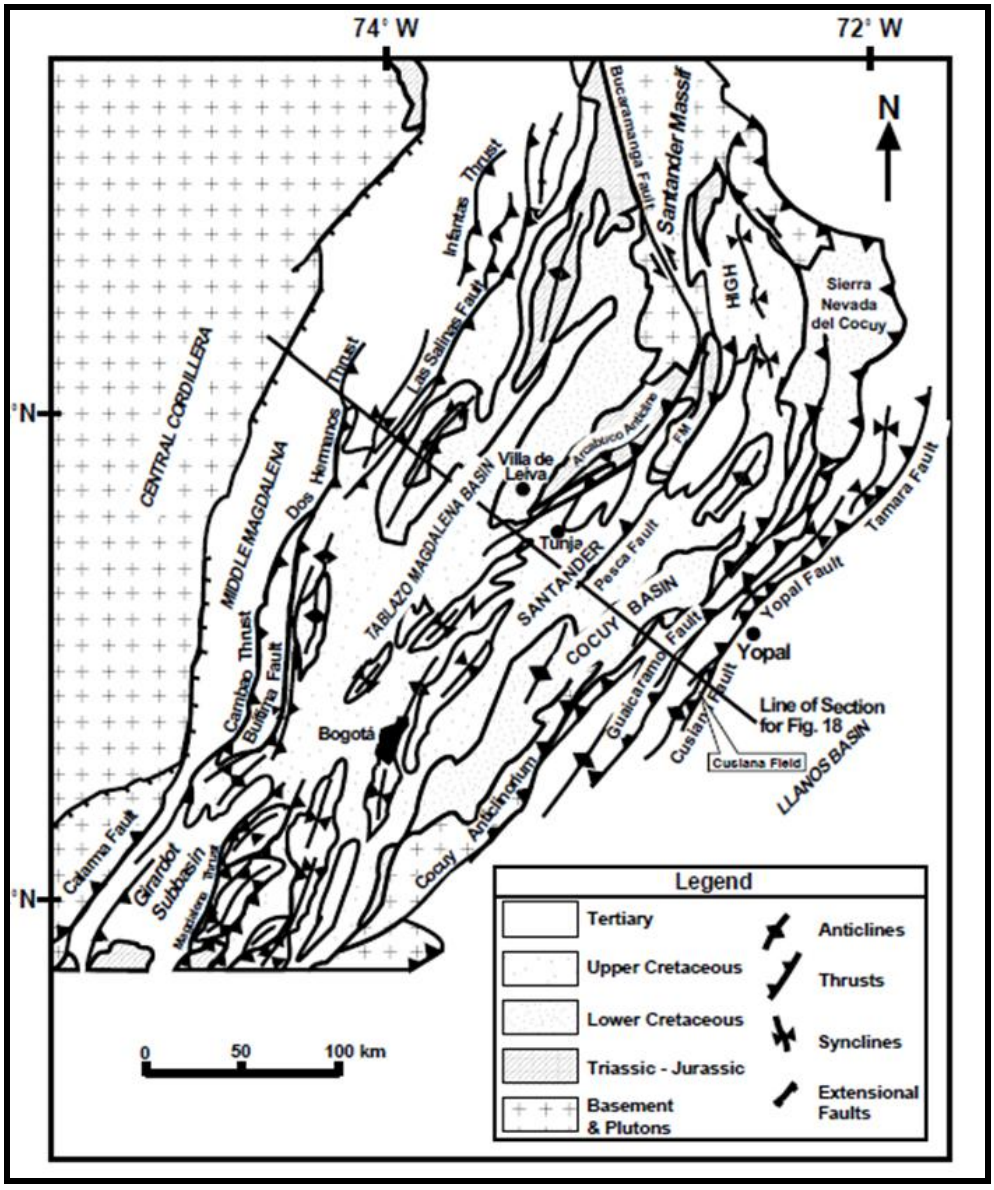
[3] FABRE, A., Tectonique et génération d'hydrocarbures: un modèle de l'évolution de la cordillère orientale de Colombie et du bassin des Llanos pendant le Crétacé et le teritaire.: Arch. Sc. Geneve, v. 40, p. 145-190. 1987
[4] iBID
[5] Ibid
[6] SARMIENTO-ROJAS, WESS, and CLOETINGH, Op. Cit.

La delimitación de la Cuenca por fallas normales se evidencia por la distribución de depósitos sin-extensionales, por ejemplo en la parte central de la Cordillera Oriental son expuestas en el bloque Occidental del Anticlinal de Arcabuco capas de las Formaciones Arcabuco, como La Rusia, Palermo y Batá pertenecientes al Jurásico. Al Este se observan capas delgadas de rocas del Cretácico las cuales descansan directamente sobre rocas del Paleozoico del Macizo de Floresta. Las fallas normales que limitan la cuenca extensional del Cretácico Temprano fueron invertidas durante la deformación compresional andina del Terciario – Holoceno[7].

La rápida subsidencia del Cretácico Temprano ha sido explicada por el adelgazamiento de la litosfera usando el modelo de[8] calculó un factor de estiramiento (β) de 2.0 podría ser el responsable de la subsidencia de la Cuenca del Cocuy. Análisis de la Cordillera Oriental muestran que el factor β del evento extensivo de la corteza en el Cretácico Temprano oscilo desde aproximadamente 1.1 hasta 1.6[9].

[7] COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, S.H., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., 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, p. 1421–1443. 1995.
[8] FABRE, A., Op. Cit.
[9] SARMIENTO-ROJAS, WESS, and CLOETINGH, Op. Cit.

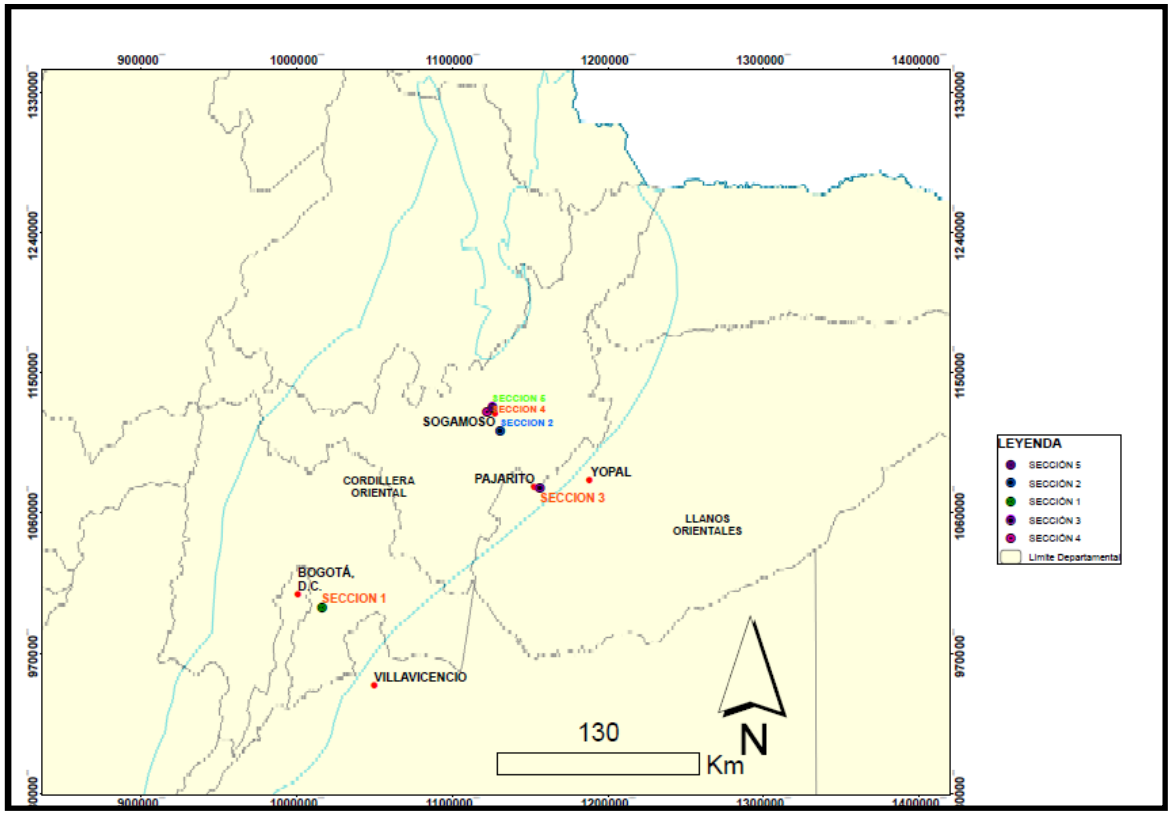
Figura 1: principales elementos tectónicos y unidades estratigráficas de la Cordillera Oriental, Valle Medio del Magdalena y Cuenca de los Llanos. FM=Macizo de Floresta.



Fuente: COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, S.H., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., 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, p. 1421–1443. 1995

1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE EST UDIO

Figura 2. Mapa geológico del área de estudio y ubicación de secciones medidas sobre la Cordillera Oriental. En rojo se observan los sitios de levantamiento de secciones.



El presente trabajo se desarrolló en zonas específicas a lo largo de la Cordillera Oriental; sobre la cual se levantaron 5 secciones estratigráficas de las Formaciones Tibasosa y Chipaque. Hacia el Sur en el Municipio de Choachí (sección 1) y al Norte en el Municipio de El Crucero (sección 2), Municipio de Pajarito (Sección 3), Municipio de Tibasosa (sección 4), y Municipio de Cuche (sección 5). El criterio de selección de las secciones medidas fue la necesidad del proyecto Arenas Bituminosas y Crudos Pesados desarrollados en Ecopetrol de

conocer a detalle las facies y realizar adquisición de datos estratigráficos, geoquímicos y Palinológicos de las áreas.

2. OBJETIVO GENERAL

Realizar la reconstrucción de la subsidencia cretácica temprana en secciones a lo largo de la Cordillera Oriental, con énfasis en las litofacies orgánicas y evaluar la paleogeografía de La Formación Chipaque y Tibasosa con el fin de conocer la historia termal y posibles tiempos de generación de hidrocarburos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el factor de estiramiento de la corteza partiendo del espesor neto y edades de la secuencia Cretácica entre el Macizo de Quetame y el Macizo de Floresta para realizar los modelos termales 1D.
- Generar un mapa paleogeográfico a partir de litoestratigrafía y ambientes sedimentarios de las unidades orgánicas del Cretácico Tardío en el área de estudio.
- Determinar historias de enterramiento y paleotemperaturas de las posibles rocas generadoras de hidrocarburos de los Llanos orientales por medio de la historia de subsidencia de la secuencia cretácica temprana de la Cordillera Oriental.

2.2 ABREVIATURAS

Farell (2012) propone una clasificación basada en la textura de rocas sedimentarias clásticas, esta clasificación es independiente de la composición, cementación y ambiente geológico, y está relacionado estrechamente a procesos

sedimentológicos. A continuación se muestra el cuadro de descripción de facies, al cual se le realizo traducción para efectos del trabajo.

Tabla 1. Litofacies, nomenclatura.

Clases texturales en sedimentos clásticos				
	Codigo	**Código Español**	**Equivalente Consolidado**	**Equivalente Consolidado Español**
GRAVA	G	C	Conglomerate	Conglomerado
	(s)G	C(a)	Slightlysandyconglomerate	Conglomerado ligeramente arenoso
	(m)G	C(l)	Slightlymuddyconglomerate	Conglomerado ligeramente lodoso
	Sg	C(A)	Sandy conglomerate	Conglomerado arenoso
	Mg	C(L)	Muddyconglomerate	Conglomerado lodoso
	(sm)G	C(al)	Slightly sandy and muddy conglomerate	Conglomerado ligeramente arenoso y lodoso
	(ms)G	C(la)	Slightly muddy and sandy conglomerate	Conglomerado ligeramente lodoso y arenoso
	(s)mG	Cl(a)	slightlysandymuddyconglomerate	Conglomerado lodoso y ligeramente arenoso
	(m)sG	Ca(l)	Slightlymuddysandyconglomerate	Conglomerado arenoso y ligeramente lodoso
	smG	Cal	Sandy muddyconglomerate	Conglomerado arenoso lodoso
	msG	Cla	Muddysandyconglomerate	Conglomerado lodoso arenoso
ARENA	S	A	Sandstone	Arenisca
	(g)S	A(C)	Slightlygravellysandstone	Arenisca ligeramente conglomeratica
	(m)S	A(l)	Slightlymuddysandstone	Arenisca ligeramente lodosa
	mS	A(L)	Muddysandstone	Arenisca lodosa
	gS	A(C)	Gravellysandstone	Arenisca conglomeratica
	(gm)S	A(cl)	Slightly gravelly and muddy sandstone	Arenisca ligeramente conglomeratica y lodosa
	(mg)S	A(lc)	Slightly muddy and gravelly sandstone	Arenisca ligeramente lodosa y conglomeratica
	(g)mS	Al(c)	Slightlygravellymuddysandstone	Arenisca lodosa ligeramente conglomeratica
	(m)gS	Ac(l)	Slightlymuddygravellysandstone	arenisca conglomeratica ligeramente lodosa
	gmS	Acl	Gravellymuddysandstone	arenisca conglomeratica lodosa
	mgS	Alc	Muddygravellysandstone	arenisca lodosa conglomeratica
		A(sl)		Sublitoarenita
LODO	M	L	Mudstone	Lodolita
	(s) M	L(a)	Slightly sandy mudstone	Lodolita ligeramente arenosa
	(g)M	L(c)	Slightly gravelly mudstone	Lodolita ligeramente conglomeratica
	sM	L(A)	Sandy mudstone	Lodolita arenosa
	gM	L©	Gravelly mudstone	lodolita conglomeratica
	(sg)M	L(lc)	Slightly sandy and gravelly mudstone	Lodolita ligeramente arenosa y conglomeratica
	(gs)M	L(ca)	Slightly gravelly and sandy mudstone	Lodolita ligeramente conglomeratica y arenosa
	(s)gM	Lc(a)	Slightly sandy gravelly mudstone	Lodolita conglomeratica ligeramente arenosa
	(g)sM	La©	Slightly gravelly sandy mudstone	Lodolita arenosa ligeramente conglomeratica
	sgM	Lac	Sandy gravelly mudstone	Lodolita arenosa conglomeratica
	gsM	Lca	Gravelly sandy mudstone	Lodolita conglomeratica arenosa

Fuente: FARRELL, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D.J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., SELF-TRAIL, J. M. & LAUTIER, J.C., Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock: Journal of Sedimentary Research, v. 82, p. 364-378. 2012.

Tabla 2. Atributos

ATRIBUTOS			
Código	**Código**	**Equivalente**	**Equivalente Español**
m	m	massive	masiva
biot	biot	bioturbated	bioturbada
b	mad	burrowed	madrigueras
lam	lam	laminated	laminada
l	l	lenticular bedding	estratificación lenticular
w	w	wavy bedding	estratificación ondulosa
f	f	flaser bedding	estratificación flaser
gr-lam	gr-lam	graded laminates	laminacióm gradual
x	x	cross-bedded	estratificación cruzada
r	ond	rippled	ondulosa
r-lam	o-lam	ripple-laminated	laminación ondulosa
mld	mld	moldic	moldes
intr	intr	intraclastic	intraclastos
df	dp	dissolution fabric	porosidad por disolución
mot	mot	mottled	moteado
org	org	plant debris	restos vegetales
rh	cr	rhythmically layered	ritmicamente en capas
bnd	bnd	banded	bandeado
cem	cem	cemented	cementado
P	P	pelletal	pellets
C	A	clay	arcilla
Z	L	silt	limolita
c	a	clayey	arcilloso
z	l	silty	limoso
\	int	interlayered	intercalado

Fuente: FARRELL, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D.J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., SELF-TRAIL, J. M. & LAUTIER, J.C., Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock: Journal of Sedimentary Research, v. 82, p. 364-378. 2012.

Tabla 3. Abreviaturas usadas para designar cuencas afectadas por el estiramiento cortical del Cretácico.

Cuenca/Sub-Cuenca	Abreviatura
Cuenca Llanos Orientales	LIAB
Cuenca Cordillera Oriental	CCO
Sub Cuenca Media del Magdalena	CMM
Valle Medio del Magdalena	VMM
Sub Cuenca Cordillera Oriental	ECB

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Los principales eventos tectónicos que influenciaron el desarrollo de las cuencas Colombianas están ampliamente relacionados con la evolución del margen occidental activo de la Cordillera de los Andes.[10] El basamento Colombiano es dividido en tres zonas, separadas por estructuras principales (Ver Figura 1):

- El Escudo de la Guyana Oriental (A)
- La Provincia central con rocas del Precámbrico-Paleozoico temprano (B)
- Fragmentos de corteza oceánica acrecionada por subducción (C)

Durante el Triásico-Jurásico y Cretácico temprano, el Norte de Sur América fue periféricamente afectada por un *rift* asociado a la separación de Norte y Sur América en el proto-caribe propuso un mecanismo alternativo para la extensión en un ambiente de *back-arc* el cual daba la naturaleza oblicua de la zona de subducción con una componente trans-tensional.

Para el norte de los Andes y el piedemonte llanero la deformación se desarrolló debido a la interacción entre las placas Nazca-Caribe con la placa Suramericana.

[10] COOPER, ADDISON, ÁLVAREZ, CORAL, GRAHAM, HAYWARD, MARTÍNEZ, NAAR, PEÑAS, PULHAM, AND TABORDA, Op. Cit.

La Cordillera Oriental es un orógeno de inversión bivergente norte-nororiente relacionado con la reactivación Cenozoica de las estructuras de rift cretácicas durante la compresión de orientación E-W[11],[12] La principal fase de inversión tectónica en la Cordillera Oriental ocurrió en el Mioceno y ha sido atribuida a la colisión del arco Baudó-Panamá con el activo margen occidental de Sur América.

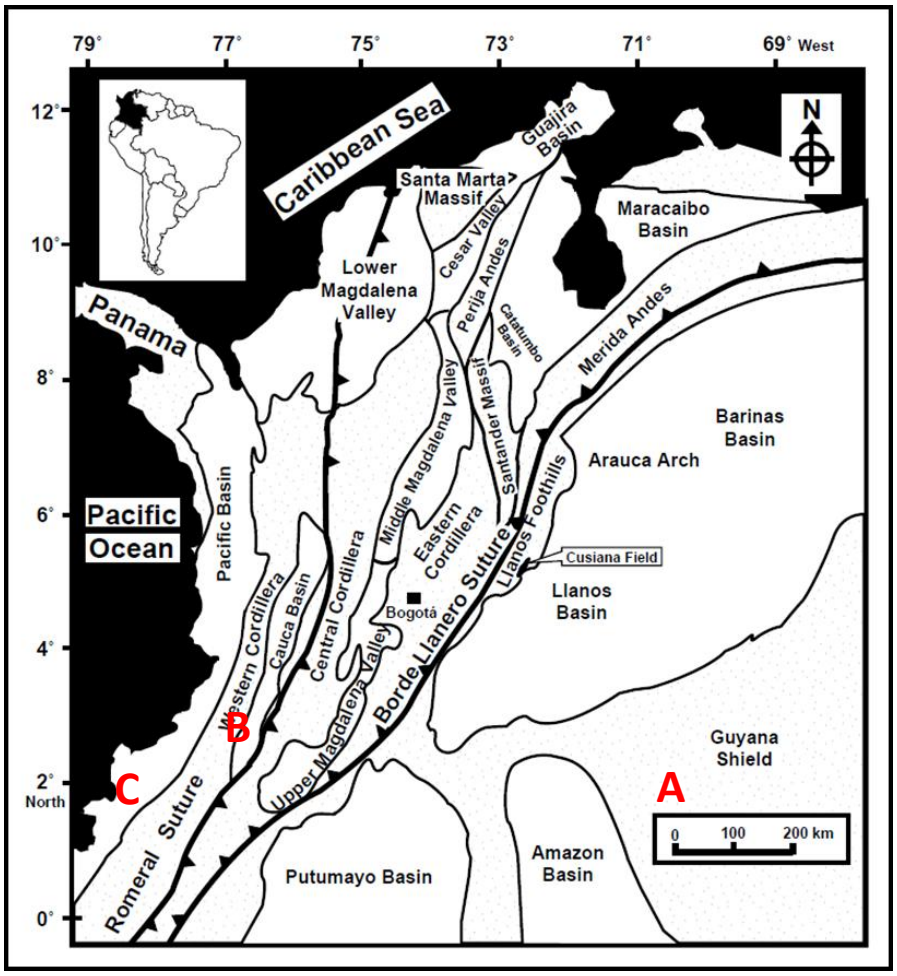
La Cordillera Oriental comprende la zona externa de los Andes Colombianos y está separada de la Cordillera Central por el Valle Medio del Magdalena-VMM. La cuenca intramontana de esta Cordillera Oriental es limitada al Este por el sistema de fallas del borde llanero, y al Oeste por unas fallas de cabalgamientos con vergencia al Oeste que la separa del Valle del rio Magdalena. (Figura 1).

Estudios paleogeográficos y sedimentológicos en la Cordillera Oriental[13],[14],[15],[16],[17] sugieren que el *rifting* regional del Jurásico tardío - Cretácico temprano generó la megasecuencia de sedimentos *sin-rift* (marinos y continentales) como la Fm. Guavio, Fm Buenavista, Fm Macanal, Fm Las Juntas y la Fm Fómeque que suprayacen al basamento o las unidades del Paleozoico para el Este de la Cordillera Oriental.

[11] Ibid
[12] MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M.R., KAMMER, A., DIMATÉ, C., AND RODRÍGUEZ, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: Tectonics, v. 25, TC2010, doi: 10.1029/2005TC001854. 2006
[13] FABRE, A., Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). In Laverde-Montaño, F.E.- S.a.F., ed., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIX, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 20 p. 1985a
[14] HEBRARD, F., Les foothills de la Cordillière Orientale de Colombie entre les rios Casanare et Cusiana. Evolution geodynamique depuis l´Eo Crétacé [Ph.D thesis]: Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 162 p. 1985
[15] COVEY, M.C., AND DENGO, C.A., Structural evaluation of exploration leads in the Paz de Río and Tunja blocks, Eastern Cordillera, Colombia: Bogotá, Ecopetrol, 12535, Informe 2310. 1989
[16] COOPER, ADDISON, ÁLVAREZ, CORAL, GRAHAM, HAYWARD, MARTÍNEZ, NAAR, PEÑAS, PULHAM, AND TABORDA, Op. Cit.
[17] SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001

Los sedimentos que cubren el Paleozoico son marinos y presentan espesores variables, indicando diferencias de subsidencia tectónica; las areniscas del Albiano al Cenomaniano son clasificadas como la Formación Une, esta formación está suprayacida por shales pertenecientes a la Formación Chipaque y por encima de esta, se encuentra el Grupo Guadalupe.

Figura 3. Mapa de las principales provincias tectónicas de Colombia. Marco tectónico de Colombia y sus principales provincias Geológicas Tectónicas



Fuente: COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, S.H., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., 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, p. 1421–1443. 1995.

En el piedemonte, la secuencia Paleoceno-Eoceno constituye hasta 600 m. de arenisca continental y lodolita físil que conforma las formaciones Barco, los Cuervos y Mirador. Estas unidades son suprayacidas por ~3km de secuencia Oligoceno - Mioceno Inferior de lodolita físil y arenisca marina marginal a deltaicas de la Formación Carbonera[18]. Sobre esta unidad la Formación León de lodolitas del Mioceno Medio constituye 500m de espesor de horizonte continuo interpretado como la última incursión marina en el área. Esta formación está cubierta por una sucesión continua de arenisca continental y conglomerados de la formación. Guayabo del Mioceno Superior-Plioceno. La Formación Guayabo Superior es lateralmente equivalente con la formación Corneta la cual se compone de conglomerados de gravas gruesa[19].

3.1.1 Marco litológico regional. Se realiza una descripción de las Formaciones Fómeque y Chipaque. Dicha información se pretende ampliar en la fase de campo de este proyecto. Para la Formación Macanal no se realizaran secciones específicas debido a la madurez que presenta la roca la cual impide realizar buenos análisis de laboratorio. A pesar de esto se pretende trabajar con los espesores y edades encontrados en la literatura de la secuencia Cretácica y Terciaria.

- **Formación Tibasosa**

Renzoni[20] propone este nombre para designar los sedimentos que se presentan por debajo de la Formación Une en el sector de Tibasosa, y la subdivide en cuatro miembros: un miembro basal de conglomerados, areniscas y limolitas; un miembro calcáreo inferior formado por shales, calizas arenosas y areniscas; un miembro

[18] MORA, A., AND PARRA, M., the structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian Eastern Cordillera: Differences with other inversión related structures: CT&F—Ciencia Tecnologia y Futuro, v. 3, p. 7–21. 2008
[19] Ibid
[20] RENZONI, G., Paleoambientes de la Formación Arcabuco y Cumbre de la Cordillera de Los Cobardes., in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter X, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 14 p. 1985c

arenáceo intermedio constituido por shales y areniscas y un miembro superior, calcáreo formado por shales, calizas lumaquélicas y areniscas. Ingeominas, (2001) en la cartografía de la Plancha de Paz de Río, separa el miembro basal de Renzoni (Conjunto Inferior) y une los otros tres en un solo conjunto, (Conjunto Superior). Para Renzoni la formación tiene un espesor de 355 m en el sector de Tibasosa y considera que hacia el norte el espesor aumenta hasta unos 574 m.

Al occidente del Macizo de Floresta la formación cubre, un área importante, en forma de monoclinal, al norte del Municipio de Santa Rosa de Viterbo, la cual traslapa hacia el oriente sobre rocas de las formaciones Girón y Cuche, en una clara discordancia; y hacia el occidente está superpuesta por arenitas de la Formación Une. Más al norte, en el sector entre Cerinza y Belén, la formación se emplaza en la parte baja de pequeños cerros aislados situados al oriente de la falla de Boyacá. Al norte de Belén forma un monoclinal que se apoya hacia este sobre rocas de la cuarzomonzonita de Santa Rosita y está superpuesta concordantemente por la Formación Une.

En lo relacionado con la edad de la formación, Hauteriviano - Albiano tardío[21] y recientes dataciones amplían el rango de Valanginiano[22] cita la presencia de fauna en los miembros calcáreos (superior e inferior) las cuales indican una edad probable Hauteriviano a Albiano medio o superior. La formación se le correlaciona cronológicamente con la Formación Fómeque, Ingeominas, (2008).

En la zona sur, al este de Bogotá la Formación se denomina **Formación Fómeque** de edad Barremiano medio a Aptiano superior,[23] considera que la parte superior de la unidad abarca el Albiano inferior, la localidad tipo se encuentra

[21] Ibid
[22] ALZATE D., Juan C. & BUENO V., Mauricio: Análisis estratigráfico secuencial de las rocas cretácicas de la parte oriental del Departamento de Boyacá, Municipios de Sogamoso, Belencito y Aquitania. 1994
[23] HUBACH, E., Exploración en la región de Apulo-San Antonio-Viotá. Bol.Min. Petr., (27-27):41-60. Bucaramanga. 1931b.

sobre la vía Bogotá – Villavicencio. Está constituida por lutitas grises oscuras a negras, interestratificadas con lodolitas calcáreas, limolitas grises y lentes de calizas grises oscuras a negras, con frecuentes intercalaciones de cuarzoarenitas grises, de grano fino, en capas medias a gruesas. Presenta una morfología escalonada y ondulada en el área de Fómeque y forma depresiones en el sector de la Cuchilla de Buenavista, en donde presenta un espesor menor de 120 m. Su espesor es de 1200m en la región occidental del Anticlinal de Los Farallones, espesor calculado con base en cortes geológicos. Los límites estratigràficos tanto el contacto inferior como el superior son concordantes y sus límites fueron situados en el tope de la Arenisca de Cáqueza y la base de la Formación Une respectivamente. El ambiente de depositación es marino somero, con circulación restringida[24]. Se correlaciona en parte con la Formación Mercedes de la Cuenca de Catatumbo.

- **Formación Chipaque**

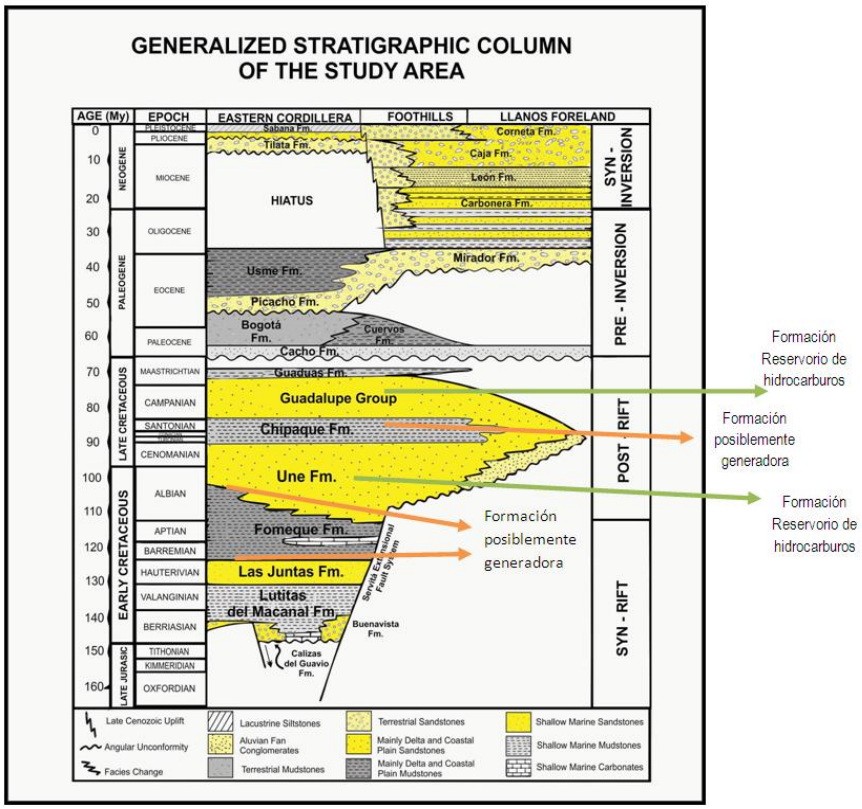
Hubach[25] le da el nombre a la formación, a la que inicialmente había denominada Conjunto Chipaque y bajo esta denominación engloba todos los sedimentos de la parte superior del Grupo Villeta. Posteriormente Renzoni[26], redefine la formación con base a secuencias en la misma sección de Chipaque - Bogotá y con otra secuencia en la vía Choachí – Bogotá, incluyendo dentro de ella la secuencia arcillosa que se apoya sobre la Formación Une y está superpuesta por la Arenisca Dura. En la Plancha 172 de Paz de Río, incluyen la Formación Chipaque englobando en ella todos los sedimentos presentes entre el techo de la Formación Une y la base de la Formación Plaeners.

[24] ULLOA, C. y RODRIGUEZ, E. Geología del cuadrángulo K-13, Tauramena. Ingeominas, informe 1706, 22 p. 1976
[25] HUBACH, E., Exploración en la región de Apulo-San Antonio-Viotá. Bol.Min. Petr., (27-27):41-60. Bucaramanga. 1931b.
[26] RENZONI G. Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana N.5, pp.75-127. 1968

En general la secuencia muestra un depósito de plataforma carbonatada con oscilaciones entre la zona externa, (Zona X), en la cual la acción de las olas no existe y de la zona de barrera (Zona Y), de aguas turbulentas por encima del nivel de las mismas. Estas oscilaciones en el depósito muestran variaciones en el nivel del mar con ascensos y descensos, posiblemente de carácter eustático.

A la formación se le da una edad Cenomaniano a Coniaciano o Santoniano según faunas colectadas en el techo de la formación Une, unidad infrayacente y en la base de la Formación Arenisca Dura que en el área próxima a Bogotá se le superpone.

Figura 4. Estratigrafía generalizada de la Cordillera Oriental.



Fuente: MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M.R., KAMMER, A., DIMATÉ, C., AND RODRÍGUEZ, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: Tectonics, v. 25, TC2010, doi: 10.1029/2005TC001854. 2006

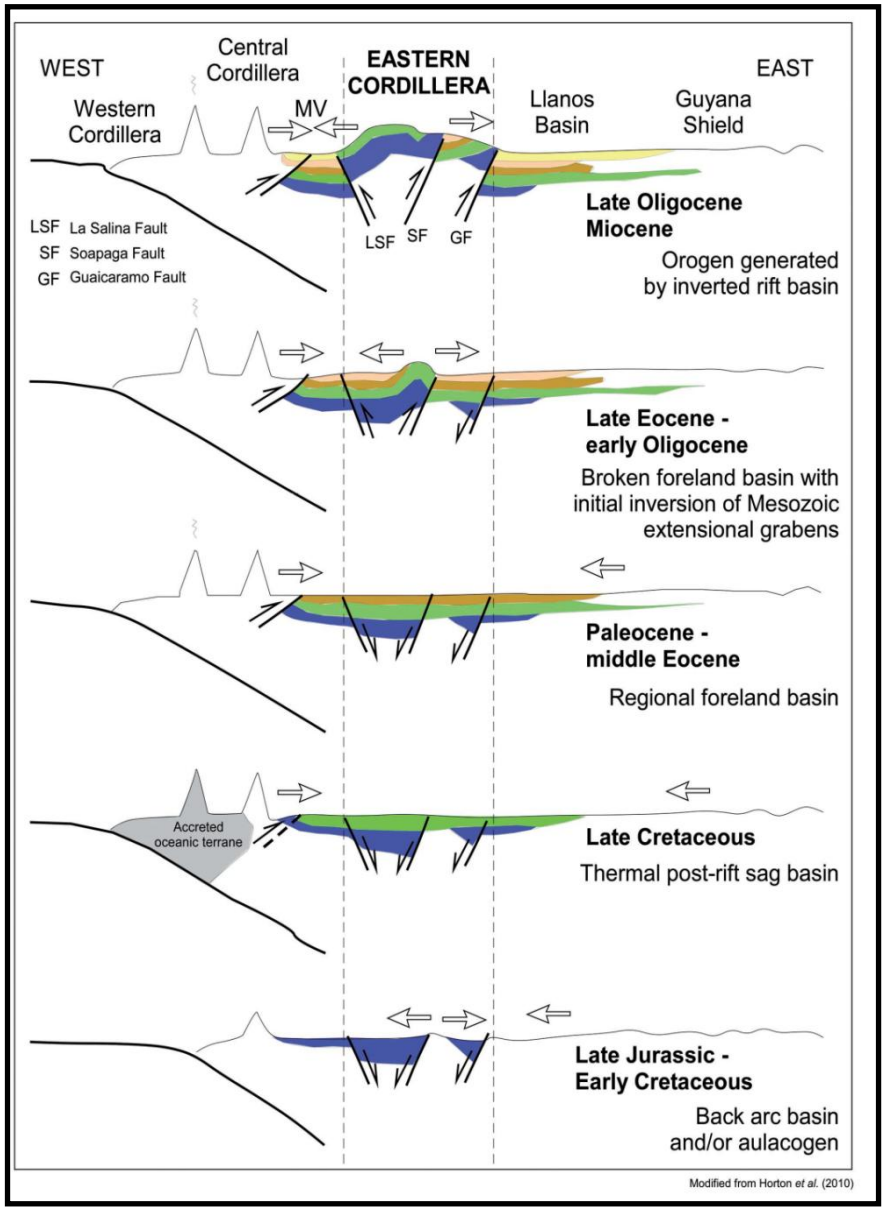
3.2 HISTORIA DEL RIFTING MESOZOICO

3.2.1 Historia De Extensión Cretácica. Sarmiento-Rojas (2001) and Sarmiento-Rojas[27] realizó el análisis de subsidencia y modelamiento de 162 columnas estratigráficas y pozos en la Cuenca Cordillera Oriental, Cuenca del Valle Medio del Magdalena y Cuenca de los Llanos Orientales.

Los análisis mostraron que en el Mesozoico las cuencas sufrieron estiramiento por 5 pulsos de extensión litosférica que generaron cuencas de rift durante esta edad. La acción tensional del margen de placa sobre La Cuenca Cordillera Oriental ayuda a explicar la historia tectónica del Mesozoico. La distribución espacial de los valores de estiramiento litosférico sugieren eventos tensionales durante el Triásico y Jurásico (probablemente relacionados a la separación de Pangea y más adelante una extensión tras-arco), produjo un alargamiento litosférico (menor a 150 Km) estrechas grietas, localizadas en la actual CMM y en el flanco oeste de ECB (Sub-Cuencas Tablazo – Magdalena). Este episodio en la historia de las cuencas puede ser interpretado como un aulacógeno, pero la zona de enfrente del arco magmático puede ser interpretada como una cuenca de tras-arco (Fig. 5). Durante el Cretácico temprano, esfuerzos tensionales/trastensionales, probablemente relacionados a extensión tras-arco, produjeron nuevos episodios de estiramiento litosférico y generaron una extensión (mayor a 180 km) sistema asimétrico de cuencas *half – rift* (Figura 5).

[27] SARMIENTO-ROJAS, WESS, CLOETINGH, Op. Cit.

Figura 5. Historia de extensión y deformación de la Cordillera Oriental.



Fuente: Cuenca Cordillera Oriental – ANH. Tectonic evolution of the Eastern Cordillera. After Horton et al. (2010a).

Las cuencas de rift del Triásico fueron asimétricas e inicialmente estrechas, pero se ampliaron significativamente durante el Jurásico. En contraste, los rift del Cretácico fueron más amplios y menos simétricos que las cuencas de rift del

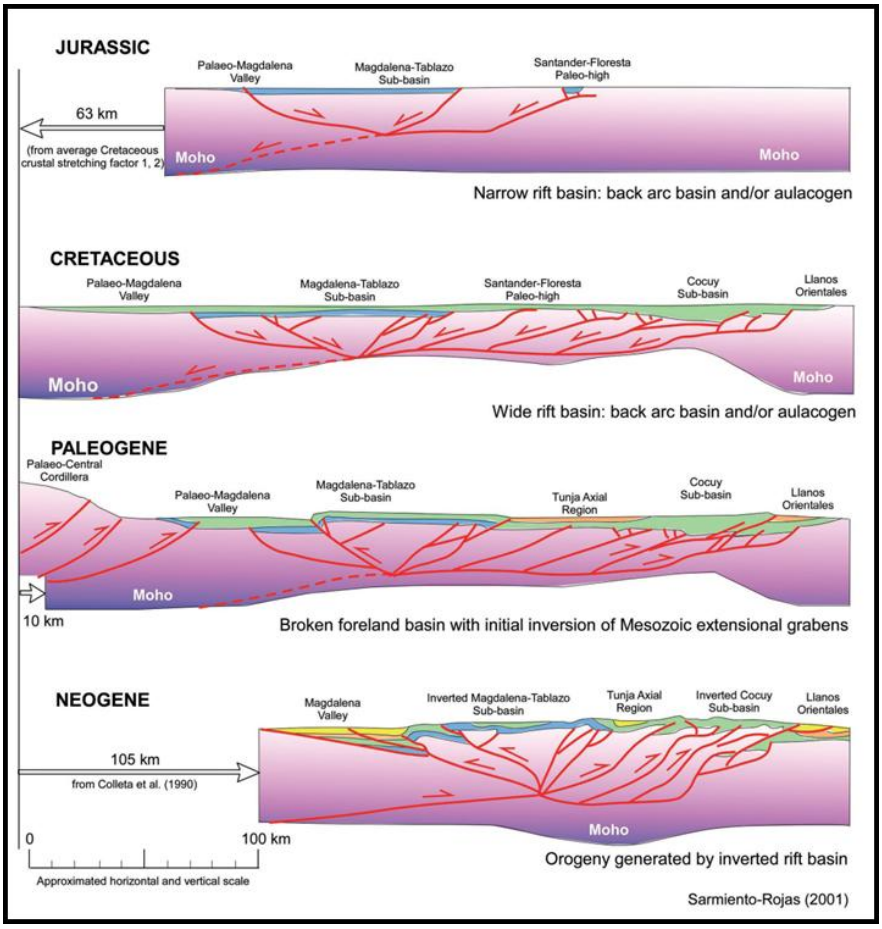
triásico-Jurásico. El margen oriental del rift del Berriasiano-Hauteriviano se pudo desarrollar por la reactivación de antiguos rift Paleozoicos representados por el sistema de fallas de Guaicaramo[28]. El margen occidental probablemente se desarrolló por reactivación de una falla normal temprana del rifting del Jurásico. El incremento en la amplitud del sistema de rift fue aparentemente el resultado de la reactivación tensional progresiva en zonas débiles. Cambios laterales observables en los espesores durante la sedimentación del Mesozoico sugieren que las fallas inversas de los bordes oriental y occidental de la CCO eran fallas normales que fueron tectónicamente invertidas durante la orogenia Andina del Cenozoico (Figs. 6, 7). Sin embargo no todas las fallas normales Mesozoicas fueron invertidas: la Falla Esmeraldas fue invertida desde el basamento durante la inversión de bloques Cenozoicos.

- **Rifting Jurásico**.

Durante el Cretácico Tardío, subsidencia termal posterior al rift generó una cuenca por hundimiento regional cubriendo el área de la actual MMB, ECB Y LlAB, la acreción de una placa oceánica al occidente de Colombia creó un frente de deformación compresional en la Cordillera Central. (Figura 6).

[28] HOSSACK, J., MARTÍNEZ, J., ESTRADA, C., AND HERBERT, R., Structural evolution of the Llanos fold and thrust belt, Colombia., in McClay, K., ed., Thrust Tectonics 99 Meeting,, Royal Halloway University of London, April 26-29, June 1999, Program, London, p 110. 1999

Figura 6. Sección de la CEB donde se observa la evolución tectónica del Mesozoico, Neógeno y Cretacico.



Fuente: SARMIENTO-ROJAS, L, F., J.D. VAN WESS, S. CLOETINGH. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models.

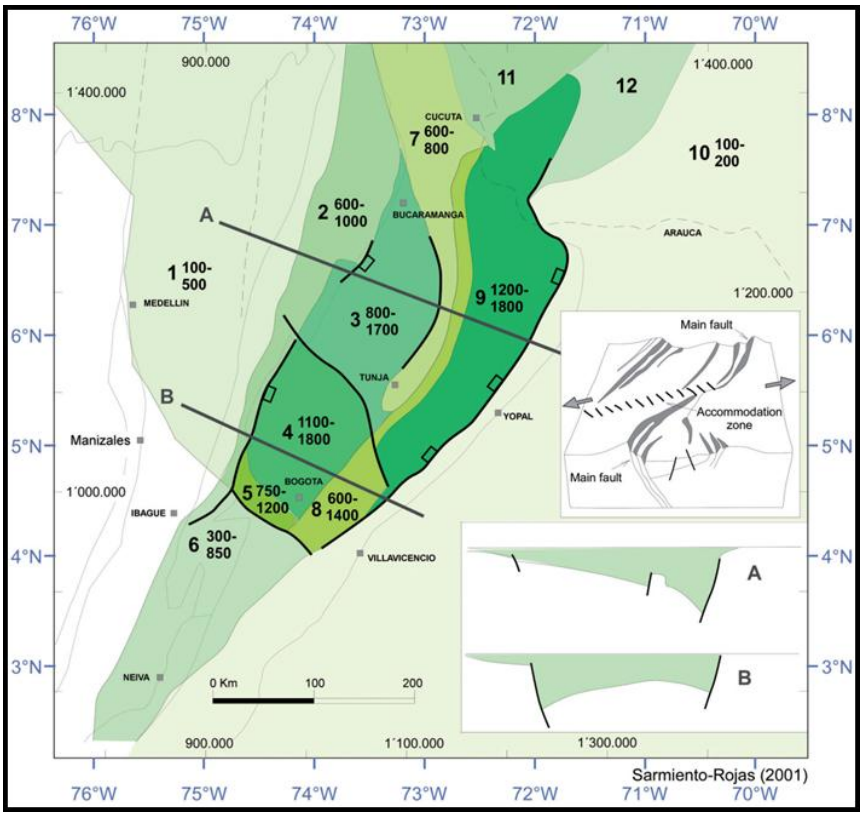
La evolución tectónica del Mesozoico, Neógeno y Cretácico, se muestra en secciones balanceadas y restauradas de Colletta, (Figura 6) sin embargo las secciones no están balanceadas a profundidad. El acortamiento del Cretácico fue estimado por factores de extensión calculados por Sarmiento-Rojas[29] y Sarmiento-Rojas[30], el acortamiento del Paleógeno fue estimado por modelos cinemáticos y el

[29] SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001

[30] Ibid, 2006

acortamiento del Neógeno por Colletta. Durante el Jurásico la CCO era un rift estrecho que se amplió en el Cretácico temprano, como sugieren factores de estiramiento y modelos de subsidencia tectónica. Durante el Paleógeno (Eoceno Tardío a Oligoceno Temprano) un frente orogénico inicio en la Cordillera Central migrando hacia el este produciendo inversión local del Mesozoico extensional en la CCO, rompiendo la inicial Cuenca de Antepaís en cuencas de menor tamaño. Desde el Oligoceno (principalmente Neógeno) las crecientes tasas de acortamiento generaron una inversión total de las Cuencas extensionales del Mesozoico, la cual fue levantada y separó CMM y la Cuenca de los Llanos.

Figura 7. División tectónica de ECB en el Cretácico Temprano.



Fuente: SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001.

En el Cretácico Temprano la ECB se dividió tectónicamente en secciones. Curvas de subsidencia tectónica y mapas de restauración de espesores ayudan a discriminar las secciones de la cuenca por las diferentes historias de subsidencia y fueron delimitadas por un sistema de fallas extensionales. Los cambios en los espesores a través de los bloques de falla evidencian fallas normales. La mayoría de las fallas sufrieron inversión durante el Cenozoico[31]. Comparando la subsidencia del Cretácico en la transecta W-E que cruza el norte de la ECB, muestra las siguientes tendencias:

- Dos sub-cuencas: El Cocuy (región 9) y Tablazo (región 3) sub-cuencas de rift separadas por el bloque con menor subsidencia Santander-Floresta (región 7).
- Una región con menor subsidencia tectónica al Oeste con un alto en la Subcuenca del Cocuy (región 9) y un mínimo en MMB (región 2), sugiriendo una geometría regional de medio rift.

Comparando la subsidencia del Cretácico en una transecta W-E, transecta B en el sur de la Cordillera en latitud de Bogotá, muestra lo siguiente:

- La existencia de una sola cuenca de rift, la sub-cuenca de Cundinamarca (región 4). Variaciones en espesor de la sección perforada en la región axial en intervalos específicos de tiempo, sugiere un alto en la región axial, respecto a las secciones expuestas a lo largo de los flancos de la Cordillera. Modelos de gravedad calculados por Kellogg and Duque apoyan esta afirmación.
- La subsidencia tectónica durante el Cretácico Temprano (Berriasiano a Hauteriviano) fue máxima al lado este de la sub-cuenca de Cundinamarca, indicando que el primer evento de estiramiento principalmente afecto el este del sistema de fallas de Guaicáramo. Más tarde durante el Aptiano, sin embargo la subsidencia fue máxima hacia la zona occidental de la sub-cuenca de Cundinamarca (región 4) sugiriendo que el segundo evento de estiramiento afecto principalmente el oeste del sistema de fallas de Bituima. Durante la

[31] Ibid

subsidencia tectónica el Cretácico fue significativamente mayor en el lado oeste de la cuenca (región 4).

En la región más oriental de la LlAB (región 10), la sedimentación empezó durante el Cretácico Tardío y la subsidencia tectónica total durante el Cretácico fue menor (100 a 200 m) comparada con la ECB Y MMB. La subsidencia fue probablemente producida por calentamiento[32] y carga de agua debido al incremento de la paleo-taza de agua. La subsidencia tectónica en el Valle Superior de Magdalena (región 6), donde la sedimentación marina empezó en el Aptiano, fue significativamente menor que la de ECB y MMB (región 2)[33].

3.3 HISTORIA DE SEDIMENTACIÓN DEL CRETÁCICO

Rocas del Cretácico, incluyendo rocas del Jurásico Superior y depósitos del Paleoceno, forman una mega secuencia delimitada por inconformidades regionales. A gran escala, las rocas del Cretácico representan el mayor ciclo de transgresiones/regresiones con la máxima superficie de inundación en el Cenomaniano – Turoniano, correspondiendo al máximo del Cretácico, incluso del Mesozoico[34],[35] (Fig. 8). A menor escala se observan varios ciclos trangresivos/regresivos, probablemente debido a variaciones del nivel eustático base en el tiempo.

La cuenca de rift fue orientada aproximadamente NNE-SSW, y aparentemente dividida (en las sub-cuencas Tablazo al Oeste y Cocuy al Este), por el paleo-

[32] WATTS, A. B., KARNER, G. D. and STECKLER, M. S., Lithospheric flexure and the evolution of sedimentary basins. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 305: 249-281. 1982
[33] SARMIENTO, 2006 Op. Cit.
[34] FABRE. 1987. Op. Cit
[35] VILLAMIL, Op. Cit.

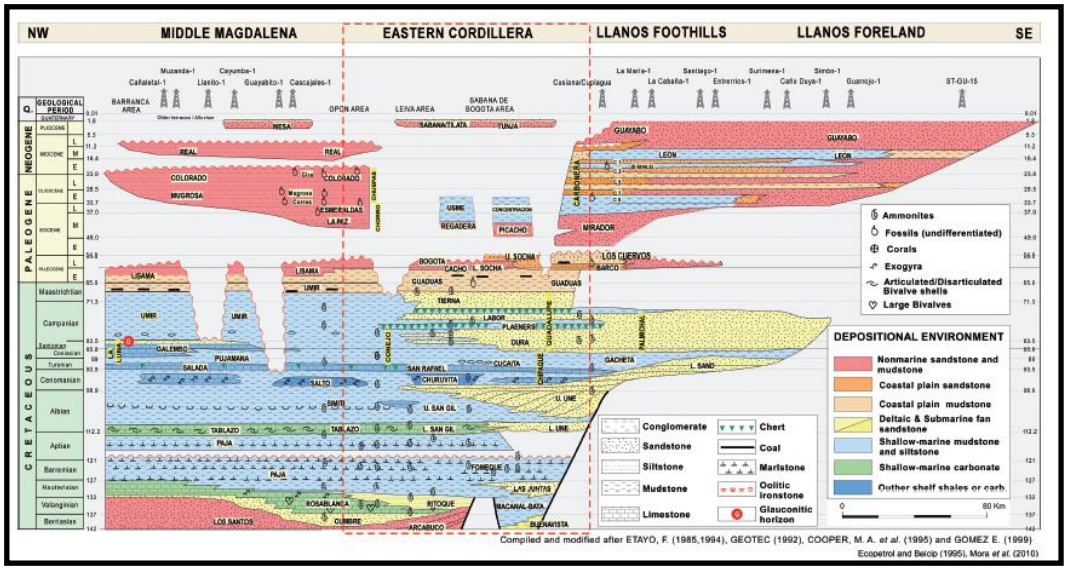
Macizo Santander-Floresta. Estas sub-cuencas continúan al norte en los Andés de Venezuela y el Uribante en la Serranía del Perijá[36].Hacia el sur estas sub-cuencas se unen formando una sola, sub-cuenca Cundinamarca (Burgl, 1961), donde los espesores de la sección Cretácica alcanza un máximo de 7 km. (Figs. 7, 8 and 9).

- **Sedimentación del Sin-Rift del Cretácico Temprano**

La historia de sedimentación del Cretácico Temprano es ilustrada en la figura 9 y 10. La sedimentación inicio en el Jurásico en la sub-cuenca Tablazo y continuó a través del Cretácico Temprano. Bürgl sugirió una incursión marina en la Subcuenca de Cundinamarca la cual inundó un área continental desertica que genero condiciones para la formación de evaporitas durante las primeras etapas de transgresión marina. McLaughlin citó evidencias paleontológicas de edad Berriasiano-Valanginiano de ocurrencia de evaporitas. Durante el Berriasiano un mar epicontinental inundo la cuenca desde el norte de la Cordillera Central hacia la Sub Cuenca de Cundinamarca. El mar avanzó desde el norte de la Sub Cuenca de Cundinamarca entre las dos Subcuencas, mientras que el Paleo-Macizo Floresta-Santander permaneció sumergido[37],[38] (Figuras 8 y 9).

[36] FABRE. 1985ª Op. Cit
[37] Ibid
[38] COOPER, ADDISON, ÁLVAREZ, CORAL, GRAHAM, HAYWARD, MARTÍNEZ, NAAR, PEÑAS, PULHAM, AND TABORDA, Op. Cit

Figura 8. Diagrama estratigráfico de weeler del BCE, MMB, LlAB y cuencas cercanas.



Fuente: Modificado después de Etayo (1985a, 1994), Geotec (1992, 2000), Cooper et al. (1995), Gómez (2001), Sarmiento-Rojas (2001) y Mora et al. (2010). Tomado de Cuenca Cordillera Oriental – ANH. Tectonic evolution of the Eastern Cordillera. After Horton *et al*. (2010a).

El eje horizontal representa la distancia horizontal y el eje vertical representa el tiempo geológico en millones de años. La sedimentación del Cretácico Temprano fue limitada a una cuenca de tipo extensional limitada por fallas normales. La sedimentación del Cretácico Tardío ocurrió durante subsidencia termal e incluyó un área regional fuera de las cuencas extensionales originales. En general la sedimentación del Cretácico correspondió a un ciclo de transgresión-regresión que comenzó con depósitos continentales seguido de una transgresión marina. Transgresión que alcanzó su pico más alto de nivel eustático durante el Cenomaniano, Turoniano y Conianciano.

Las rocas generadoras de hidrocarburos fueron depositadas en esta edad. Ciclos tectono- estratigráficos menores ocurrieron durante este ciclo. Durante el Paleoceno, llanuras de costa y sedimentación fluvial fueron dieron fin al ciclo de transgresión-regresión. Estos sedimentos solo se encuentran en zonas de sinclinal

(región axial Sabana de Bogotá-Tunja Sogamoso) de la ECB. Sedimentos Cenozoicos no se preservaron en los dominios de las estructuras de inversión de la Cordillera, donde afloran rocas de Cretácico y localmente Jurásico. Estas áreas son interpretadas como grabens. Sedimentos fluviales y de llanuras de costa se preservaron en MMB y LlAB, donde se encuentran varios reservorios productores.

- **Sedimentación del Cretácico temprano en Sub-Cuenca Tablazo**

Durante el Jurasico Tardio a Valanginiano la sedimentación fue fluvial de lodos depositados en ambientes de margen marino, evidenciando una transgresión marina (Formación Cumbre[39],[40] Formación Ritoque[41],[42]).

Seguido de aguas poco profundas y plataformas marinas de carbonatos de la Formación Rosa Blanca[43] fueron depositados durante el Valanginiano – Hauteriviano, seguido de lutitas marinas someras de la Formación Paja durante el Hauteriviano-barremiano Figura 9.

[39] MENDOZA, H., La Formación Cumbre, modelo de transgresión marina rítmica, de comienzos del Cretácico. , in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter IX, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 17 p. 1985

[40] RENZONI, 1985c

[41] BALLESTEROS, I., AND NIVIA, A., La Formación Ritoque: Registro sedimentario de una albufera de comienzos del Cretácico. , in Laverde-Montaño, F.E.-S.a.F., ed., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIV, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 17 p. 1985

[42] ROLÓN, L.F., and CARRERO, M.M., Análisis estratigráfico de la sección Cretácica aflorante al oriente del anticlinal de Los Cobardes entre los Municipios de Guadalupe-Chima-Contratación, Departamento de Santander., Tesis pregrado Geología: Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 80 p. 1995

[43] CARDOZO, E., AND RAMÍREZ, C., Ambientes de depósito de la Formación Rosablanca: Área de Villa de Leiva., in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIII, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 13 p. 1985

- **Sedimentación en la Sub Cuenca del Cocuy Durante el Berriasiano – Aptiano.**

La Sub Cuenca del Cocuy inició con una transgresión marina en la parte sur durante finales del Jurásico hasta el Cretácico Temprano según lo registran las brechas de la Formación Buenavista y las calizas de la Formación Guavio[44],[45],[46]. En la zona norte de la Sub Cuenca del Cocuy cambios de facies registran una transición desde sedimentos continentales hasta marinos poco profundos (Formación Lutitas del Macanal) durante el berriasiano a Valanginiano[47]. Durante el Hauteriviano al Barremiano, dominan ondas desarrolladas en ambientes de depositación de arenas deltaicas (Formación Arenisca de las Juntas[48], (ver Figura 8 y 9). En el Hauteriviano se depositaron arenas progradantes en una arremetida rápida en la cuenca[49] probablemente ayudada por una caída del nivel eustático base del mar.

- **Sedimentación del Paleo- Macizo Floresta-Santander en el Cretácico Temprano.**

El Paleo Macizo de Floresta-Santander emergió en el Hauteriviano cuando empezó la depositación de areniscas continentales, seguido de la progradación de areniscas deltaicas (Formación Rionegro, nivel inferior de la Formación Tibasosa) y carbonatos marinos poco profundos. Las dos subcuencas empezaron a formar una sola cuenca durante el Hauteriviano debido a un ascenso del nivel base que inundo el Paleo-Macizo[50],[51]. Este Paleo alto fue una importante barrera para el

[44] ULLOA, C. y RODRIGUEZ, 1976
[45] FABRE, 1985a Op. Cit
[46] MOJICA, J., KAMMER, A., AND UJUETA, G., El Jurásico del sector noroccidental de Suramérica y guía de la excursión al Valle Superior del Magdalena (Nov. 1-4/95), Regiones de Payandé y Prado, Departamento del Tolima, Colombia. , Geología Colombiana: Bogotá, 21 p. 1996
[47] FABRE, 1985ª. Op. Cit
[48] Ibid
[49] Ibid
[50] Ibid
[51] MORENO, J.M., Stratigraphy of the Lower Cretaceous Rosablanca Formation, west flank, Eastern Cordillera, Colombia, Geología Colombiana: Bogotá, 17, p. 65-86. 1990a

movimiento de los sedimentos hasta el Aptiano[52] (Figuras 8 y 9). La secuencia de facies arenosas (Formación Tambor y Los Santos), Calizas (Rosablanca) y Lutita negra (Formación Paja) registrada en la Sub Cuenca Tablazo, es lateralmente más joven al este del Paleo-Macizo Santander-Floresta (Areniscas: Formación Río Negro, Calizas y Lutitas de la Formación Tibú y Mercedes) y Sub Cuenca del Cocuy (Arenisca de la Formación Las Juntas, calizas y lutitas de la Formación Apón;[53]). Estos cambios laterales de facies ocurren como resultado de una oscilación y transgresión marina progresiva hacia el este durante el Valanginiano al Aptiano. (Figura 9 Y 10)

- **Sediementación de la Sub Cuenca Cundinamarca durante el Berriasiano a Aptiano**

La Sub Cuenca Tablazo y Cocuy muestran un aumento gradual hacia el sur de lutitas oscuras depositadas en ambientesdos marinos poco profundos y poco (Grupo Cáqueza, Grupo Villeta[54],[55],[56]). En la Sub Cuenca de Cundinamarca la sedimentación empezó el Titoniano-Berriasiano-Valanginiano con depósitos de turbiditas. Tanto en el flanco este (menor Grupo Cáqueza[57],) como en el flanco oeste (parte baja de las areniscas de Utica, Formación Murca[58],[59],[60] (Figs. 8 y 9). La depositación de turbiditas siguió hasta el Hauteriviano en la zona oriental de la cuenca (Grupo Cáqueza[61]).

---

[52] COOPER, ADDISON, ÁLVAREZ, CORAL, GRAHAM, HAYWARD, MARTÍNEZ, NAAR, PEÑAS, PULHAM, AND TABORDA, Op. Cit.
[53] FABRE, 1985a Op. Cit
[54] Ibid
[55] RUBIANO, J. L.,. Petrography and stratigraphy of the Villeta Group, Codillera Oriental, Colombia, South America. M.Sc. Thesis, Univ. South Carolina, Columbia, SC., 96 p. 1989
[56] SARMIENTO, L.F., Stratigraphy of the Cordillera Oriental west of Bogotá, Colombia, M.Sc. Thesis: South Carolina, Columbia, University of South Carolina, 102 p. 1989
[57] PIMPIREV, C.T., PATARROYO, P., and SARMIENTO, G., Stratigraphy and facies analysis of the Caqueza Group, a sequence of Lower Cretaceous turbidites in the Cordillera Oriental of the Colombian Andes.: Geología Colombiana, Bogotá, v. 17, p. 297-308. 1992
[58]
[59] SARMIENTO, 1989. Op. Cit.
[60] MORENO, 1990a, Op. Cit.
[61] PIMPIREV, PATARROYO, and SARMIENTO, 1992. Op. Cit.

Durante el Cretácico Temprano, la subsidencia de la cuenca superó el suministro de sedimentos lo que dio como resultado la progradacióndsel sistema de turbiditas, y causó que los sedimentos distales cubrieran medio abanico con canales de depósito (e.g. Grupo Cáqueza). En el pos Berriasiano, incrementan el aporte de sedimentos lo cual causa aumento en la subsidencia resultando una progradación del sistema de abanico turbiditico[62] y una progradación de arenas deltaicas durante el Hauteriviano (tope de las areniscas de Utica, e.g. Grupo Cáqueza). En el post-Berriasiano, aumentó el aporte de sedimentos. Hacia el sur, las areniscas marinas someras y calizas de la Formación Naveta marcan el desarrollo de una línea de costa durante el Hauteriviano-Barremiano. Procesos relacionados con la subsidencia diferencial por fallamiento normal que causa inestabilidad en los márgenes de la cuenca favorece procesos de depositación de turbiditas durante principios del Cretácico hasta el Aptiano (base de la Formación Areniscas de Utica, Formación Murca, Formación Socotá, (Figuras 9 y 10).

- **Sedimentación del Post-Rift del Cretácico**

Durante el Albiano Temprano – Cenomaniano Temprano una caída del nivel eustático (nivel relativo del mar) se registró por progradación del tope de la Formación Une y un adelgazamiento en general de las facies. En el Cenomaniano Temprano una secuencia limite muestra una regresión abrupta (lutitas recubrieron los cherts de la Formación Hiló, areniscas de aguas poco profundas de la Formación Churuvita sobre esquistos de Formación San Gil Superior, Villamil, 1993) mientras que en el Cenomaniano Tardío Villamil interpreto el límite de una secuencia marcada (areniscas en el Grupo Villeta, areniscas en el tope de la Formación Churuvita y areniscas al tope de la Formación Une).

Durante el Cenomaniano Tardío, Turoniano y Conianciano el nivel eustático base alcanzó el nivel más alto del Mesozoico. Un relativo aumento del nivel base durante el Cenomaniano Tardío induce una ligera profundización y un notorio

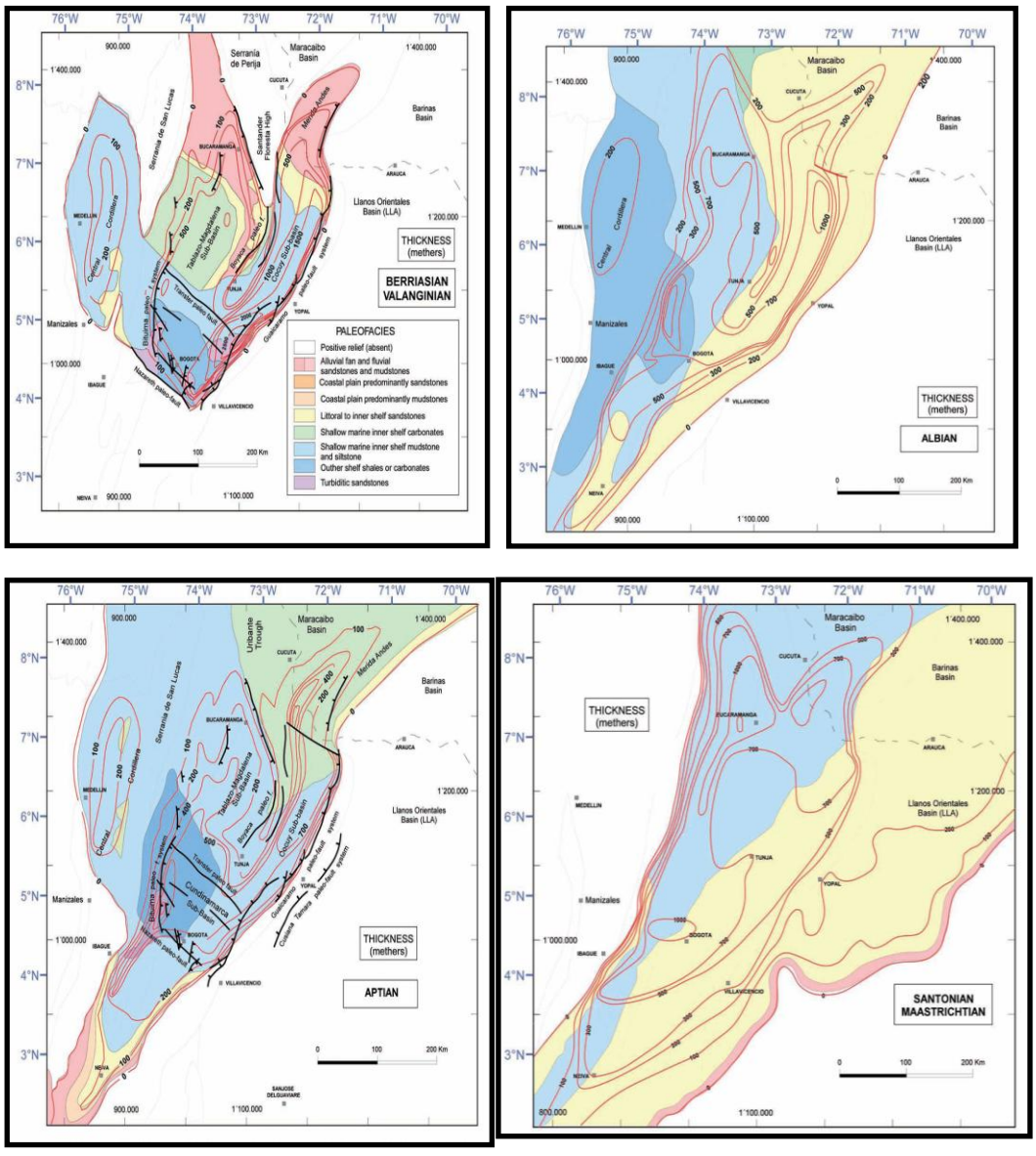
[62] Ibid

decrecimiento de material detrítico en la cuenca, este aumento del nivel base causo depositación lenta de lutitas negras laminadas y facies pelágicas micríticas en zonas distales de la cuenca. La mayor superficie de inundación en el límite del Cenomaniano – Turoniano se caracteriza por un horizonte fosilífero en la Formación Frontera y Formación San Rafael. Durante el Turoniano – Conianciano la hoy cuenca de Llanos Orientales en sus estribaciones se inundó a diferencia del resto de la cuenca (Figs. 8 y 9).

Durante el Santoniano, Campaniano, Maastrichtiano y Paleoceno, una regresión en general y una progradación fueron registrados por facies transicionales de llanura costera (Grupo Guadalupe, Formación Guaduas). Las areniscas del Grupo Guadalupe presentan dos ciclos, de la costa hacia el occidente muestra progradación, agradación y retrogradación dominados por alta energía areniscas ricas en cuarzo. La regresión no ocurrió continuamente, se registran eventos transgresivos evidentes en facies fosfáticas y material silíceo de grano fino (Formación Plaeners, Grupo Olini, tope de la Formación La Luna; Figuras. 8 y 9).

Durante el Campaniano Tardío el nivel del mar continúo cayendo y se dieron principalmente ambientes marinos oxigenados en BCE. La Formación Labor presenta sistemas de regresión con dominio de arenas derivadas de la caída del nivel del mar.

Figura 9. Mapa de distribución de paleo-facies durante el Cretácico en BCE, durante el syn-rift del Cretácico Temprano (Berriasiano a Aptiano) la sedimentación se restringió a grabens limitados por fallas normales. La sedimentación del Cretácico Tardío fue más regional por el aumento de subsidencia durante la fase de subsidencia termal post-rift. Sarmiento-Rojas (2001).



Fuente: SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001.

4. ANTECEDENTES

La Cordillera Oriental de Colombia ha sido objeto de muchos estudios a lo largo de la historia tanto estratigráficos como relativos a su geometría estructural, geoquímicos y otros que servirán de apoyo para el desarrollo de este proyecto.

4.1 ESPESOR DE LAS FORMACIONES FOMEQUE Y CHIPAQUE

El cálculo de los espesores de las unidades a investigar en este trabajo es muy pobre. Respecto a los espesores de las Unidades del Cretácico Inferior y Superior en cercanías del Macizo de Quetame en la literatura se encuentra que para la Formación Macanal en el bloque yacente de la Falla de San Juanito mide cerca de 2700 metros. En el boque occidental la Formación alcanza el máximo espesor de sedimentos post-carboníferos. El espesor medido es de 2920 metros. En el bloque oriental se midió un espesor de 700 metros, Mora. La Formación Fomeque mide entre 500 y 600 metros en el área del pueblo Fomeque. El espesor de Chipaque en cercanías al pueblo con su mismo nombre varía entre 400 y 500 metros.

En cercanías del Macizo de Floresta por el área de Toquilla – Pajarito la Formación Fomeque muestra un espesor de 560 metros, y puede llegar a medir 648 metros, Ingeominas (2001). La Formación Chipaque en el área de Sogamoso – Pajarito mide 480 metros.

En la literatura se pueden encontrar los espesores de cada unidad tanto del Cretácico Inferior como Superior y unidades más jóvenes del Terciario. En la (Tabla 4) se observan algunos espesores reportados en la zona norte del Macizo de Floresta.

Tabla 4. Espesores reportados para el Macizo de Floresta.

FORMACIÓN	EDAD	ESPESOR	AUTOR
Lutitas de Macanal	Barremieano Inferior – Hauteriviano Inferior.	Pajarito: 1200m.	Haas, 1960; Royo & Gómez, 1945; Burgl, 1961.
Las Juntas	Hauteriviano Tardío.	Pajarito: 200 – 270m.	Burgl, 1960; Piraquive et al, 2011.
Fómeque	Barremiano – Aptiano.	Toquilla – Pajarito: 560m.	Piraquive et al, 2011.
	Barremiano medio – Aptiano Superior.		Hubach (Kehler, 1933).
Une	Albiano – Cenomaniano.	Toquilla – Pajarito: 955m (Ingeominas 2011).	Burgl, 1957; Campbell, 1962.
		Páramo Sumapaz: 800 – 1100m.	
Chipaque	Cenomaniano Tardío – Conianciano.	Sogamoso – Pajarito: 480m.	Hubach 1957; Burgl, 1959 y Etayo, 1967.

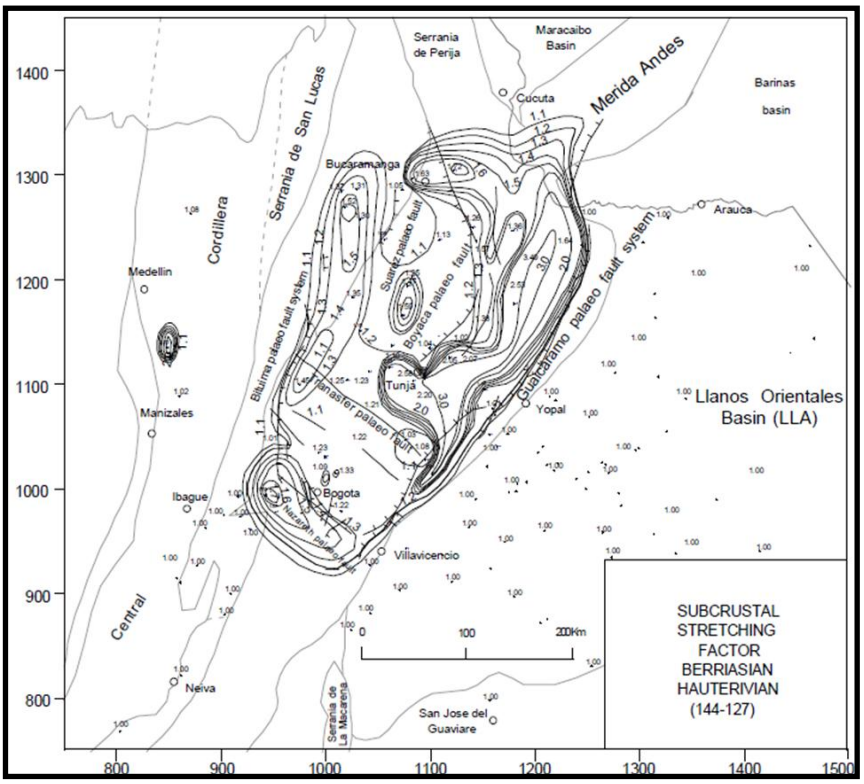
Tabla 5. Espesores reportados en la zona Sur, al este de Bogotá.

FORMACIÓN	EDAD	ESPESOR	AUTOR
Lutitas de Macanal	Berriasiano Inferior – Hauteriviano Inferior.	Fómeque: 360m.	Renzoni, 1968.
		Caqueza: 220m.	
Las Juntas	Hauteriviano.	Cauqeza: 250m.	Renzoni, 1968.
Fómeque	Barremiano Medio – Aptiano Superior.	Bogotá – Villavicencio: 500 - 600m.	Hubach (Kehler, 1933).
Une	Albiano – Cenomaniano.	Une: 760m.	Burgl, 1957;
Chipaque	Cenomaniano Superior – Conianciano.	Chipaque: 400 - 500m.	Hubach 1957.

4.2 COEFICIENTE (β) DE ESTIRAMIENTO DE LA CORTEZA

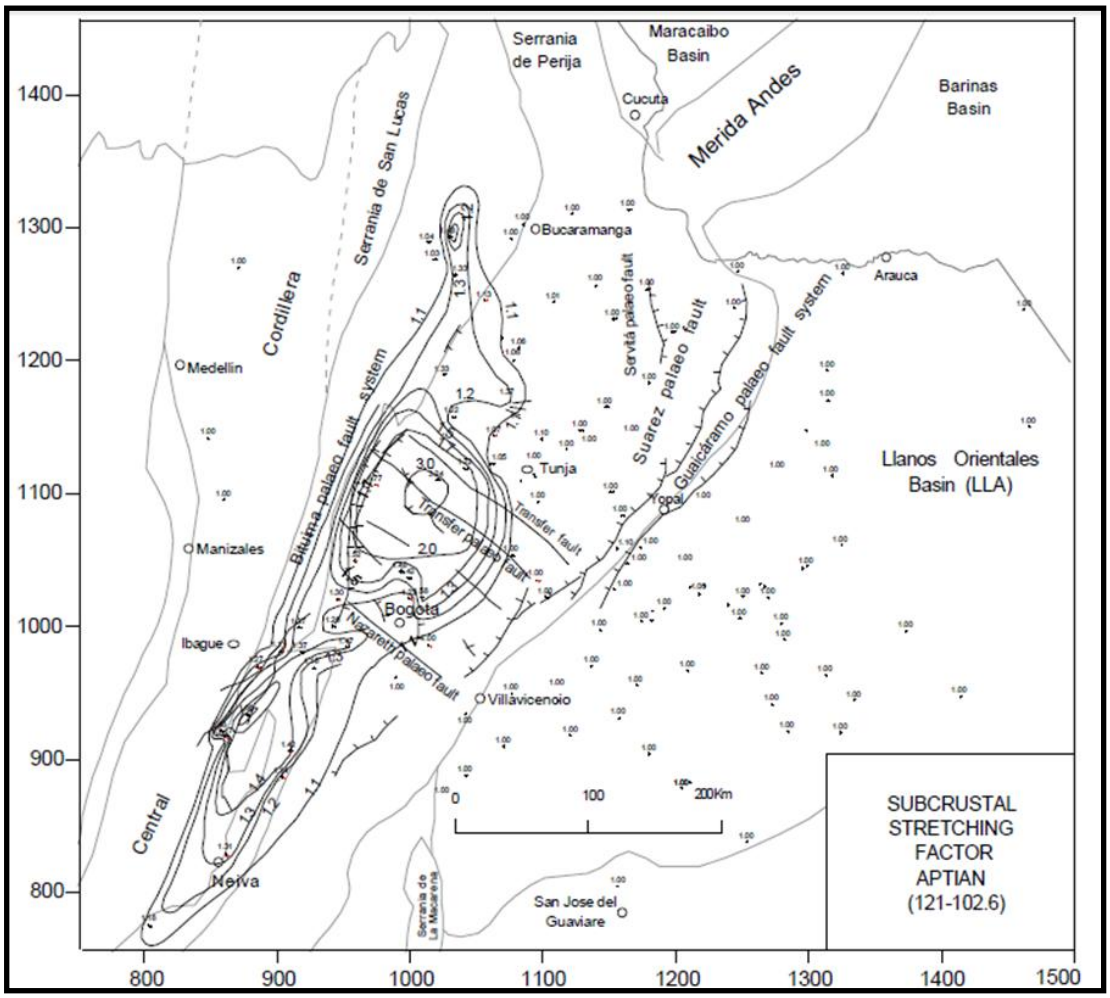
Acerca de la extensión Cretácica Temprana, se han realizado diferentes estudios, uno de los más trascendentales para este trabajo es el de en el cual se define un valor de estiramiento cortical al cual llama delta y otro subcortical al cual llama beta; el valor de estiramiento cortical estimado es de aproximadamente 1.66 (ver figura 10) Este cálculo lo realiza para cuantificar el componente tectónico de subsidencia de la cuenca; con el uso de una técnica de backstripping 1D. Para esto calculó la subsidencia tectónica del registro estratigráfico, usó la isostasia local Airy para corregir el efecto de carga de sedimentos; la mayoría de las columnas estratigráficas son de la literatura, los datos de pozo usados son de Ecopetrol en los cuales revisó cuidadosamente el espesor de cada columna con mapas geológicos disponibles para evitar repeticiones estructurales; las edades son basadas en las encontradas en la literatura. Estos valores de extensión cortical Cretácica (Ver tabla 6) ya publicados en la literatura son calculados con espesores producto de mapas e interpretaciones previas, por lo cual son susceptibles a un ajuste. Los valores de espesores de las Formaciones Fómeque y Chipaque para el proyecto serán medidos directamente en campo y para algunas de las secciones los espesores de las Formaciones Une y Guadalupe serán medidos de la misma forma. Se asumirá una extensión cortical uniforme al calcular los valores beta y se calibrarán valores con datos de Ro de muestras seleccionadas.

Figura 10: mapa de contornos de factores de estiramiento subcortical (β) calculados a partir de modelos de eventos de estiramiento del Berriasiano-Valanginiano (144-127 Ma, Cretacico).



Fuente: SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001.

Figura 11. mapa de contornos de factores de estiramiento subcortical (β) calculados a partir de modelos de eventos de estiramiento del Aptiano (121 – 102.6 Ma, Cretácico).



Fuente: SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001.

La máxima extensión en el Cretácico se presentó en la zona oriental de la Subcuenca de Cundinamarca indicando un primer evento de estiramiento Cretácico que afectó el sistema de falla normales de Guaicaramo (durante el Berriasiano – Hauteriviano), en el Aptiano la subsidencia es máxima al occidente de la Subcuenca de Cundinamarca; lo que sugiere que un segundo evento de

estiramiento afecto el sistema de fallas de Bituima. Sarmiento (2001). La subsidencia tectónica total durante el Cretácico fue ligeramente mayor en la zona occidental de la cuenca. En la zona más oriental del área de Llanos la sedimentación inicia durante el Cretácico Tardío y la subsidencia total durante el Cretácico fue menor (100 – 200 m) comparado con la CCO y VMM, la subsidencia fue producida probablemente por subsidencia térmica (Watts *et al.,* 1982) y por la carga de agua debido al aumento de la Paleo-profundidad. La subsidencia tectónica total en el VSM donde la sedimentación marina empezó en el Aptiano es significativamente menor que la CCO y VMM.

La división de la cuenca indica subsidencia tectónica por delimitación de los bloques fallados usando el método de Mackenzie, Hebrard y Fabre proponen un evento de estiramiento litosférico durante el Cretácico temprano seguido de subsidencia térmica.

Tabla 6: Eventos de estiramiento en el Mesozoico y factores de estiramiento. Eventos de estiramiento del Cretácico y factores de estiramiento litosférico de columnas estratigráficas donde el registro sedimentario está presente.

LUGAR	EVENTO 4				EVENTO 5				EVENTO 6			
	Periodo		β	δ	Periodo		β	δ	Periodo		β	δ
	Desde	Hasta			Desde	Hasta			Desde	Hasta		
San Luis de Gaceno	144	127	0,98	1,449								
Tunja	133	127	2,2	1,185								
Paz del Río	144	127	1,39	1,154					98	93	1,07	1,07
Chichimene									98	93	1	1
Aguazul	142	127	1,21	1,309					98	93	1,1	1,098
Tibasosa	132	127	2,05	1,181								
Simijaca	142	130	1,25	1,247	121	112	3,2	1,3				
Apiay-4P									85,9	85,8	1	1
Pajarito	142	127	1,17	1,303					98	93	1,11	1,104
Medina-1	144	127	3,61	1,118					98	93	1,1	1,103
Cormichoque-1	122,4	122,3	2,03	1,179								
Tunja-1	132	127	2,58	1,213								
Bolivar-1	132	127	2,07	1,186								
Suesca-1	142	130	1,22	1,217	121	112	2,48	1,3				

Tabla 6. (Continuacion)

LUGAR	EVENTO 4				EVENTO 5				EVENTO 6			
	Periodo		β	δ	Periodo		β	δ	Periodo		β	δ
	Desde	Hasta			Desde	Hasta			Desde	Hasta		
La María-1									98	93	1	1
Caqueza	144	127	1,23	1,228					98	93	1,29	1,129
Guateque	138	127	1,04	1,405					98	93	1,09	1,052
Floresta	132,6	127	1,024	1,037								
Sogamoso	136,5	127,5	1,459	1,354								

Fuente: SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001.

4.3 FLUJOS DE CALOR Y EDADES DE GENERACIÓN DE HIDROCARBUROS DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE

La reconstrucción de la historia térmica muestra en general que para la primera parte (pre-Cenozoica) el flujo de calor está en el rango de 33 a 63 mW/m2, el cual está dentro del rango establecido para este tipo de condiciones geológicas. Para la segunda parte (inversión) los flujos de calor presentan una disminución gradual en el tiempo desde el último valor calculado en fase de extensión, hasta valores cercanos a 23 mW/m2 en algunos casos, estos valores también se encuentran en el rango establecido para cuencas de Foreland (Allen & Allen, 2005). Este comportamiento presenta excepciones, por en algunos puntos se presenta un incremento en el flujo de calor en el Oligoceno (30 Ma.), y otros presentan valores flujo de calor muy alto en el presente (cercano 80 mW/m2), lo cual se debe a intrusiones magmáticas en el área. En la zona del piedemonte también presentan anomalías, aumentan su valor de flujo de calor en el presente (cercanos a 40 mW/m2), rompiendo con la tendencia de disminuir desde el último valor calculado en la fase de pos-rift. Ecopetrol (2008).

Hacia el sur de la Cordillera Oriental se induce la generación inicial de hidrocarburos debido a la depositación de las suprayacentes Formaciones Guadalupe, Guaduas, Barco y Cuervos. La Facies Chipaque Oeste entra en generación primero que la Facies Chipaque Este, alcanzando hasta un 53% de transformación de materia orgánica total presente, con 2730 Mbls de hidrocarburos generados, 2672 Mbls. corresponden a aceite y 57 Mbls. a gas. Solo fueron expulsados 76 Mbls., parte de los cuales a través de migración vertical lograron acumularse en pliegues anticlinales de bajo relieve de la Formación Guadalupe.

4.4 DATOS GEOQUIMICOS DE LAS FORMACIONES DE ESTUDIO

En la literatura se encuentran publicaciones de A. Mora y M. Parra donde se citan datos de Ro y algunos de paleotemperaturas para Formaciones del Cretácico temprano y tardío; determinan la paleotemperatura de la Formación Chipaque en el sector sur de la Falla Naranjal, dicha paleotemperatura máxima se determina en tres muestras y arroja un rango de 95 °C – 117 °C, y un Ro entre 0,60 y 0,80 %. Para la zona axial de la Cordillera Oriental los valores de Ro en unidades del Cretácico Superior son de 0.6 a 0.7 % (Formación Guadalupe).

Análisis geoquímicos para dos secciones en la zona Norte del área de estudio muestran un predominio de Kerógeno tipo II y en algunas secciones tipo III. La petrografía orgánica indica que la materia orgánica presente en la Formación Chipaque está constituida en un 80% y 95% por lípidos depositados en ambientes marinos de plataforma. Estas características del Kerógeno le dan a la Formación un alto potencial generador de HC.

La parte inferior de la Formación Chipaque presenta mayor potencial de generación de HC. Sin embargo los datos de pirolisis y petrografía orgánica muestran que estas rocas hoy son rocas generadoras agotadas las cuales expulsaron un 85% de los HC generados antes del evento orogénico que las llevo a superficie. Ver tabla 7.

Tabla 7. Datos geoquimicos de las formaciones de estudio

SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA	UNIDAD	MUESTRA	Ro	TOC	TIPO KERÓGENO
CUCERO	CHIPAQUE	1	1,31	0,46	II
		2	1,66	0,84	II
		3	1,83	0,58	II
		4	1,57	0,69	II
		5		0,51	II
		6		2,47	II
		7	1,61	1,61	II
		8	1,69	0,97	II-III
SAN ANTONIO	CHIPAQUE	1	0,71	1,03	II-III
		2	1	1,12	II
		3	0,85	1,34	II
		4	0,86	2,24	II
		5	0,91	1,73	II
		6	0,82	1,98	II

Fuente: Tomado de: M. Cesar, M.P. Torres and J. Escobar (1997) Potencial generador de hidrocarburos de la Formación Chipaque y su relación con la estratigrafía de secuencias en la zona axial de la C.O, Colombia.

5. METODOLOGÍA

5.1 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES

Se realizó el levantamiento de 5 secciones estratigráficas escala 1:100 por dos métodos; bastón de Jacob y poligonal. Se tomó muestra cada 10 metros para realizar análisis geoquímicos y de palinología. En algunos tramos de las secciones no fue posible la toma de muestra debido a condiciones geomorfológicas o climáticas, como fuertes lluvias y crecientes de quebradas. Se levantaron 3 secciones de la Formación Chipaque distribuidas de la siguiente forma a lo largo de la Cordillera Oriental: al Sur, en el Municipio de Choachí; por la vía que de Sogamoso conduce a Yopal en la vereda El Crucero y en el Municipio de Pajarito ubicado sobre la vía que conduce a Yopal. 2 secciones de la Formación Tibasosa en el área de Sogamoso.

5.2 ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE LITOFACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN.

Las secciones estratigráficas se analizaron en su totalidad para realizar una división de litofacies y definir con esto ambientes de depósito de sedimentos. El análisis de litofacies se realizó de acuerdo con Farrell[63] quien propone una clasificación basada en la textura de rocas sedimentarias clásticas que puede ser aplicada universalmente, esta clasificación es independiente de la composición,

[63] Farrell, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D.J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., SELF-TRAIL, J. M. & LAUTIER, J.C., Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock: Journal of Sedimentary Research, v. 82, p. 364-378. 2012

cementación y ambiente geológico, y está relacionada estrechamente a procesos sedimentológicos.

Los ambientes sedimentarios en los que se produjo la acumulación de sedimentos de las unidades analizadas, sigue el esquema de Walker. Se consideran asociaciones de facies como elementos estructurales básicos de los ambientes de depósito; teniendo en cuenta controles externos del sistema como cambios eustáticos del nivel del mar, cambios en velocidad de aporte de sedimentos y subsidencia local. La interpretación se realiza analizando las litofacies en conjunto para ponerlas así en un mismo contexto. Por esta razón la información textural, espesor, estructuras sedimentarias descritas en campo se presentan por segmentos resaltando los aspectos más importantes.

Los análisis Palinológicos de las muestras obtenidas en campo, se realizaron en los laboratorios de Palinología y Bioestratigrafía del Instituto Colombiano del Petróleo, Bucaramanga. Las pruebas Geoquímicas realizadas a las muestras colectadas en campo se hicieron en los laboratorios de Geoquímica del Instituto Colombiano del Petróleo, Bucaramanga.

5.3 ELABORACIÓN DEL MAPA PALEOGEOGRÁFICO

Para la elaboración del mapa paleogeográfico se tomó uno ya existente de edad Turoniano, elaborado por Ingeominas al cual se le realizaron los aportes definidos en los análisis de litofacies y para la ubicación de las secciones en el tiempo, se realizó una restitución para tener precisión de la ubicación de la unidad medida en la edad Turoniano. Dicha ubicación se determinó con base en 30 secciones a las cuales se les realizó restitución en 9 tiempos para dos áreas piloto al Sur y Norte de la Cordilleta Oriental (proyecto de Crudos pesados de Ecopetrol), (ver figura

12). Las nuevas coordenadas se definieron interpolando en el software Move las secciones medidas de la Formación Chipaque a la sección más cercana de las 60 restituidas (ver figura 13). Seguido de esto se corrió la restitución del punto en el software Fetkin, el cual arroja la coordenada en (x, z). Esta coordenada se inserta en Move 2D y se convirtió en coordenada (x, y, z), (ver figura 14). El procedimiento se realizó con las 3 secciones de la Formación Chipaque que fueron medidas en campo.

Figura 12. Ubicación de las áreas piloto Norte y Sur restituidas en 9 tiempos.

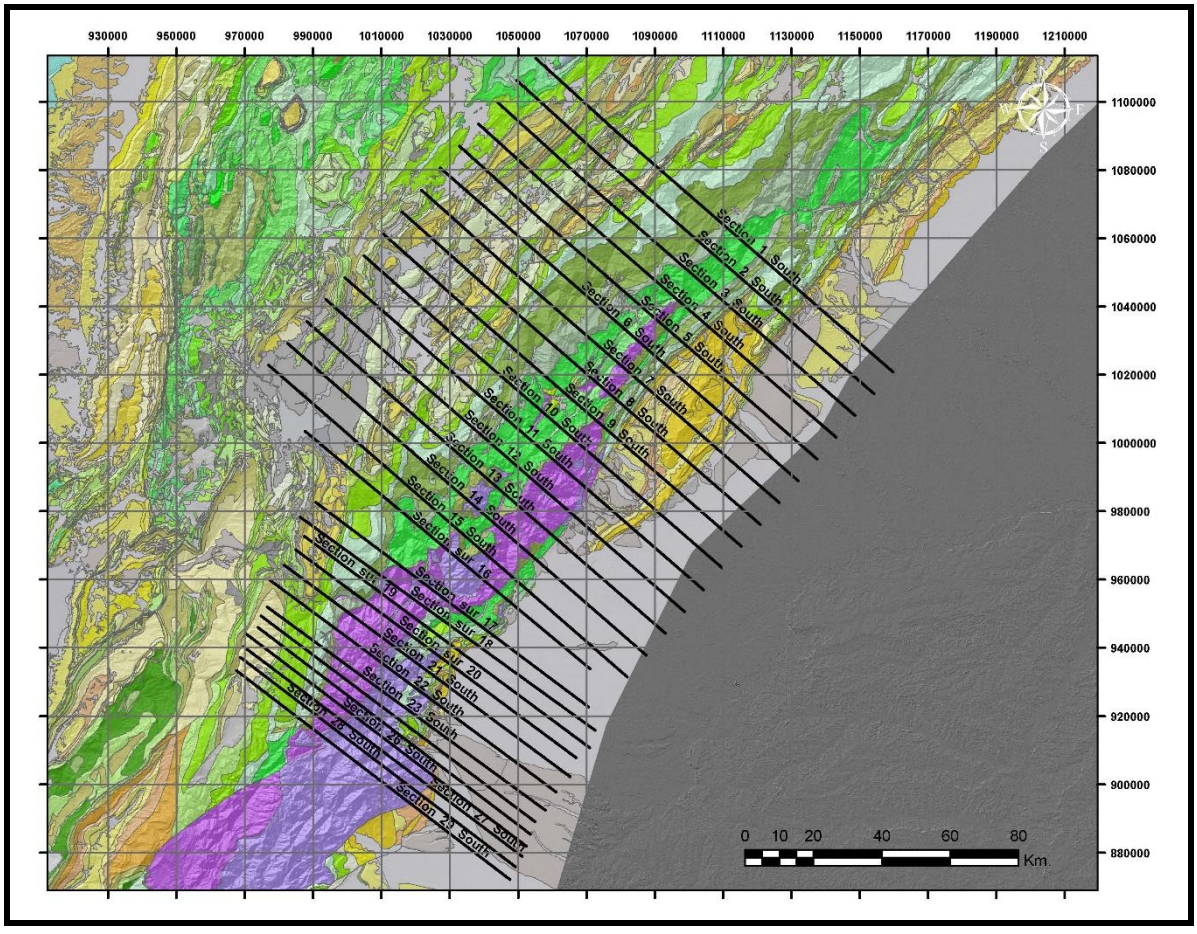


Figura 13. Perfil actual, el punto azúl indica las coodenadas de la sección actualmente después de la interpolación a la sección 14 del área Norte.

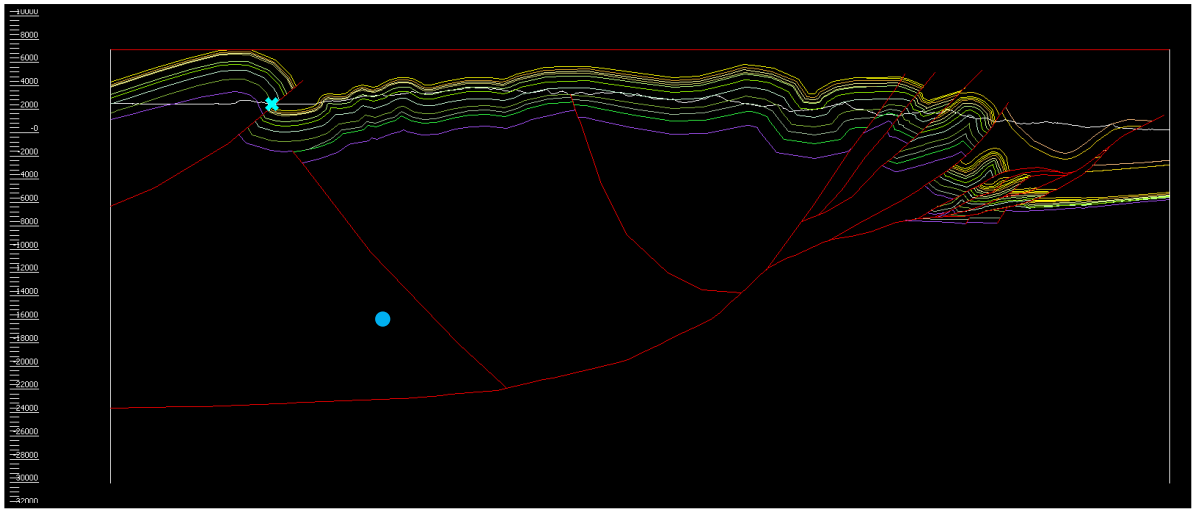
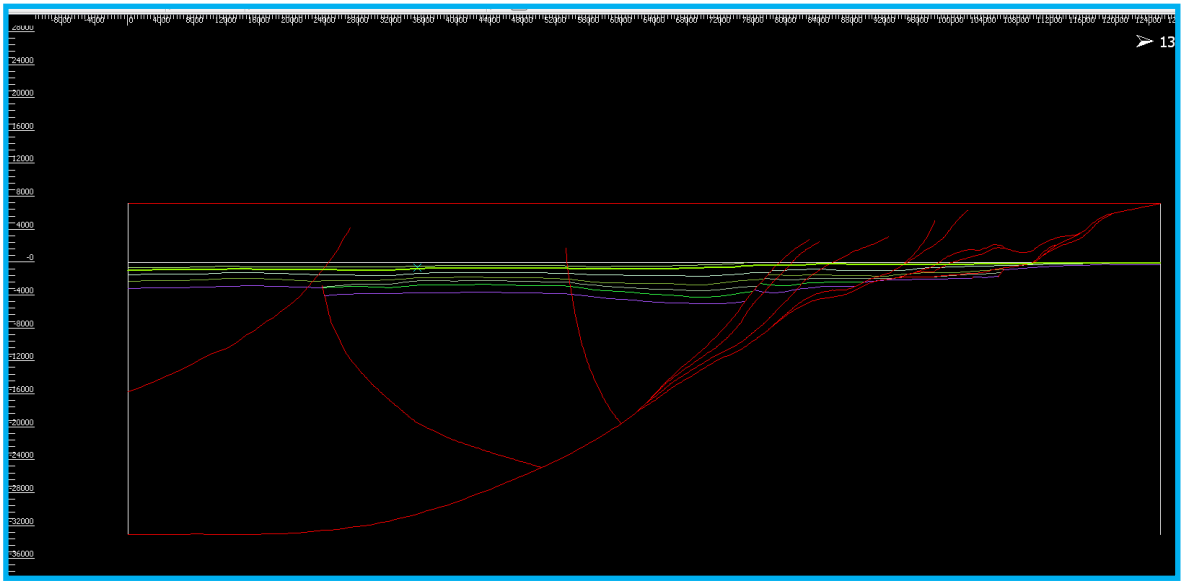


Figura 14. Sección restituida a edad Turoniano.



5.4 HISTORIAS DE SUBSIDENCIA Y CÁLCULO DE LA MAGNITUD DE ESTIRAMIENTO

Para elaborar las historias de subsidencia era necesario tener datos de espesores reales, litología, ambientes de depósito y edades de las Formaciones pertenecientes al Cretácico Superior e Inferior y Terciario; para ello fue necesario realizar una compilación de datos del área de estudio existentes en la literatura como columnas estratigráficas, datos de perforación de pozos, memorias de mapas elaborados por Ingeominas.

Con los datos de la literatura y los datos obtenidos de las muestras traídas de campo a las cuales se les realizó análisis de laboratorio (geoquímicos y de palinología); se realizó el modelado de las historias de subsidencia de 3 transectas a lo largo de la Cordillera Oriental usando la técnica de Backstripping 1D, los diseños se trabajaron en una hoja de cálculo elaborada por B. Horton (U.Texas), M. Parra (ICP) y J.C. Ramírez (UIS).

El cálculo de la magnitud de estiramiento se realizó teniendo en cuenta los datos de Synrift y postrift arrojados en la historia de subsidencia. Se partió de valores conocidos de espesor litosférico pre-cretácico (YL), con base en dichos valores se calcularon tres posibles valores de factor de estiramiento (β) implementando el modelo de rifting de McKenzie, usando la metodología de Allen & Allen[64] en una hoja de cálculo desarrollada por M. Parra (ICP). Con cada par de (YL, β) se elabora una curva de subsidencia tectónica observada en la fase de postrift (entre 136 y 70 Ma).

[64] PHILIP A. A., and J. R. ALLEN, Basin Analysis, principles and aplications. 1990.

Por último para calcular el espesor de la Corteza (Yc) se usó cada par de (Yl, β), hallados en la hoja de cálculo anterior, los cuales al ser modelados nos arrojan el valor de (Yc) adecuado para reproducir la subsidencia sinrift observada. Con los tres valores (Yl, Yc, β) se generaron curvas las cuales muestran la subsidencia tectónica sinrift y postrif. Los cálculos y modelos de la subsidencia siguen las ecuaciones y conceptos especificados en Allen & Allen; estas ecuaciones se desarrollaron en una hoja de cálculo en Excel elaborada por Mauricio Parra.

Por otra parte los modelos de PetroMod arrojan historias de subsidencia teniendo en cuenta la erosión que se ha dado a través de la historia de sedimentación. Dichas historias y modelos requieren calibración con datos de reflectancia de vitrinita con los cuales se obtendrá el espesor erodado de las formaciones terciarias, teniendo en cuenta los gráficos de Baker y Pawlewicz. (Ver figura 15) y la información de la tabla 8 fue tomada de Ecopetrol (2008), donde se calcula la profundidad máxima (Max) para la máxima temperatura, considerando un gradiente geotérmico de 25 y de 30°C por Km y 25°C en superficie.

Figura 15. Variación de los datos de Ro y Temperatura.

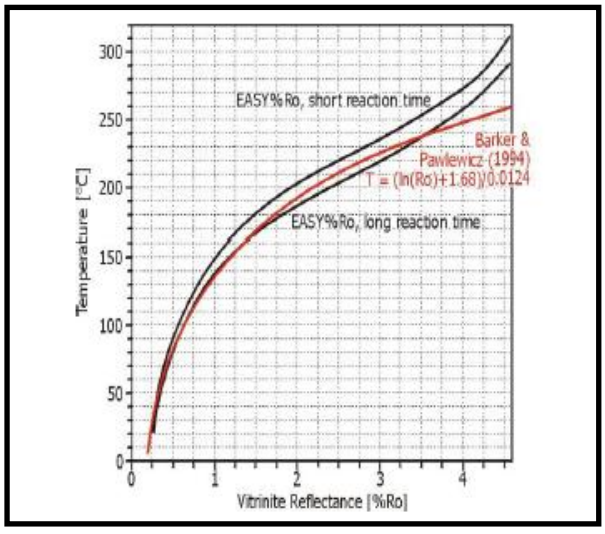


Tabla 8. Cálculo de la profundidad de enterramiento teniendo los datos de Ro.

Rango de Ro	T (°C)	Profundidad Max (km)
0.2-0.4	5-61	1.2 - 1.4
0.4-0.6	61-94	2.3 - 2.7
0.6-0.8	94-117	3.1 - 3.7
0.8-1.0	117-135	3.7 - 4.4
1.0-1.5	135-168	4.7 - 5.7
1.5-2.0	168-191	5.5 - 6.6
2.0-2.5	191-209	6.1 - 7.3
2.5-3.0	209-224	6.6 - 7.9
> 3.0	> 224	> 8

Fuente: BAYONA, G., VALENCIA, A., & ORTIZ, J. Control de Subsidencia en el Flanco Este de la Oriental y Correlaciones Estratigráficas del Sector Sur de los Llanos Orientales. Informe Interno ICP. 2008.

5.5 MODELOS TERMALES 1D DE CARGA DE HIDROCARBUROS

Con los datos de espesor, edad. Litología, paleobatimetria, cambio eustático, espesor erosionado y cada combinación de parámetros obtenidos anteriormente (Yl, Yc, β), se modela la historia termal de cada sección trabajada en el software Petromod.

5.5.1 Calibración de parametros límite. La calibración de las condiciones límite para la simulación (Paleo Water Depth (PWD), Sediment Water Interface Temperature (SWIT) y Heat Flow History (HF) se efectúa con módulos internos del paquete usando otra serie de datos de entrada: temperatura de fondo de pozo (BHT) y reflectancia de la vitrinita (%Ro) entre otros. A continuación se describe como se calibró cada una de estas condiciones.

- **PALEO WATER DEPTH (PWD)**

La tabla de agua en una cuenca sedimentaria tiene varios efectos; entre estos esta la compactación, pues impone una carga adicional a los sedimentos. Por esto para efectos de decompactación debe tenerse en cuenta. Errores en la paleo tabla de agua pueden tener efectos en la carga y en la predicción de las presiones en especial en ambientes de aguas profundas. Esta condición se calibro con las profundidades de los diferentes ambientes de depositación de las unidades reportadas por Bayona[65], para evitar inconsistencias con la forma en que el paquete recibe los datos se estableció como Cero (0) la paleo tabla de agua de las unidades de origen continental.

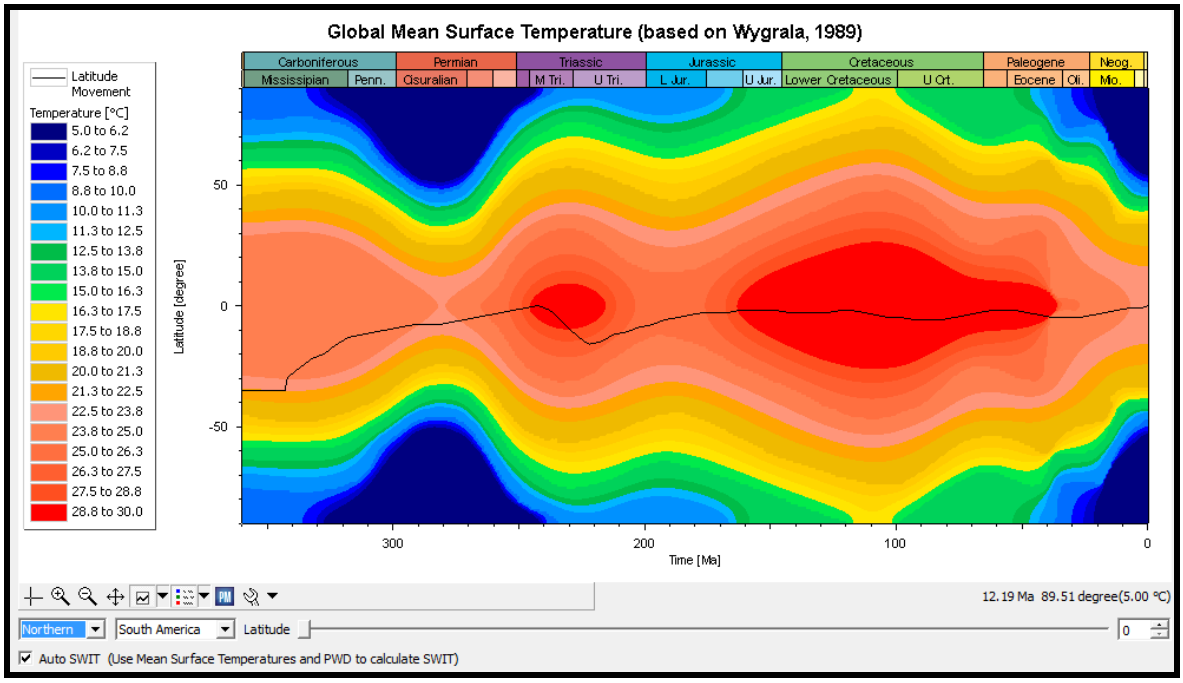
- **SEDIMENT WATER INTERFACE TEMPERATURE (SWIT)**

La historia de la temperatura de superficie es condicionada por la paleolatitud, el paleoclima y la paleo profundidad de la tabla de agua. La alteración de la temperatura de superficie cambia sustancialmente la profundidad de la ventana de generación obtenida en las simulaciones.

Esta condición límite fue calibrada con el módulo de Global Mean Surface Temperature, en el vual se ingresan los datos de posición geográfica del área de estudio y él automáticamente tabula los valores de la temperatura en el tiempo.

[65] BAYONA, G., VALENCIA, A., & ORTIZ, J. Control de Subsidencia en el Flanco Este de la Oriental y Correlaciones Estratigráficas del Sector Sur de los Llanos Orientales. Informe Interno ICP. 2008

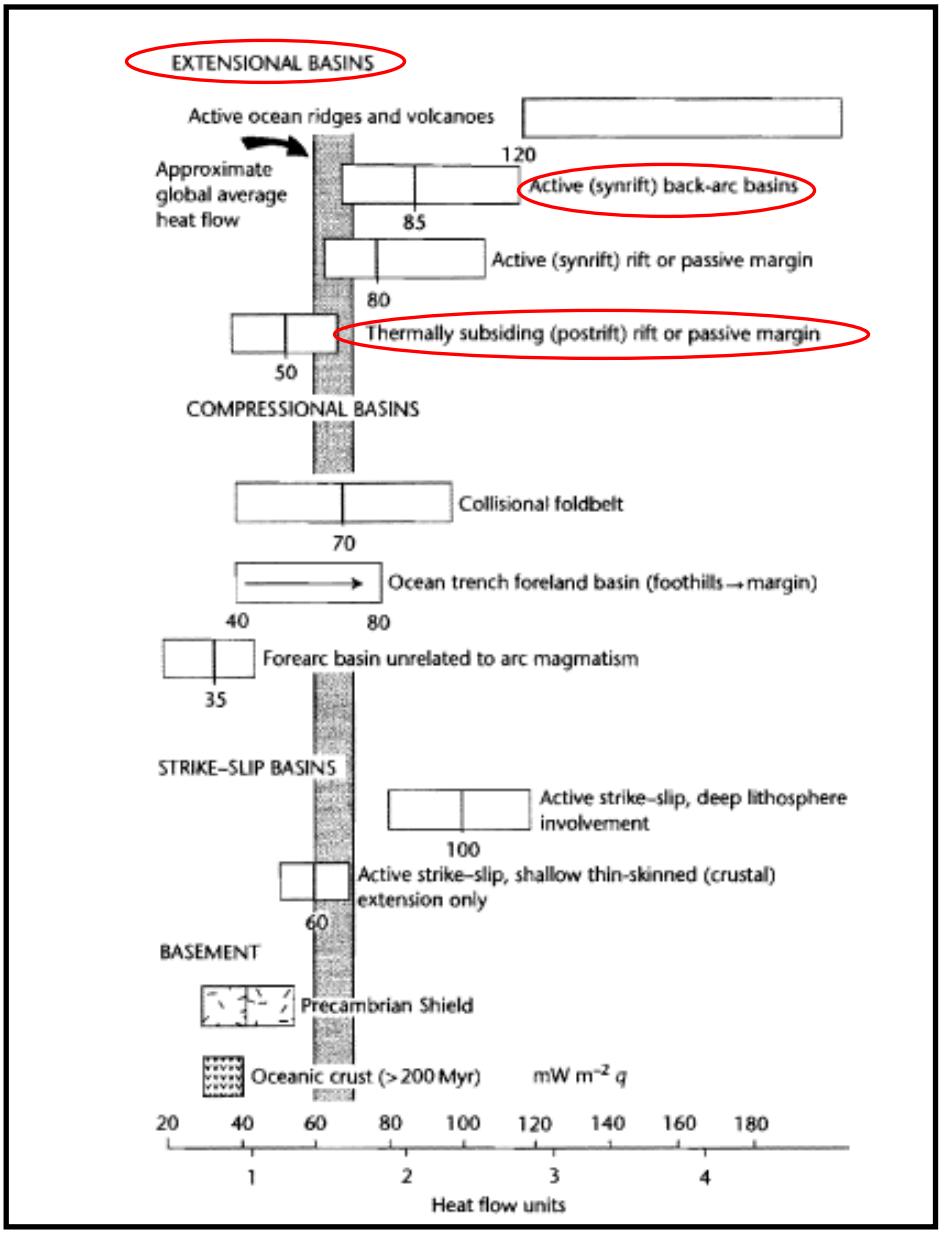
Figura 16. Imagen del módulo Global Mean Surface Temparature.



- **HEAT FLOW HISTORY (HF)**

La reconstrucción de la historia térmica es de gran importancia en la predicción de la carga de hidrocarburos, en una cuenca sedimentaria las reacciones que dan lugar a los procesos de generación, migración, acumulación y preservación están principalmente controladas por la temperatura, en donde la presión juega un papel secundario. Se trabajó bajo los parámetros que proponen Allen & Allen (Ver figura 17) los cuales proponen diferentes rangos de flujos de calor en cuencas extensionales para el Sinrift, Postrift y subsidencia termal.

Figura 17. Flujos de calor básicos asociados a cuencas sedimentarias.



Fuente: Tomado de ALLEN & ALLEN (2005). Para este trabajo se compararon los flujos de calor para cuencas extensionales, encerradas en círculos rojos.

5.5.2 Cinética usada para los modelos 1D. La cinética elegida para realizar los modelos 1D de generación se hidrocarburos fue[66] IIB.

Se usó esta cinética debido al enfoque que tiene en el Kerógeno tipo II, que es el tipo de kerógeno que se encuentra en las muestras de la Formación Chipaque y Formación Tibasosa.

El kerógeno tipo II se caracteriza por que sus organismos son de origen marino y su textura sapropélica con escasos aportes de material terrígeno, depositados en su mayoría en ambientes de plataforma somera o profunda, y está constituido por alginitas, esporinitas, cutinitas, polen y exinitas. En etapas tempranas de madurez el kerógeno tipo II comienza a generar aceites parafínicos pobres en ceras y ricos en naftenos, mientras que en etapas avanzadas de madurez genera aceites ricos en aromáticos y mayores cantidades de gases[67]. revisaron los modelos cinéticos simples de generación total del petróleo usados para predecir la sincronía y la tasa de generación y modificaron el modelo de Cooles, proponiendo que el kerógeno puede ser reactivo o inerte. Similarmente, las cinéticas globales de Pepper y Corvi[68] están basadas tanto en datos de campo como de laboratorio para las colecciones de rocas generadoras que representan cinco organofacies genéricas con distintos ambientes de depósito y edades estratigráficas.

[66] PEPPER, A.S., and P.J. CORVI, Simple kinetic models of petroleum formation: Part-III Modelling an open system: Marine and Petroleum Geology, v.12, p. 417-452. 1995
[67] Ibid
[68] Ibid

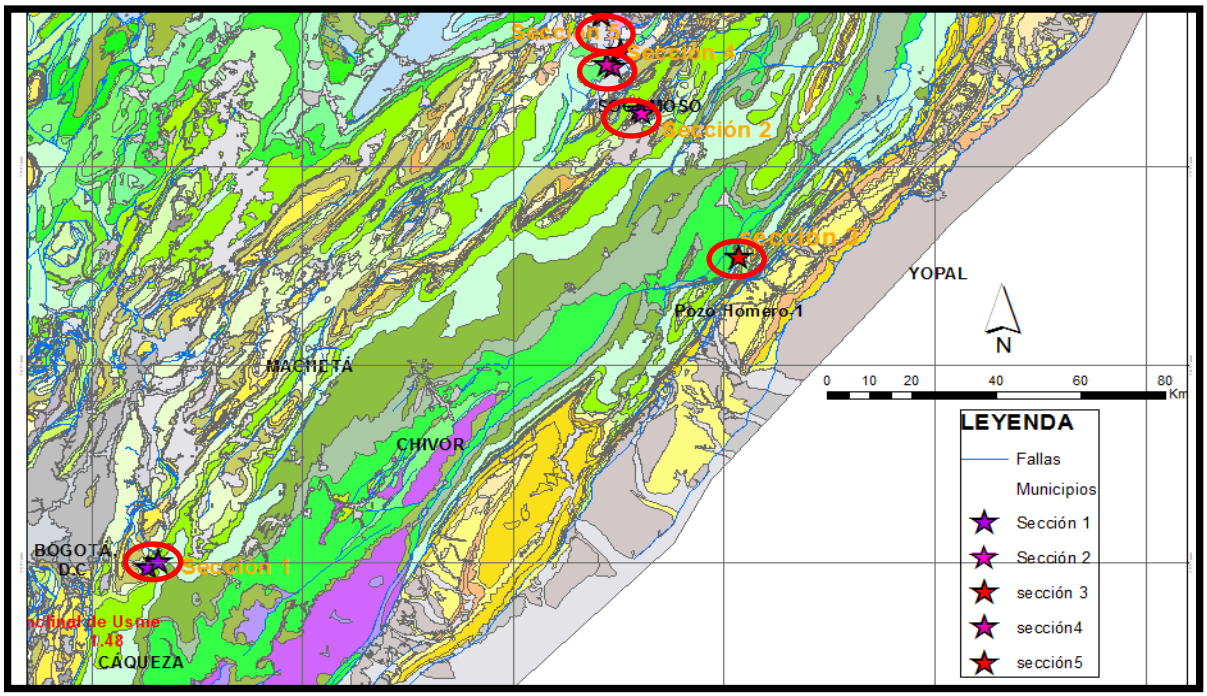
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se presentan 5 secciones medidas sobre la Cordillera Oriental. Dichas secciones fueron seleccionadas según los requerimientos de los proyectos desarrollados en Ecopetrol y las necesidades de adquirir nuevos datos de las Formaciones posiblemente generadoras de los hidrocarburos que hoy se encuentran en la Cuenca de los Llanos Orientales; especialmente espesor, edades y propiedades geoquímicas de las muestras que se debían colectar en campo.

Las secciones actualmente se incorporaron a los proyectos como complemento a la investigación ya realizada para correr modelos 2D y realizar reestructuración de perfiles estructurales de zonas piloto al Sur y Norte de la Cordillera Oriental.

6.1 UBICACIÓN, LITOFACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN DE SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS.

Figura 18. Mapa geológico de ubicación de las 5 secciones medidas en campo. Se observan los puntos de inicio y fin de cada sección



6.1.1 Sección compuesta de la Formación Chipaque – Municipio de El Crucero (Boyacá) – Mongua (Boyacá). La zona donde se midió la sección comprende los alrededores de la Laguna de Tota en el departamento de Boyacá y al noreste del municipio de Mongua donde se encontró el contacto inferior de la Formación Chipaque con La Formación Une.

De acuerdo a los objetivos planteados se realizó el levantamiento de dos secciones estratigráficas, La primera, se encuentra localizada en el sector de la Laguna de Tota, plancha 192 en el departamento de Boyacá. Este afloramiento se

encuentra en la vía Sogamoso – Pajarito, a 12.5 km de la cabecera municipal de Sogamoso.

La correlación de las dos secciones medidas se realizó conociendo los espesores de la base de la Formación y teniendo encuenta marcadores litológicos que marcan el inicio de la zona intermedia como paquetes de arenas, inicio de paquetes potentes de lutitas y cambios rápidos de tamaño de grano en las arenitas. La sección tomada para realizar la correlación se midio aguas arriba de la Quebrada San Antonio, La Colorada, Vara Santa, afluentes del Río Lengupá, paralelo a la carretera Santa María – San Luis de Gaceno[69]. Se usa esta sección teniendo en cuenta que se observan mejores afloramiento que en la sección tipo, también, por cercanía con la zona de trabajo. Únicamente se correlaciona la base debido a la necesidad de empalmar las secciones medidas en el trabajo. (Ver figura 19).

COORDENADAS DE LA SECCIÓN:

INICIO (Base): X: 1130199
Y: 1113356
FIN (Tope): X: 1130661
Y: 1112319

[69] GUERRERO, J. & SARMIENTO, G. Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera – Geología Colombiana, n.20, p.3-66, 9 Figs., Bogotá. 1996

Figura 19. Correlación de la base de la Formación Chipaque en el área de trabajo para conocer el espesor de la base

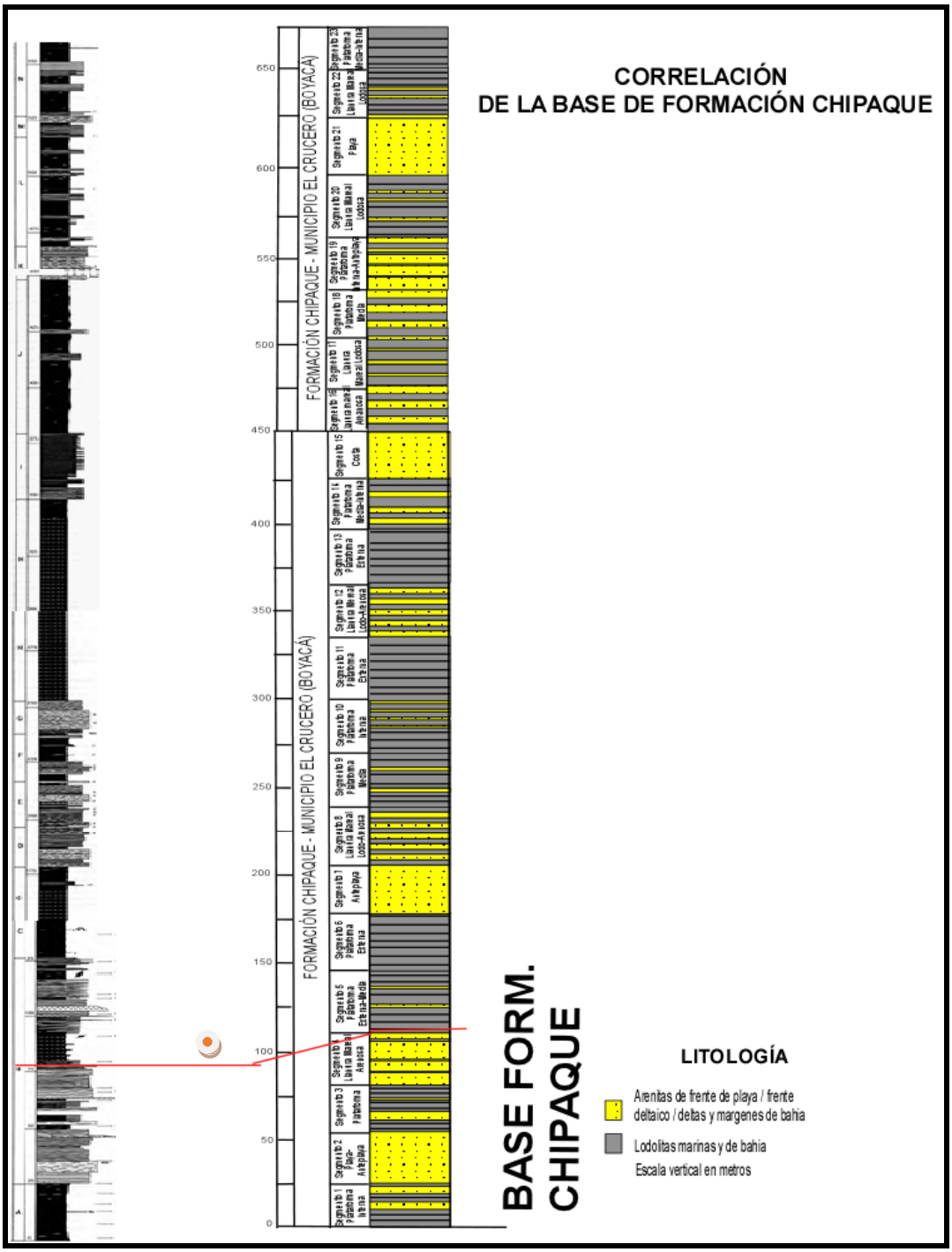
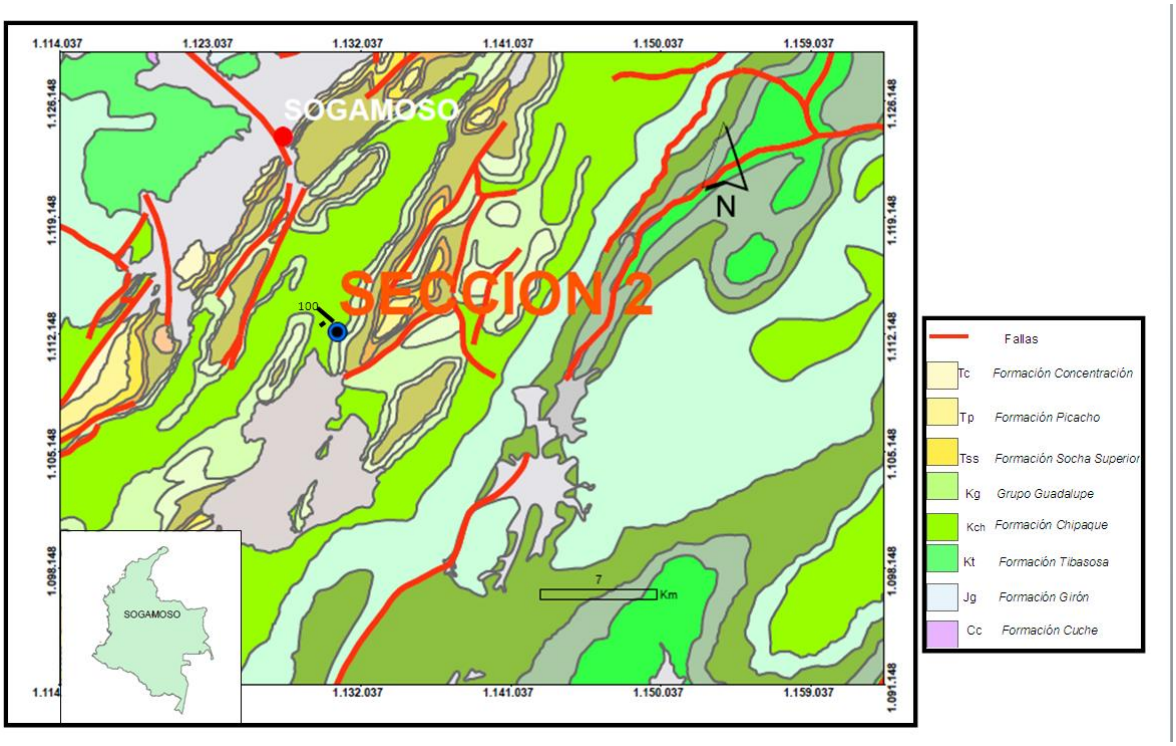


Figura 20. Ubicación de sección intermedia y tope Formación Chipaque, Municipio El Crucero, vía Sogamoso – Yopal.



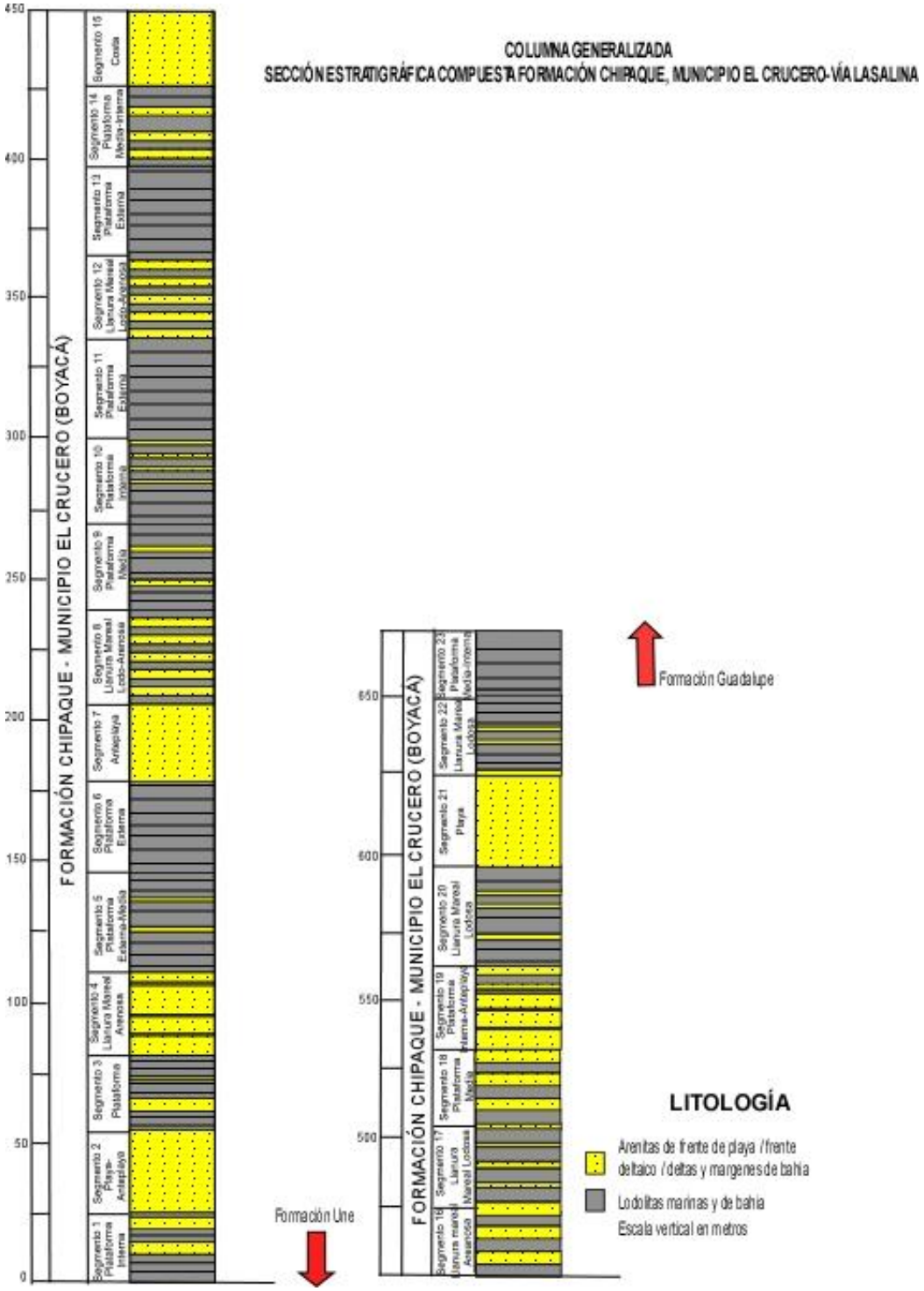
La segunda sección es algo más retirada del casco urbano. Esta se encuentra en la vía que de Mongua conduce a las canteras de La Salina, ubicada a 45 minutos del municipio de Mongua.

Geológicamente el área en estudio, se encuentra en la parte central de la Cordillera Oriental, al Este del Macizo de Floresta, donde secuencias sedimentarias fueron depositadas durante el Cretácico y el Terciario, afectado tectónicamente por la deformación del levantamiento de la Cordillera Oriental y es cruzada por fallas como la Falla de Soapaga.

El levantamiento de esta formación arrojó un espesor total de 649 metros que se encontraron correlacionando las dos secciones anteriormente descritas. El espesor en la Vía la Salina es de 87 metros donde se encuentra el contacto con la infrayacente Formación Une. Este contacto es de carácter transicional y se puede evidenciar por las secuencias de areniscas espesas intercaladas con los shales orgánicos. Estas capas de areniscas van disminuyendo a medida que se sube estratigráficamente.

En la sección El Crucero se midió un espesor de 562 metros. En la parte media de la sección hay una secuencia de espesas capas de lodolita y shale físil con pequeñas intercalaciones de arenas de grano muy fino. Al tope de esta sección se encuentra el contacto neto con el Grupo Guadalupe.

Figura 21: Columna compuesta generalizada de la Formación Chipaque – Municipio de El Crucero y Vía La Salina (Boyacá).



Las litofacies y ambientes de depósito identificados para la sección estratigráfica de la Fm. Chipaque (Vía La Salina – El Crucero) son:

El segmento 1 consta de lutitas oscuras muy físiles y orgánicas, la litofacies que dominan son lodolitas (L) con alto contenido de materia orgánica muy físiles, con laminación interna ondulosa (o-lam) intercaladas con arenitas y lodolitas respectivamente, las litofacies predominantes son arenisca ligeramente lodosa (Al) con lodolitas masivas (Lm) de laminación interna ondulosa (o-lam). El recobro de Palinoflora está representado por polen, esporas y algunos foram test lining. Palinomorfos mal preservados, alterados termalmente. Lo cual indica un ambiente de depósito salobre de plataforma interna.

El recobro de polen y esporas nos indica depósitos cercanos al continente. Los estratos de hasta 4 metros de arenitas de grano redondeado, con ondulitas indicando que el fenómeno predominante era el oleaje diario normal se puede interpretar como un ambiente somero de playa.

Figura 22. Fotografía segmento 2, donde se observa una asociación de litofacies de arenitas masivas (Am) sin estructura interna definida, intercalada con arenitas con estratificación ondulosa (Ao).



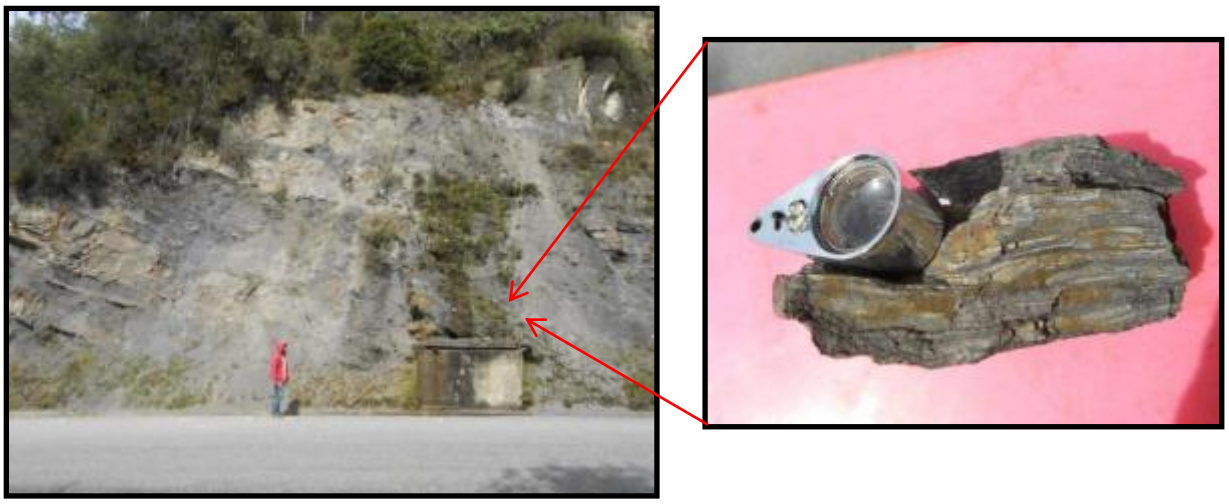
En los segmentos 3, 5 y 6 (metro 134) se observó una secuencia de lutitas oscuras muy físiles y con abundante materia orgánica, las litofacies que dominan son lodolitas (L) ricas en materia orgánica muy físiles, con laminación interna plano paralela. En el segmento 4 se observan moldes con conchas de bivalvos, además de esto se observa intraclastos de lodolitas negras. Dichas características para los segmentos 3,5 y 6 infieren un ambiente de depósito tranquilo donde predomina el proceso de suspención. Los análisis de palinoflora muestran un recobro de polen y algunos quistes dinoflagelados. Palinomorfos mal preservados alterados termalmente. Los estratos espesos de lodolitas indican que el nivel del mar continúa en ascenso y las capas se depositan por debajo de la acción del oleaje. Los sedimentos estuvieron posiblemente sujetos a la acción de tormenta como lo indican las delgadas capas de arenitas que se observan en el segmento 3 y segmento 5. El segmento 4 indica un periodo abrupto de disminución del nivel base puesto que las arenitas contienen ondulitas que indican un oleaje. Se interpreta un ambiente de llanura mareal arenosa.

En general los segmentos 11 al 20 Se observan secuencia de lodolitas ricas en materia orgánica (L), presentan moscovita y fosfatos; las litofacies dominantes son lutitas con laminación plano paralela (Lpp), como subordinadas se encuentran las arcillolitas ricas en materia orgánica y lutitas con laminaciónondulosa (Lo-lam) y lenticular (Ll) intercaladas con delgadas capas de arenitas cuarzosas (Am) que en algunos sectores aumentan o disminuyen su espesor. En ocasiones los estratos de lodolitas son potentes con laminación planoparalela indicando depósitos por debajo de la acción del oleaje. También, se depositan estratos de lodolitas con delgadas intercalaciones de arenitas que indican acción del tiempo. Se pueden interpretar como ambientes de depósito de plataforma interna y externa, plataforma somera, pues indican descensos y ascensos del nivel base. El recobro de palinoflora es pobre a nulo, representado ocasionalmente por algunos granos de polen y esporas, lo cual es indicador de disminución en el nivel base ocasionalmente y un deposito cercano al continente.

Figura 23. Segmento 11: Capas de Lodolita gruesas intercalada con capas delgadas de areniscas, como se puede observar los contactos son ondulosos



Figura 24. Fotografías segmento 15: Lodolitas con laminación interna ondulosa, con bioturbación incipiente



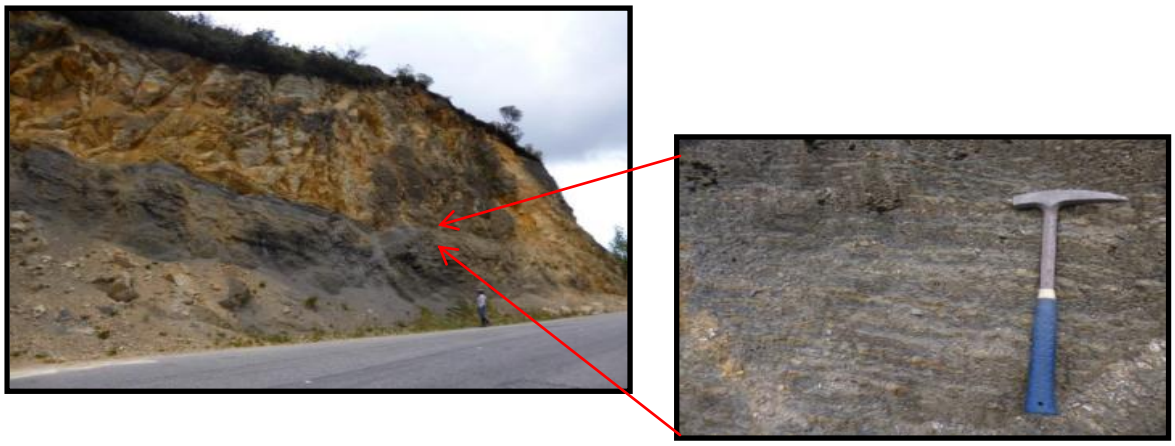
El segmento 21 en particular, con un espesor de 11 metros se compone de cuarzoarenitas de grano fino a medio con moscovita hasta del 3% y glauconita en trazas, no se observan estructuras de estratificación interna es decir es una arenisca maciza, por tanto el predominio absoluto de la litofacies es (Am), posee

algo de thallasinoides y madrigueras (mad) verticales y horizontales en su superficie superior. El contacto con el segmento infrayacente erosivo. Se interpreta un ambiente de depósito de playa, pues se infiere un descenso del nivel base y somerización con gran influencia continental con aportes de moscovita y niveles de energía en aumento por su tamaño de grano. Las madrigueras identificadas indican exposición del segmento en el continente.

El segmento 22 y 23 están conformados por una espesa capa de lutitas con abundante materia orgánica con moscovita las cuales van disminuyendo su espesor hacia el tope del segmento con predominio de la litofacies (Lo-lam) y como subordinada la litofacies (Lf) y (Ll) e interposiciones de arenita y lutitas donde es observada moscovita, nódulos y conchillas fósiles, posiblemente restos vegetales (?).

El contacto con el segmento infrayacente es onduloso a erosivo. A la base se observan intercalaciones delgadas de arenitas. El ambiente de depósito interpretado es plataforma interna a externa, los depósitos de arenitas se deben posiblemente a cambios climáticos y fuertes lluvias puesto que se observan fragmentos de lodolitas en las arenitas. Las capas gruesas de lodolitas se depositaron por debajo de la acción del oleaje pero no muy profundas puesto que se observan aportes continentales de micas.

Figura 25. Fotografías segmento 23: Contacto neto con las areniscas del grupo Guadalupe, se observan litofacies de lodolitas arenosas infrayaciendo el contacto con el Grupo Guadalupe



La sección estratigráfica de la Formación Chipaque muestra un predominio de depósitos marinos de plataforma y en menor proporción los de Llanura mareal silisiclástica. Los ambientes depositacionales identificados para plataforma van desde plataforma externa hasta ambientes de playa y los identificados en llanura mareal van desde Llanura mareal arenosa hasta Llanura mareal lodosa. La interpretación de dichos ambientes se realizó teniendo en cuenta características litológicas, estructuras sedimentarias, minerales y fósiles o las trazas de éstos, que según su ubicación en la plataforma marina permiten identificar un determinado ambiente.

Tabla 9. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Chipaque – Municipio de El Crucero (Boyacá)

SEGMENTO	ASOCIACIÓN DE LITOFACIES	AMBIENTE SEDIMENTARIO
1	Lolam-Al-Lmolam	Plataforma interna
2	Am-Ao	Playa - Anteplaya
3	Ambiot-Llambiot-mld-Llambiot-mld	Plataforma
4	L-Am-X-Ax-La	Llanura mareal arenoso
5	Llambiot-Llamo-Laml	Plataforma externa media
6	L-Lpp-Lppo-Llamo-laml	Plataforma externa
7	Alapploo-Aolam	Anteplaya
8	Lppolaml-Lppolam-App	Llanura mareal lodo arenosa
9	Lolam-Lf-Af-Aw-Aolam	Plataforma media
10	Lw-Lf-Lolam-Lpp-Appbiotmad-mld	Plataforma interna
11	Lpp-Lolam-Ll	Plataforma externa
12	App-Lppbiot-mad	Llanura mareal lodo-arenosa
13	Lpp-Lf-Lolam	Plataforma externa
14	App-Aolam-Af-Aw-Lo	Plataforma media a Interna
15	App-Aolam-Af	Costa
16	Al-App-Aolam-Lpp	Llanura mareal arenosa
17	Aolam-Af-Lpp-Lolam-Ll	Llanura mareal lodosa
18	Lolam-Ll-App-Aolam	Plataforma media
19	App-Lolam-Lf-Ll	Plataforma interna a Anteplaya
20	Aolam-App-Af-Aw-Lpp-Ll-Lf-Lw	Llanura mareal lodosa
21	Ammad	Playa
22	Lolam-Lf-Ll	Llanura mareal lodosa
23	Lolam-Lpp-Lf-Llmld	Plataforma media a interna

6.1.2 Sección Formación Chipaque – Municipio de Pajarito (Boyacá). La sección se levantó cerca a la población de Pajarito, sobre la Vía que de Sogamoso llega a Yopal al Occidente del Río Cusiana; sobre la Quebrada Agua Clara la cual se encuentra ubicada sobre un desvío a 3 Km del pueblo en dirección a Yopal, tomando un camino real el cual cruza en tu totalidad la Formación Une hasta encontrar la base de la Formación Chipaque.

La sección tiene un espesor real de 602 m. se observó un 15% de Areniscas, 80% Lutitas negras, ocasionalmente magras, 5% caliza tipo Mudstone.

COORDENADAS DE LA SECCIÓN:

INICIO (Base): X: 1153721

Y: 1076033

FIN (Tope): X: 1156280

Y: 1075891

Figura 26. Ubicación Formación Chipaque, Pajarito, Boyacá. Coorenadas X: 1153721 Y: 1076033

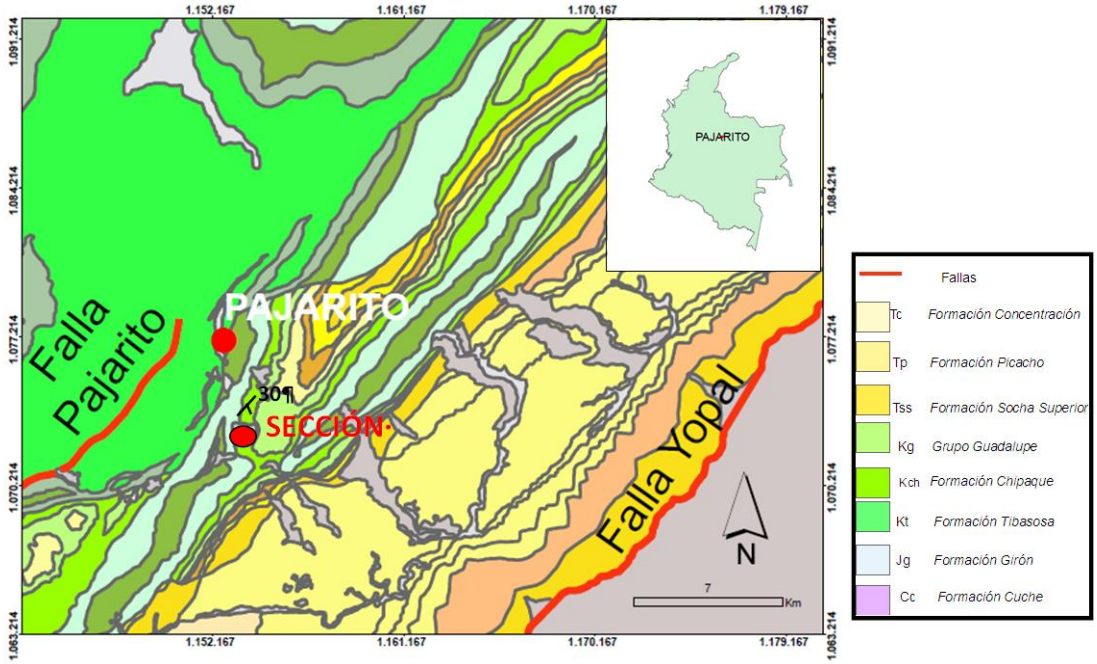
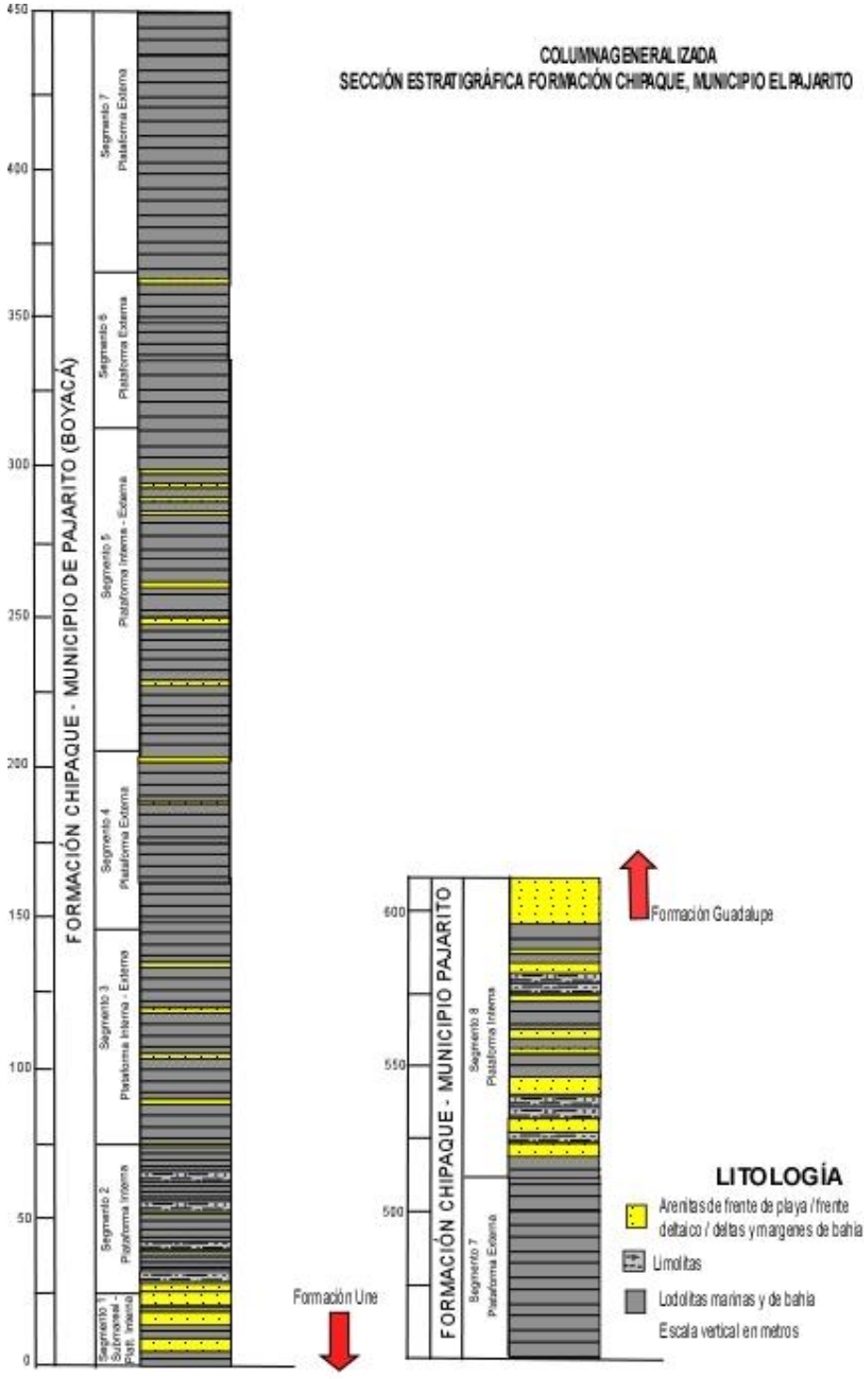


Figura 27. Columna generalizada de la Formación Chipaque, Pajarito (Boyacá).



En el segmento 1 se observan areniscas con laminación ondulosa intercaladas con lodolitas negras con laminación ondulosa con asociación de litofacies Aw-A-lam-Lw; Los análisis de Palinología (Ver anexo C) arrojan buen recobro de palinoflora representada por polen, esporas y quistes de dinoflagelados. La preservación de los palinomorfos es mala y se encuentran alterados termalmente. La presencia de polen y esporas nos indica proximidad al continente. El segmento se asoció a un ambiente de depósito de plataforma interna.

Figura 28. Afloramiento de areniscas de color gris claro intercalado con lutitas color negro pertenecientes al segmento 1. Asociación de facies: Aw-A-lam-Lw.

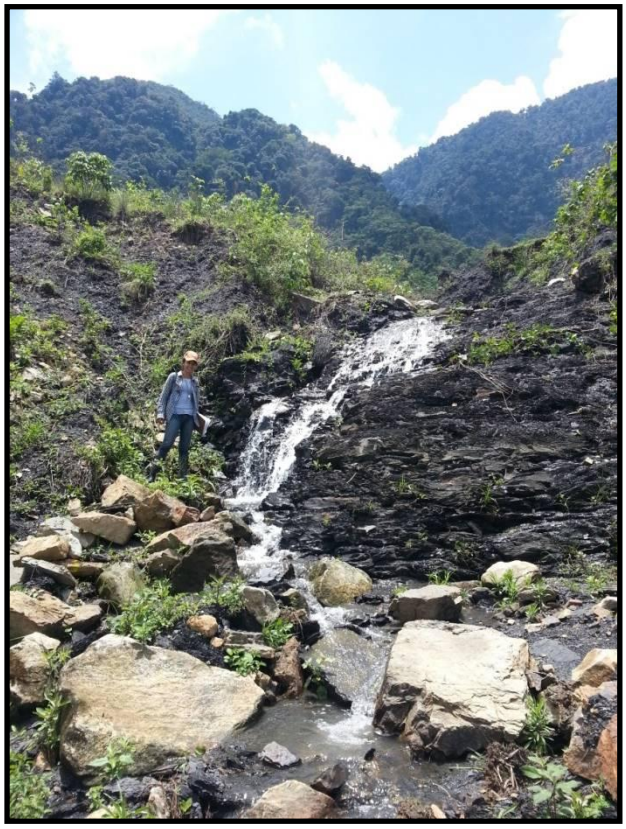


En el segmento 2 y 3 se observó una alternancia de areniscas con lutitas con laminación ondulosa, además presenta una gran bioturbación de fauna bentónica como bivalvos, con litofacies *(Aw-A-lam-Lw, Ambiot-Lwf*) Los análisis arrojan recobro pobre de palinoflora representado por polen, esporas y quistes de

dinoflagelados lo que permite asociar con un ambiente de plataforma interna, puesto que la laminación ondulosa es típica en ambientes de plataforma.

Los segmentos restantes muestran en forma general Lutita con laminación plano-paralela de color negro en capas tabulares, intercalada con limolita color gris oscuro con laminación flasser en capas tabulares, intercalado con capas muy delgadas de arenisca con laminación ondulosa en canales. Las litofacies asociadas a estos segmentos son *(Lo-lambiot, Lf-Ambiot-C, Llam-Ambiot-C, Llambiot, Llam-Lf-Aw).* Para dichos segmentos los análisis palinológicos arrojaron un recobro moderado a bueno de palinoflora con preservación pobre a buena. Se identifica un predominio de palinomorfos de origen marino, principalmente quistes de Dinogymnium sp., *Palaeohystrichophorainfusorioides*, acritarcos del tipo *Leiosphaeridia* sp. Y foram Test lining. Se registran frecuencias moderadas de *Cyclonephelium*sp., *Isabelidinium* sp., *Oligosphaeridium complex, Trithyrodinium fragile*. Adicionalmente se recuperaron quistes de *Achomosphaera* sp., *Dyphies* sp., *Hystrichodinium pulchrum, Operculodinium "luciitioides", Subtilisphaera* sp., *Trichodinium castanea* y esporomorfos tales como *Araucariacites australis, Hamulatisporis caperatus,Retipollenites "afropollensis".* (Ver anexo C). La edad definida por los análisis de Palinología es Santoniano-Campaniano. Los ambientes de depósito para estos segmentos son de plataforma externa.

Figura 29. Fotografía de afloramiento que muestra capas delgadas de Lutita intercalada con láminas muy delgadas de areniscas con estructuras lenticulares arenosas y con alto contenido de sílice.





En la sección se reconocieron 8 segmentos en su mayoría representando plataforma externa e interna, al realizar el análisis de litofacies esta sección corresponde a un ambiente de plataforma marina somera siliciclastica en la cual predominan las lodolitas.

Los ambientes de depósito interpretados para la sección son los siguientes:

Tabla 10: Ambientes de depósito definidos para la sección Formación Chipaque – Municipio de Pajarito (Boyacá).

SEGMENTO	ASOCIACIÓN DE LITOFACIES	AMBIENTE SEDIMENTARIO
1	Aw-A-lam-Lw	Sub-mareal a plataforma interna
2	Ambiot-Lwf	Plataforma interna
3	Lo-lam-Ambiot	Plataforma interna
4	Lo-lambiot	Plataforma externa
5	Lf-Ambiot-C	Plataforma externa
6	Llam-Ambiot-C	Plataforma externa
7	Llambiot	Plataforma externa
8	Llam-Lf-Aw	Plataforma interna externa

6.1.3 Sección Formación Chipaque – Municipio de Choachí (Cundinamarca). La sección se levantó Sobre la quebrada La Tapias. La cual desemboca en el Río Blanco. Para llegar al sitio de trabajo se sale del Municipio de Choachí por la vía que del mismo conduce a Bogotá. Se toma un desvío hacia La Chorrera (sitio turístico), hasta llegar al caserio El Hato en el cual se toma un desvío a mano izquierda hasta el puente de la virgen. Bajo este puente se inicia la sección.

La sección tiene un espesor real de 1100 m. de los cuales el 60% es Lutita color negro, ocasionalmente magras, 30% Caliza tipo Mudstone, Grainstone y en menor proporción tipo wackestone. El 10% restante es arenisca y limolita.

COORDENADAS DE LA SECCIÓN:

INICIO (Base): X: 1013632

Y: 997545

FIN (Tope): X: 1015981

Y: 999037

Figura 30. Ubicación Formación Chipaque, Choachí, Cundinamarca. Coordenadas X: 1013632, Y: 997545

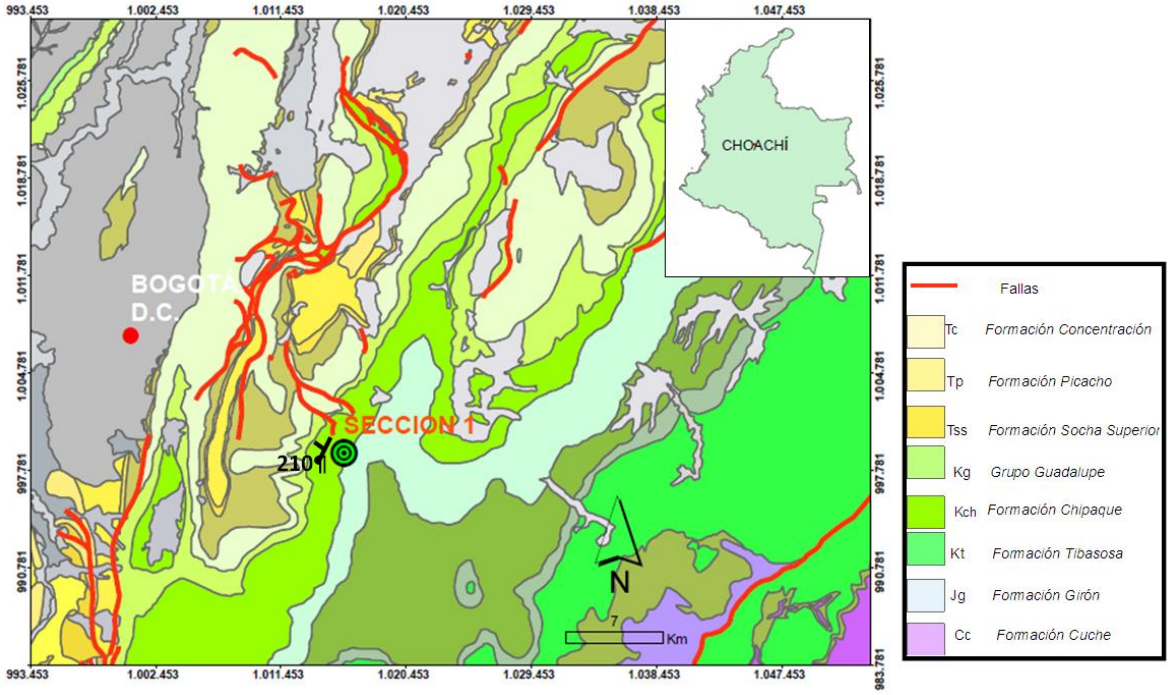
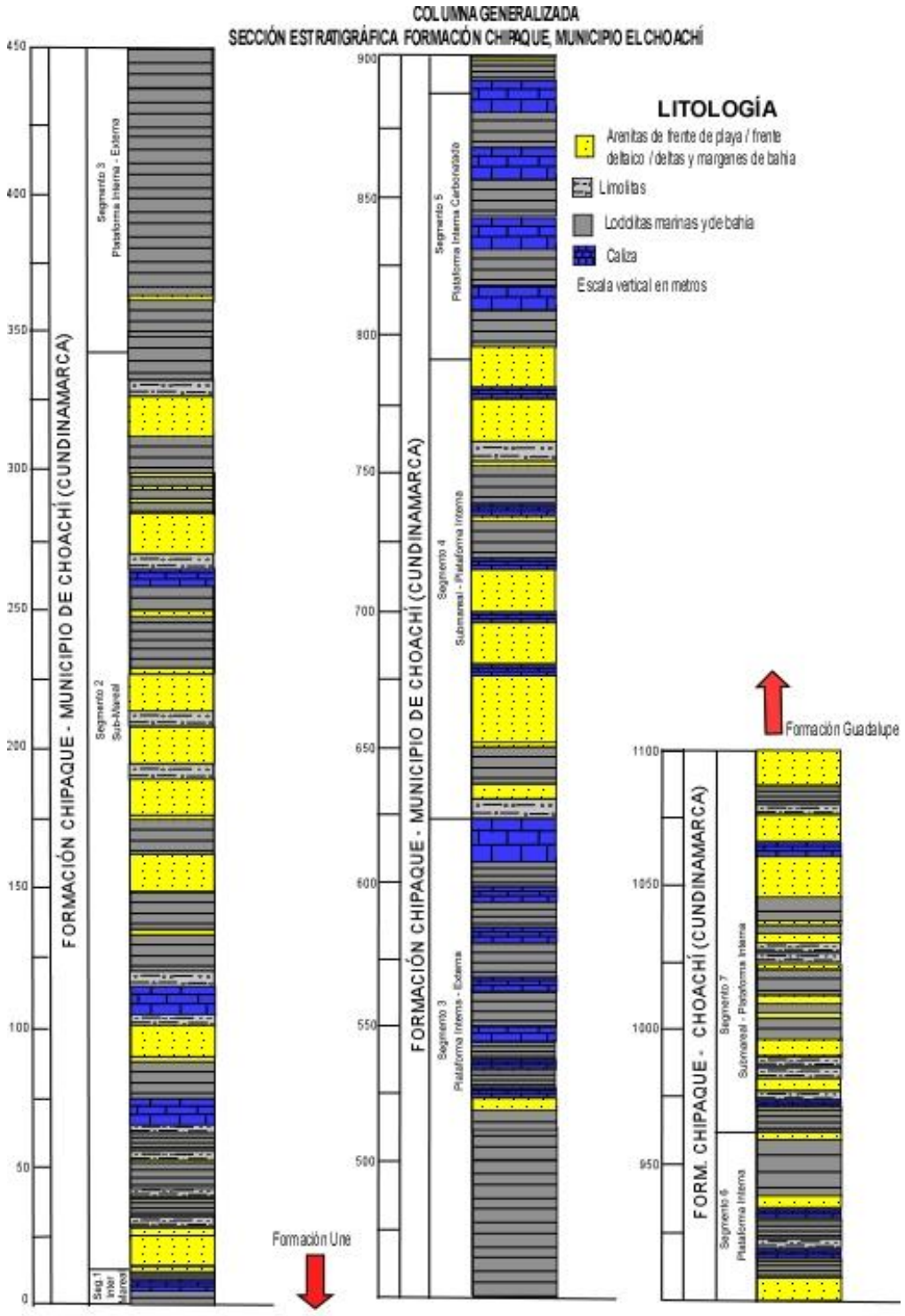
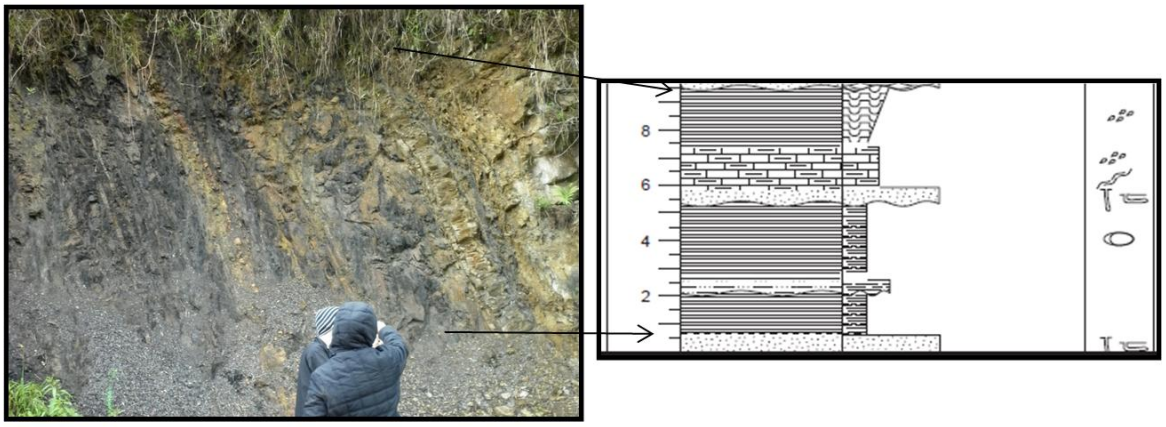


Figura 31. Columna generalizada de la Formación Chipaque en el Municipio de Choachí (Cundinamarca).



A la base se observa Lutita de color negro con laminación flasser intercalado con areniscas masivas de grano fino a medio ocasionalmente con laminación en artesa intercalado con caliza de color gris oscuro tipo mudstone y grainstone. en esta litofacies *(Lf-Am-M-G)* las estructuras tipo flasser y lenticular muestran una dinámica hidrodinámica grande y cíclica como las que causa las fluctuaciones de marea, las capas de caliza presentes, son comunes en estos ambientes cuando existen condiciones óptimas de precipitación de carbonato. Este segmento corresponde a un ambiente de llanura inter-mareal a sub-mareal.

Figura 32. Fotografía donde se observa la base de la Formación Chipaque, capas muy gruesas de lutitas negras con laminación planoparalela intercalada con capas de arenitas y caliza tipo grainstone. En la capas de arenitas se observa abundante bioturbación (thallasinoides en diversas posiciones).



Suprayaciendo este segmento la secuencia se vuelve más homogénea de lutitas negras con abundante materia orgánica y laminación planoparalela, intercaladas con areniscas en capas delgadas a gruesas con laminación ondulosa y capas delgadas de caliza tipo grainstone *(Llam-biot-Am-G).* Con gran cantidad de

conchas de bivalvos y gasterópodos. Este segmento corresponde a un ambiente de llanura sub-mareal a plataforma interna. En esta facies se observa areniscas con laminación ondulosa típica de ambientes de plataforma interna, en la cual la acción de las olas produce este tipo de estructuras. También presenta una alta tasa de bioturbación y de fauna bentónica típica del ambiente como gasterópodo y bivalvo. Se infiere un depósito de sedimentos que se altera según el clima y el aumento y disminución del nivel base. Las arenitas tienen aporte continental y una estructura interna de ondulitas lo cual indica acción del oleaje sobre los sedimentos. Cuando se observan capas muy gruesas de lodolitas negras se asume profundización y baja energía. Dichas capas de lodolitas contienen moldes de amonites y las calizas tipo mudstone en capas delgadas contienen abundantes fósiles principalmente bivalvos los cuales son indicadores de ambientes de depósito de plataforma somera. El segmento 3 se puede asumir como una profundización de la cuenca debido al espesor de los estratos de lodolitas homogéneas *(Llam-M.Am).*

Figura 33. Fotografía del segmento 2, se observan capas muy gruesas de lodolitas oscuras, con abundante materia orgánica y estructura interna planoparalela. Intercalas con calizas tipo mudstone y areniscas en capas delgadas a gruesas.

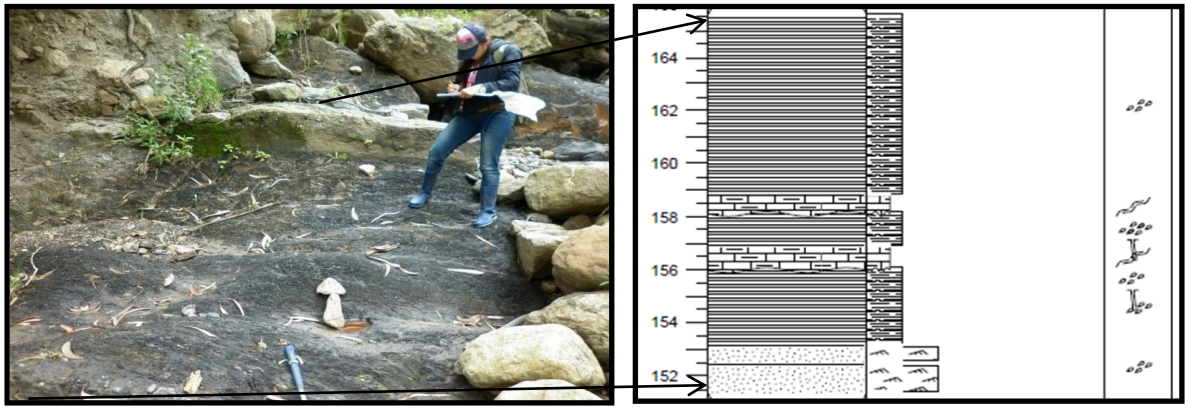


Figura 34. A: Fotografía del segmento 2, asociación de facies (Llam-biot-Am-G) donde se aprecian lutitas con nódulos de caliza tipo mudstone y capas delgadas de caliza. B: Se aprecian las capas delgadas de arenisca de grano fino con lodolitas en láminas, lo cual indica un ambiente de depósito cercano al continente, el depósito de las areniscas probablemente se debe a cambios climáticos como fuertes lluvias. Por análisis donde se observaron palinomorfos de origen marino y continental.

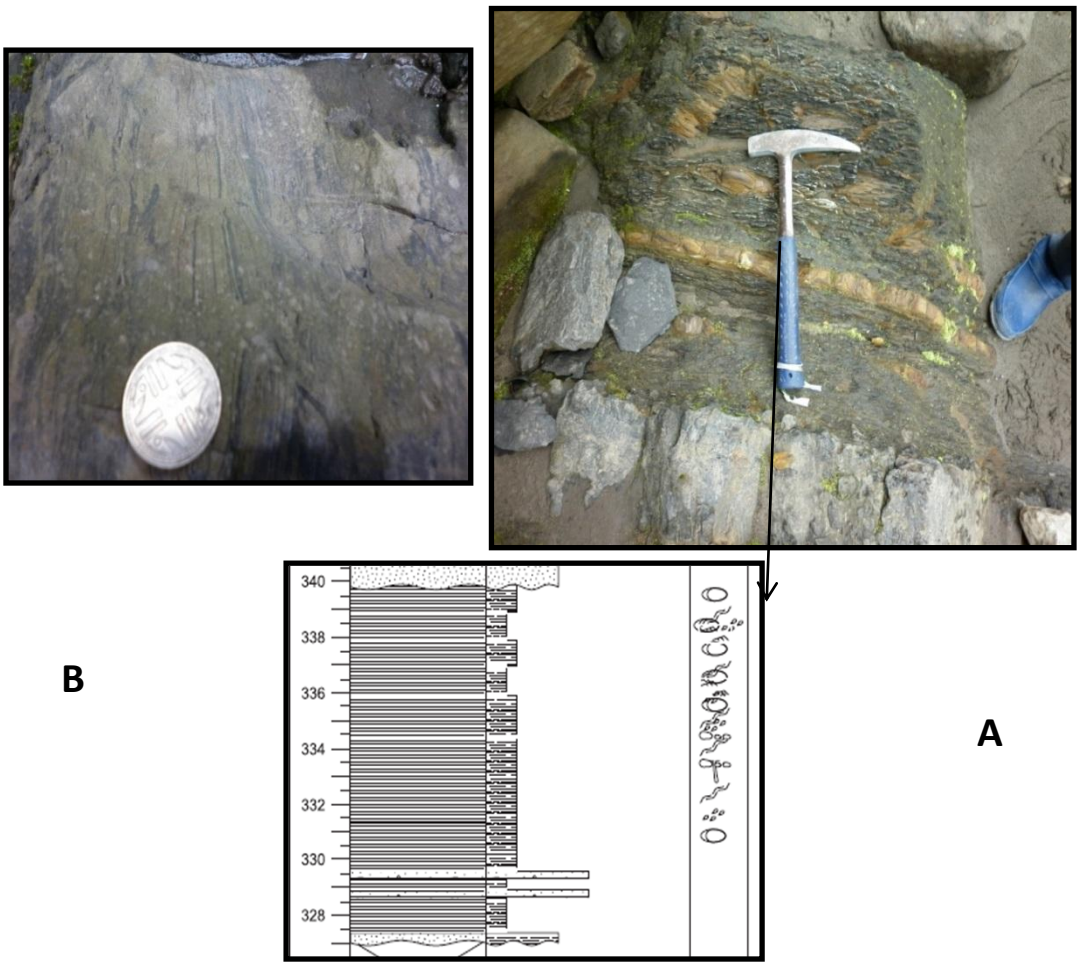
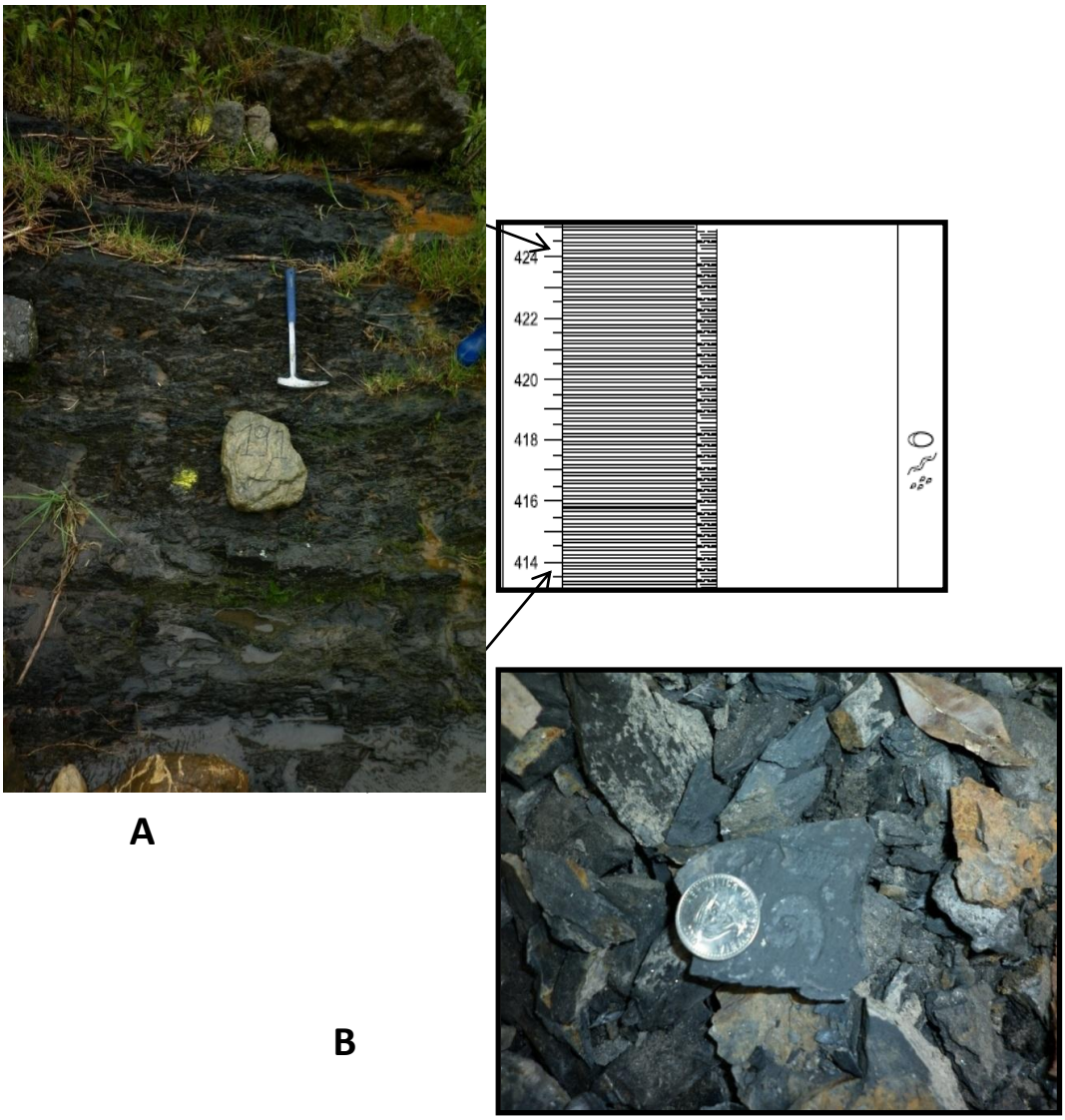
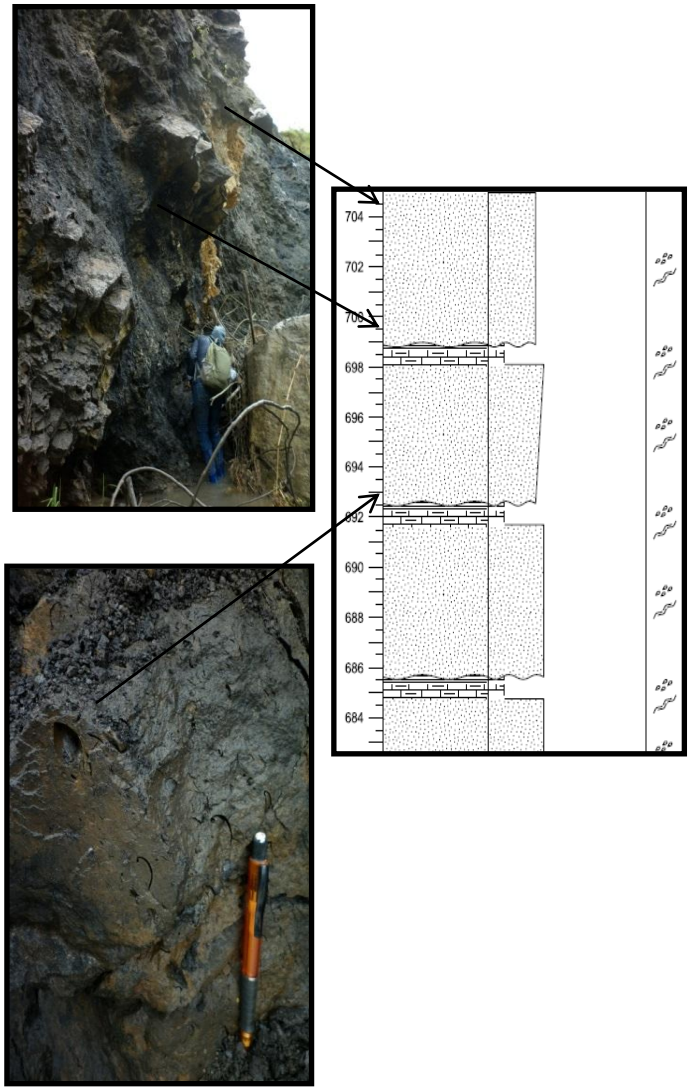


Figura 35. A: estratos potentes de lodolitas negras, con abundante materia orgánica, laminación planoparalela. B: detalle de amonite.



En el segmento 4 a la base se observan 50 metros de arenitas intercaladas con caliza tipo mudstone *(Llam-Am-biot-M)*; las arenitas contienen abundante bioturbación al contacto de las capas y las calizas abundantes impresiones de bivalvos, al tope del segmento las capas de arenitas se hacen menos espesas y se observa lodolita negra ocasionalmente calcárea (Magras) Y nódulos calcáreos. Este segmento corresponde a un depósito de plataforma interna.

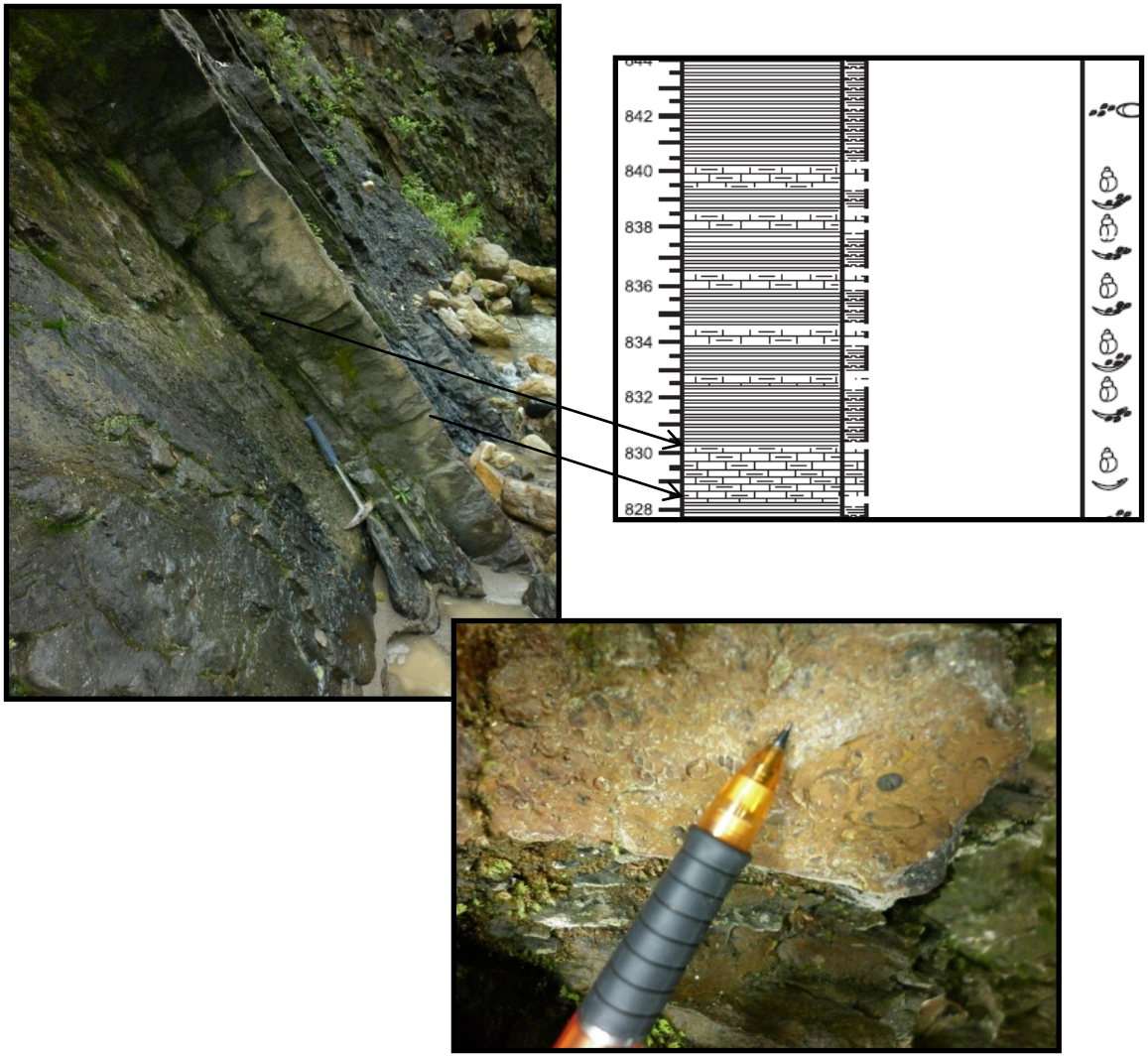
Figura 36. Estratos potentes de arenitas con intercalaciones de lodolitas y calizas tipo mudstone con impresiones de bivalvos.



El segmento suprayaciente se determinó por la cantidad de calizas y material carbonatado. Consta de capas gruesas de lodolitas negras ocasionalmente calcáreas con delgadas y frecuentes intercalaciones de calizas tipo mudstone *(Lflam-M).* Se cree que se trata de sedimentos depositados en un nivel inferior del oleaje diario normal, posiblemente una zona de bahía semicerrada que permitió una energía baja y un flujo constante de material calcáreo y lodoso los cuales

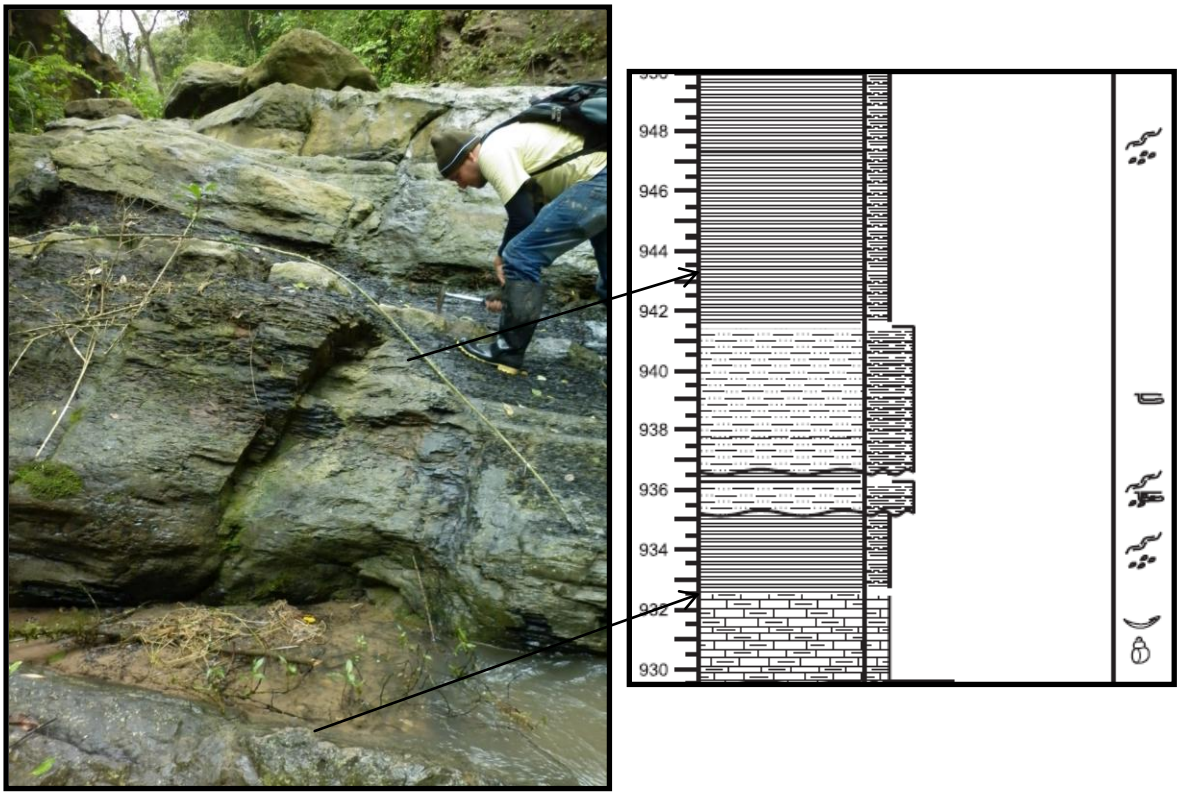
permitieron la supervivencia de bivalvos y gasterópodos que comúnmente habitaban y se alimentaban en fangos.

Figura 37. Fotografía donde se observa el segmento 5, calizas tipo mudstone con impresiones de fósiles de conchillas de bivalvos intercaladas con lodolitas negras, en algunas ocasiones calcáreas.



Se observan estratos gruesos de arenitas algunas con ondulitas *(Llam-Am-biot-M),* intercalados con limolitas y calizas tipo mudstone. En el segmento 6 es evidente una somerización, las ondulitas se forman por la acción del oleaje y un ambiente de mayor energía, las limolitas y calizas tipo mudstone se depositaron por debajo de la acción del oleaje en periodos de calma y baja energía. Se asume un ambiente de depósito de plataforma interna.

Figura 38. Fotografía donde se observan los estratos de lodolitas y caliza tipo mudstone del segmento 6.

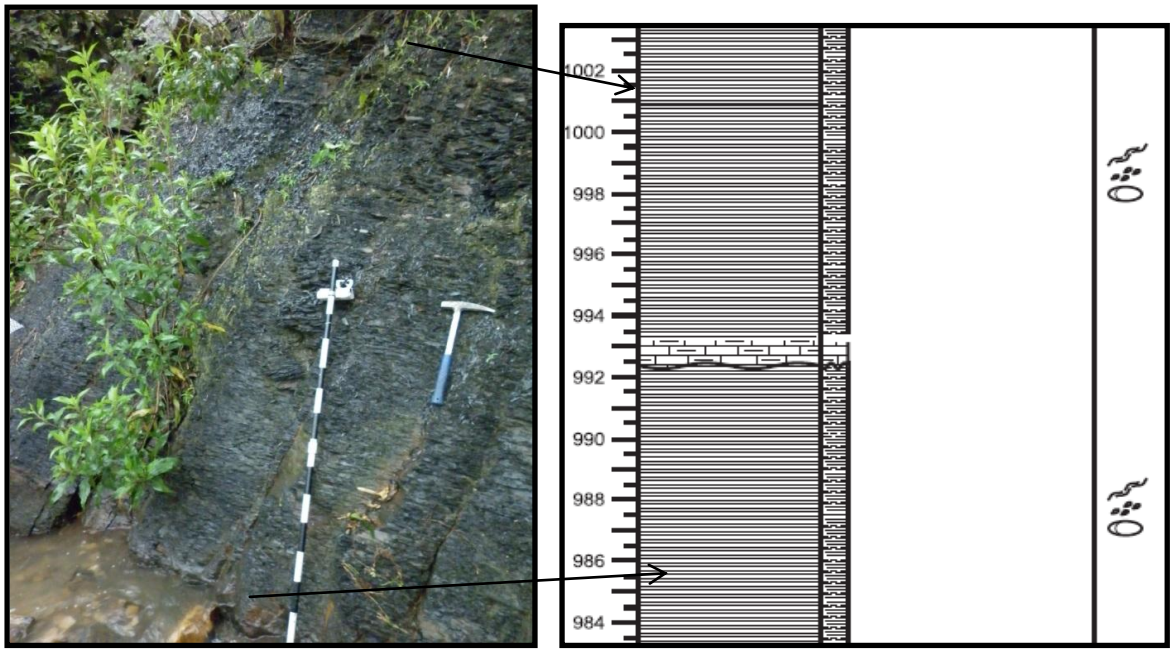


En el segmento 7 se observan lodolitas negras, con abundante materia orgánica y laminación planoparalela, intercaladas con arenitas amarillas, masivas y bioturbadas *(Llamf-Am-biot).* Para este segmento se asume un ambiente sub

mareal, plataforma interna, el depósito de arcillolitas requiere un ambiente tranquilo sin la influencia del oleaje diario. Las delgadas capas de arenitas se depositaron en momentos de variación del clima como tormentas, esto se evidencia en las arenitas que contienen láminas de lodolitas.

Al tope de la sección se observan capas gruesas de areniscas amarillas pertenecientes probablemente a la Formación Guadalupe.

Figura 39. Segmento 7, se observan los estratos gruesos de lodolitas negras intercaladas con capas muy delgadas a delgadas de arenitas de color amarillo.



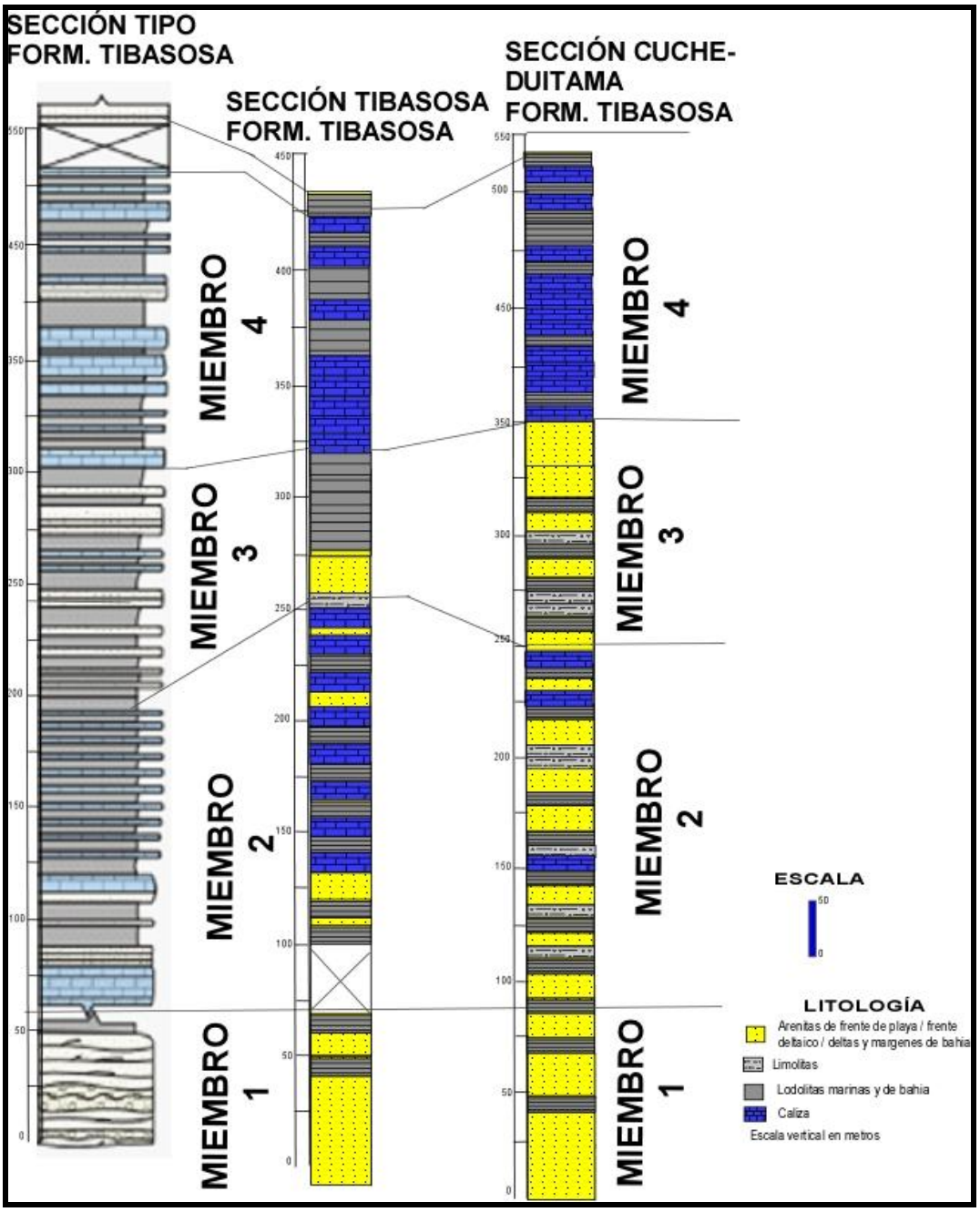
La sección de la Formación Chipaque se dividió en 7 segmentos, los cuales arrojan un ambiente de depósito de plataforma somera con abundante aporte calcáreo.

Tabla 11. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Chipaque – Municipio de Choachí (Cundinamarca).

SEGMENTO	ASOCIACIÓN DE LITOFACIES	AMBIENTE SEDIMENTARIO
1	Lf-Am-G	Inter-mareal
2	Llam-biot-Am-G	Sub-mareal a plataforma interna
3	Llam-M-Am	Plataforma Interna a externa
4	Llam-Am-biot-M	Plataforma interna
5	Lflam-M	Plataforma interna carbonatada
6	Llam-Am-biot-M	Plataforma interna
7	Llamf-Am-biot	Plataforma interna a externa

Las secciones de la Formación Tibasosa se midieron en 2 sectores diferentes. El primer sector para las dos secciones corresponde a la vía que conduce del Municipio de Tibasosa hacia Sogamoso, donde se midió la base de la Formación Tibasosa. El segundo sector se ubica en las canteras de Calboy, en la cual se midieron los tres miembros faltantes de la Formación para la sección 4, en la sección 5 los miembros faltantes se midieron sobre la vía que conduce a Duitama en Boyacá. La unión de los tramos medidos se realizó por medio de correlaciones con la sección tipo de la Formación Tibasosa en el área de trabajo, teniendo el conocimiento de los espesores de cada miembro. La Formación se divide en 4 miembros y hacia el norte se hace más espesa. (Ver figura 40).

Figura 40. Correlación de la Formación Tibasosa, Sección 4 y Sección 5 con la sección tipo en el área de estudio



6.1.4 Sección Formación Tibasosa – Tibasosa (Boyacá). La sección medida se ubica en la zona axial de la Cuenca de la Cordillera Oriental, en el altiplano Cundiboyacense. Ésta se localiza entre los municipios de Sogamoso y Tibasosa, ubicados en el Departamento de Boyacá. Situada en el bloque colgante de la Falla de Soapaga.

La zona del levantamiento de la sección toma dos planchas 1: 100.000 de Ingeominas la cuales son 171 de Duitama y 172 de Paz del Rio. La sección tiene un espesor real de 337m de los cuales el 50% es Caliza, 20% arenisca y 30% arcillolitas gris claro, gris oscuro y negro. Se asume una edad no más joven de Albiano, por los análisis de laboratorio elaborados a las muestras.

COORDENADAS DE LA SECCIÓN:

INICIO (Base): X: 1123871
Y: 1123935

FIN (Tope): X: 1122288
Y: 1124632

Figura 41. Ubicación Formación Tibasosa, Tibasosa, Boyacá. Coordenadas X: 1123871, Y: 1123935

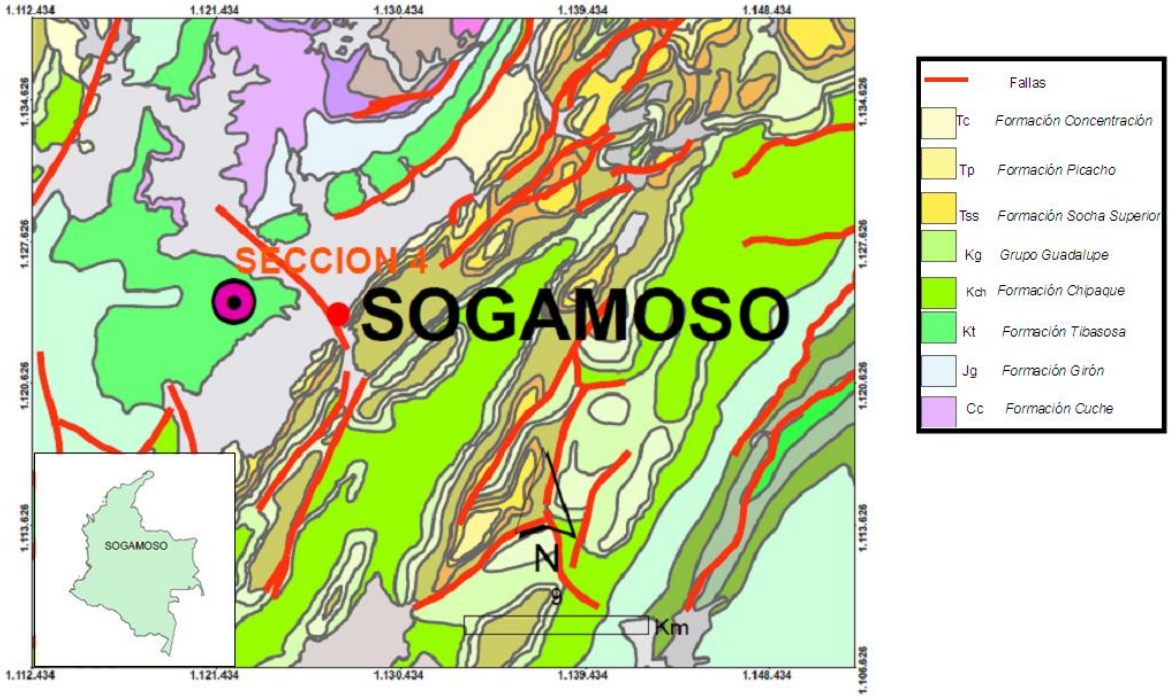
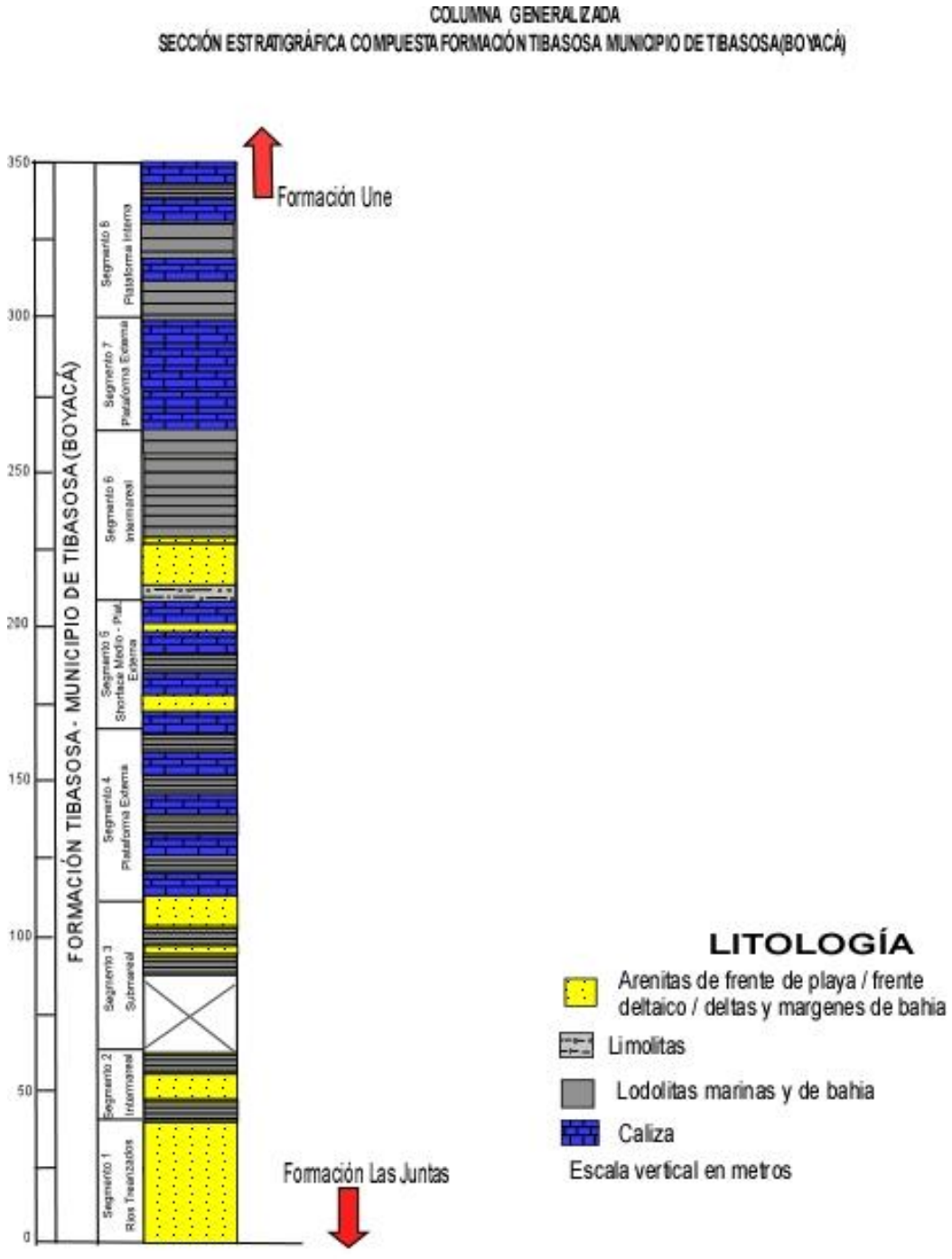


Figura 42. Columna compuesta generalizada de la Formación Tibasosa, Tibasosa, (Boyacá).



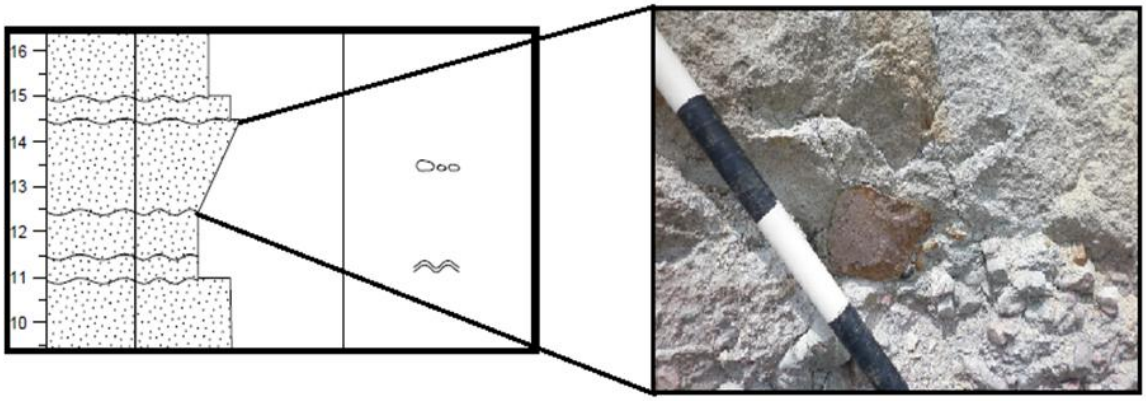
La sección estratigráfica medida se dividió en 9 segmentos se asociaron facies de acuerdo a su relación genética, incluyendo geometría, continuidad, forma de las unidades litológicas, tipos de rocas, estructuras sedimentarias y fauna. (Ver tabla 12).

En el segmento 1 con litofacie *A(sl)C int A (L) o-lam* se observan 40 m de sublitoarenita conglomeratica de tamaño de grano medio a muy grueso, con pobre selección, subredondeado, con matriz lodosa de amarillo a verdoso, el cemento es silíceo, porosidad alta, además en capas muy gruesas con una estructura granocreciente, contacto irregular y presencia de algunos lechos conglomeráticos de guijos y guijarros. Estas capas están intercaladas con Cuarzoarenisca lodosa, de grano fino a medio, selección pobre, subredondeado, esférico, con matriz lodosa, cemento silíceo, color amarillento, las capas son gruesas a muy gruesas en contacto irregular y presentan laminación ondulosa. La palinología arrojó recuperación de polen y esporas, algunos foraminíferos y una edad no más joven que Albiano; se interpreta como un ambiente de río meándrico, ya que se encontraron canales de material grueso rodeado de material más fino, a veces laminado, además canales de conglomerados de guijos y guijarros, típicos de este ambiente, como lo describe Reading. Otra característica importante de este ambiente es el color verde en los materiales finos y en la matriz de las areniscas.

Un ambiente de río trenzado suele presentar capas de areniscas mal seleccionas, algunas con estructuras de laminación cruzada y gradación normal. La facies *A(c) int Cal*, reúne estas características a excepción de la selección, ya que en esta facies se encontraba una selección moderada a buena, debido a un largo transporte del material y una disminución en la energía, asociado a una disminución de la pendiente, que permitió una mejor selección de los sedimentos.

De acuerdo con las características típicas de un río meándrico y un río trenzado, la facies *Alc int L lam* pertenece a una transición de un río trenzado a un río meándrico, como se evidencia en la baja selección de las areniscas, característico de ríos trenzados y algunas capas de lodolitas laminadas que corresponden a la zona de inundación de un río meándrico.

Figura 43. Capa donde se observa la facie A (sl), int,C,m.

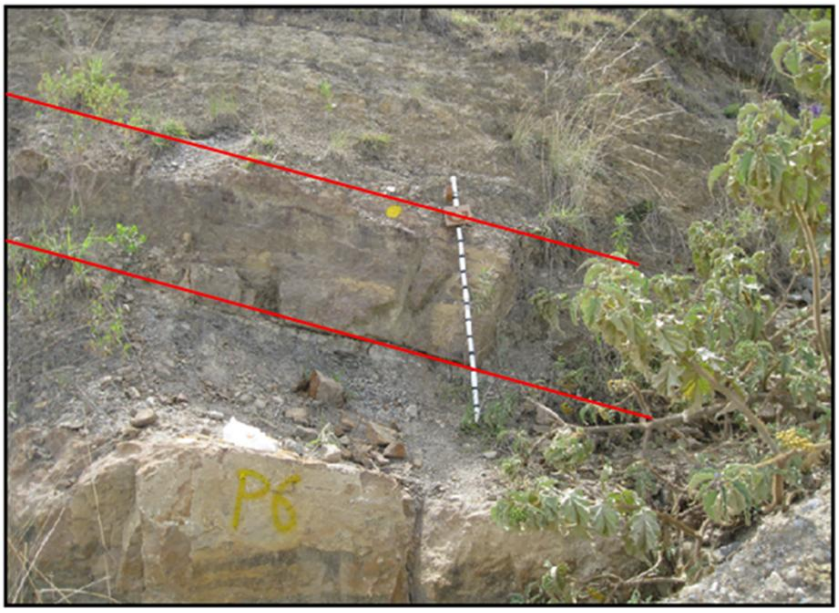


Suprayaciendo este segmento se observan lodolitas intercaladas con areniscas bien seleccionadas y estructuras de laminación plano-paralela, a veces ondulosa; estas características coinciden con las propuestas por Walker y James. Para este segmento los análisis de palinología (Ver anexo C) arrojaron contenido de polen y esporas; lo cual confirma un deposito cercano al continente. Se interpreta un ambiente de plataforma interna.

El mar se sigue profundizando y las capas de lodolita son más gruesas y las arenitas disminuyen su espesor. Seguido de esto se observa un segmento con abundantes calizas tipo mudstone, wackestone y packestone con asociación de facies *M int W int L*; lo que indica una zona semicerrada, un poco retirada de la acción del oleaje diario. Posiblemente en algún momento los sedimentos

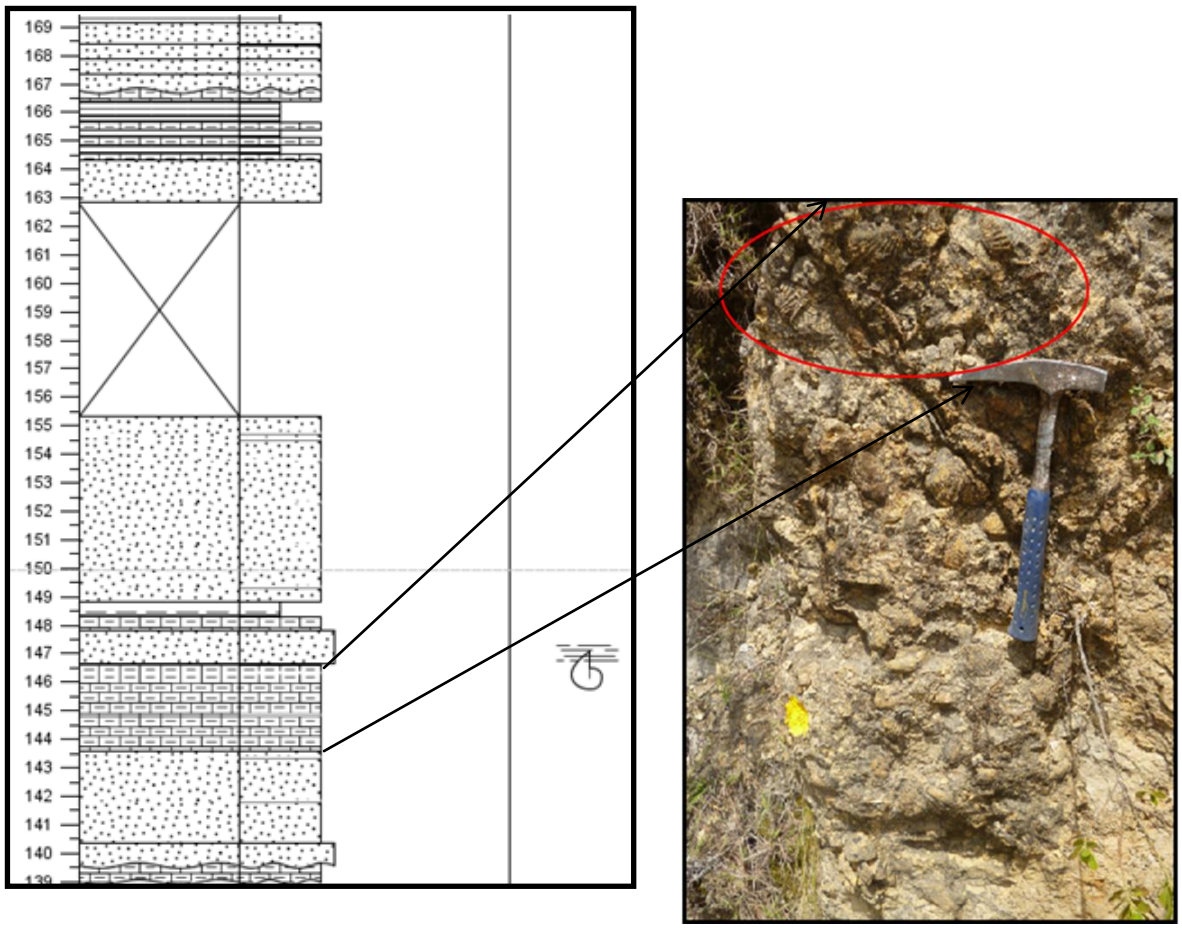
estuvieron expuestos a la acción de tormentas, como lo indican las delgadas y esporádicas capas de arenitas. Se encontraron impresiones de bivalvos y gasterópodos lo cual indica una zona no muy profunda. Se infiere un ambiente de plataforma interna a externa, Algunas capas calcáreas de estas facies se observa fragmentos de conchas, como evidencia de cambios hidrodinámicos del ambiente, debido posiblemente a un aumento en el oleaje.

Figura 44. Se observa el segmento 3. Capas de arenitas con cemento calcáreo intercaladas con lodolitas negras.



El segmento 5 se observó una litología de Areniscas y Wackestones con asociación de litofacies *A int W int L* típicos de un ambiente con mayor energía (Upper shoreface), pero la presencia de intercalaciones de lodolitas indica una menor energía (lower shoreface); los bivalvos tipos Trigonias son la característica principal (Ver Figura 44), ya que su concha y sus costillas son gruesas, lo cual nos indica que podían soportar la acción de las olas; además se interpreta un ambiente sedimentario tipo middle shoreface a plataforma interna.

Figura 45. Segmento 5, se observan las colonias de Trigonias en las cuales se aprecian las costillas producto de su adaptación a ambientes de alta energía.



En el segmento 6 Los niveles de lodolita son espesos y tienen delgadas capas de arenitas con asociación de facies *L int A lam*. En las lodolitas se observan concreciones calcáreas las cuales se dan por precipitación de dicho material posterior a su depositación. El ambiente interpretado para este segmento es de depósito de plataforma interna o somera. Suprayaciendo este segmento se observa una asociación de litofacies *M int W int L*; esto debido a las abundantes capas de caliza tipo wackestone y mudstone con impresiones de bivalvos hacia el tope. El ambiente de depósito es de plataforma externa en cual podían vivir

especies como bivalvos que su medio de supervivencia es el material fino y ambientes de baja energía.

El segmento 8 está conformado por una secuencia de calizas tipo mudstone y lodolitas negras ocasionalmente calcáreas con asociación de facies *L int M*. Un periodo de baja energía dio lugar a la depositación de capas de lodolitas y Mudstone de coloración rojiza, que de acuerdo con Reading esta coloración se debe a un ambiente reductor durante la sedimentación y la oxidación de la roca, producto de su exhumación (Ver Figura 46). Se infiere un Se infiere un ambiente de depósito de plataforma interna.

Figura 46. Segmento 8, se observan Lodolitas con concreciones calcáreas de gran tamaño (30 – 60 cm).

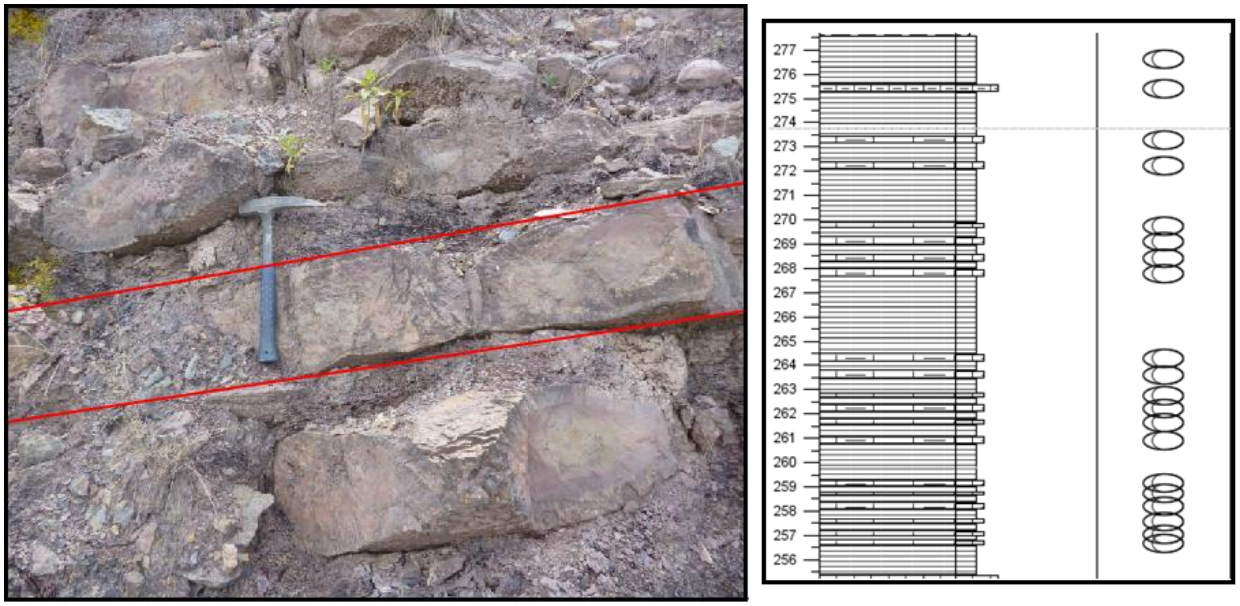


Figura 47. Segmento 8; Lutitas rojizas con intercalación de calizas tipo mudstone.



Al tope de la Formación Tibasosa está conformada por 55.7 metros de arcillolita; a la base se observa un nivel de 30 centímetros de lodolita negra con abundantes impresiones de amonites de 1 a 3 centímetros suprayace esta capa una secuencia espesa de arcillolitas de color gris claro con laminación planoparalela, con asociación de facies *L o-lam am.* Se infiere un ambiente de plataforma interna, para el depósito de dichas arcillolitas fue necesario un ambiente con muy baja energía para que las partículas se depositaran por suspensión.

Figura 48. Segmento 9, tope de la Formación Tibasosa

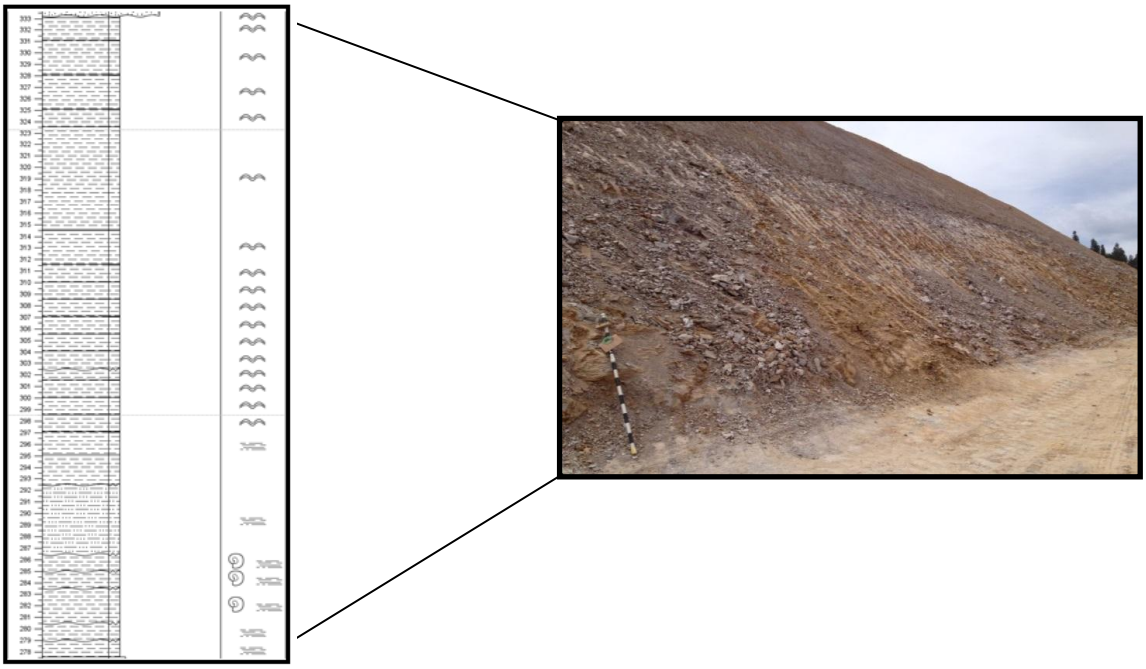


Tabla 12. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Tibasosa – Municipio de Tibasosa (Boyacá)

SEGMENTO	AMBIENTE	ASOCIACIÓN DE LITOFACIES
9	Plataforma interna	*L o-lam am*
8	Plataforma interna	*L int A lam*
7	Plataforma externa	*M int W int L*
6	Plataforma interna	*A int W int L*
5	Shoreface middle a plataforma interna	*A int W int L*
4	Plataforma externa	*M int W int L*
3	Submareal	*A(cal) lam int L lam*
2	Plataforma interna	*A lam int L lam*
1	Río Meándrico	*A(sl)C int A(L) o-lam*

6.1.5 Sección compuesta Formación Tibasosa – Municipio de Cuche - Duitama (Boyacá). La sección medida se encuentra ubicada en los municipios de Sogamoso, Duitama y Nobsa en el departamento de Boyacá. La zona de trabajo se dividió en dos zonas en las cuales se midieron dos secciones de la formación; la primera zona corresponde a la cantera que pertenece a la empresa CalBoy, al este del municipio de Sogamoso, en esta se levantó una sección completa.

La segunda sección se levantó de la siguiente forma: la parte basal e intermedia de la sección sobre la vía que conduce a Santa Rosa de Viterbo a la altura de la vereda Cuche; el tramo superior de la sección se levantó en la vía entre Duitama y Nobsa, a la altura de lo que se conoce como Las Caleras.

COORDENADAS DE LA SECCIÓN:

INICIO (Base): X: 1120983
Y: 1136930

FIN (Tope): X: 1125620
Y: 1127906

Figura 49. Columna generalizada compuesta de la Formación Tibasosa, Cuche - Duitama, (Boyacá).

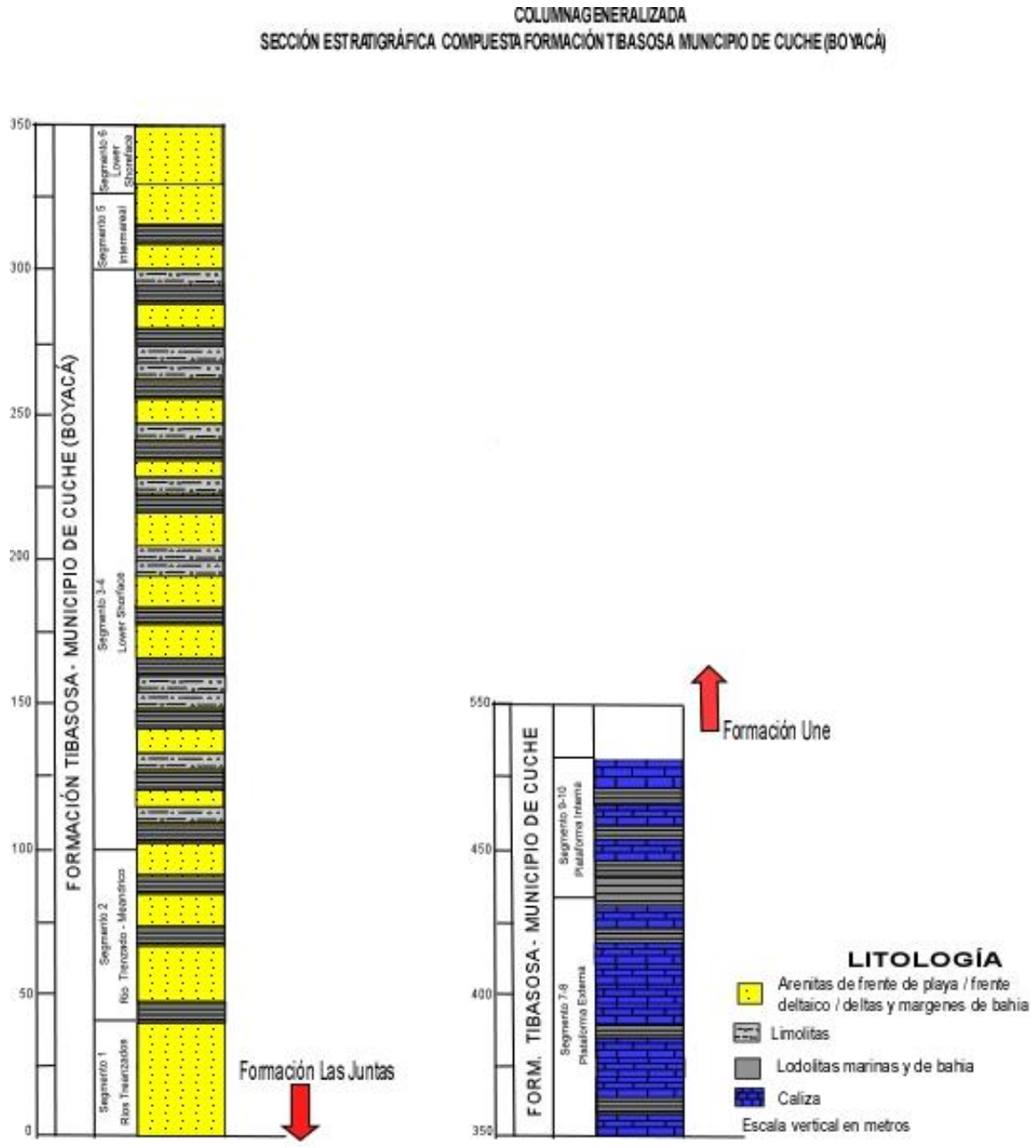
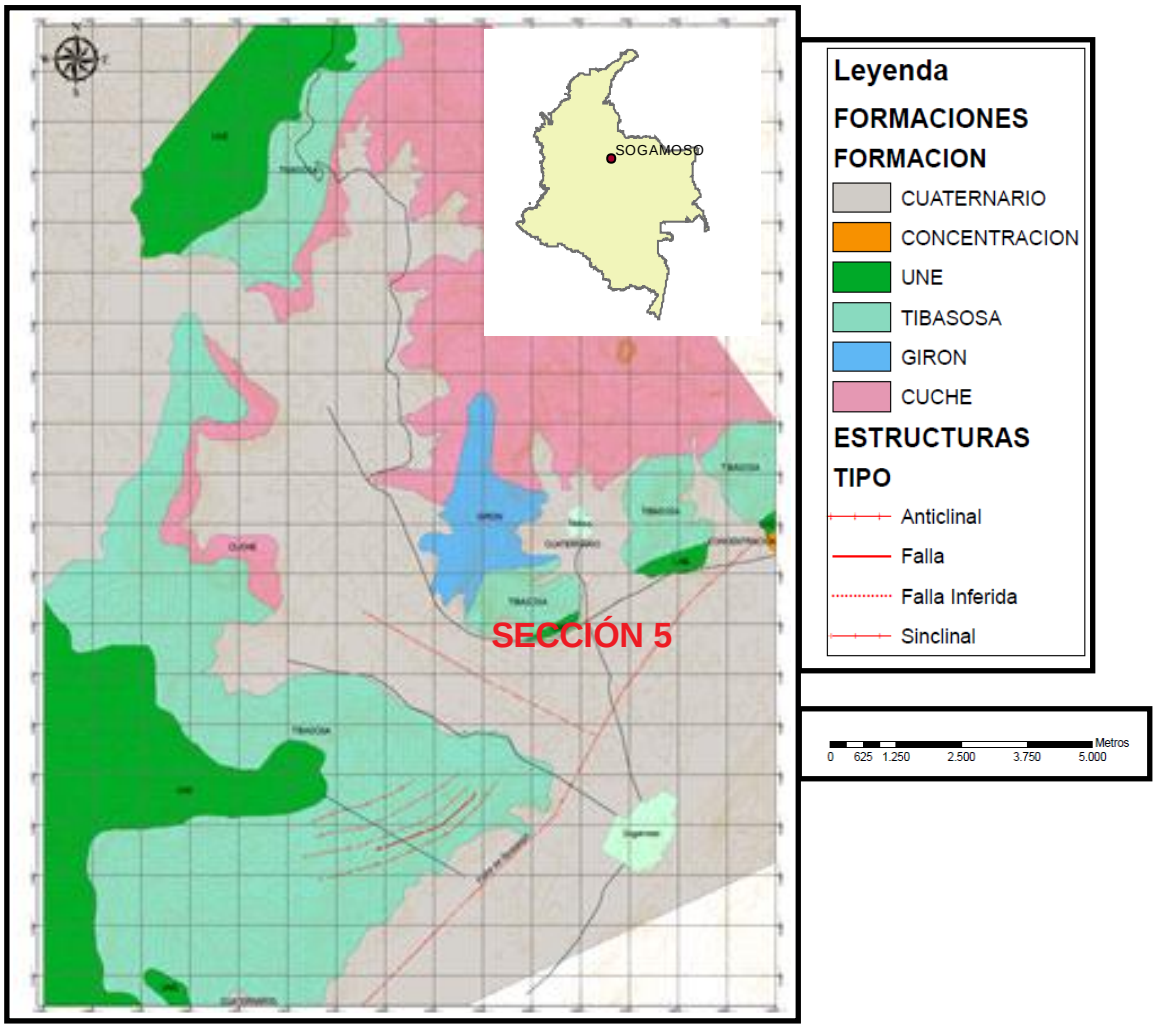


Figura 50. Ubicación Formación Tibasosa, Cuche – Duitama, Boyacá. A partir de la interpretación de las litofaciesfacies se determinaron 10 segmentos en los cuales se analizaron los diferentes ambientes de depósito



Hacia la base los dos primeros segmentos están conformados por arenitas cuarzosas ligeramente conglomeráticas y arenitas cuarzosas con pobre selección. Dichos depósitos se interpretan como un ambiente de río meándrico, ya que se encontraron canales de material grueso rodeado de material más fino, ocasionalmente laminado, además canales de conglomerados de guijos y guijarros, típicos de este ambiente, como lo describe. Otra característica

importante de este ambiente es el color verde en los materiales finos y en la matriz de las areniscas (Ver Figura 50).

Figura 51. Segmento 1 y 2, se observan depósitos de arenitas cuarzosas conglomeráticas, mal calibradas. Indicando ambiente de ríos trenzados. Con asociación de litofacies A(c) int Cal.



Los segmentos 3, 4 y 5 desde los 97 hasta los 210 metros, el segmento 3 se encuentra cubierto hasta los 127m, seguido de esto se observan capas de limolita intercaladas con lutitas y capas gruesas de areniscas. Hacia el tope las capas de arenisca se hacen delgadas y las lutitas aumentan su espesor. La estratificación observada es planoparalela y en algunos niveles hay concreciones e impresiones de bivalvos. El segmento 5 es una intercalación de lutitas y areniscas lodosas en capas muy gruesas con contactos ondulosos entre capas (ver figura 51). Se

observan nódulos y bioturbación. Las asociaciones de facies son (*A(L) mld biot int L lam mld, L lam mld int A(L) mld, L lam int L f int (L o-lam int A) int A m)*

Figura 52. Fotografía de Arenisca Lodosa con presencia de Bivalvos y fragmentos de conchas.



El tope de la segunda sección se localiza geográficamente por la vía que comunica Duitama y Sogamoso en el kilómetro 12 sobre el borde izquierdo de la carretera y continúa en la Zona de explotación de caliza La Calera. A continuación se explica por segmentos las facies encontradas en la sección, de base a tope.

Los segmentos 7 y 8 corresponden a un depósito de Lodolitas de color gris claro con laminación plano paralela, en capaz tabulares muy gruesas, contactos netos, intercalada con caliza Wackestone de color gris oscuro en capas tabulares gruesas a muy gruesas, contactos irregulares y presencia de fragmentos fósiles y conchas de bivalvos; intercalada con caliza Mudstone de color gris oscuro en capas tabulares gruesas a muy gruesas, contactos irregulares y fragmentos

fósiles; e intercalada con Cuarzoarenisca de grano medio, bien seleccionadas, subangulares, cemento silíceo, porosidad media, color gris amarillento, en capas tabulares gruesas a muy gruesas, contacto irregular, con laminación plano paralela y a veces bioturbada en el tope. Las asociaciones de facies presentes son *(L lam int W int M int A biot lam, M int W)*; Los depósitos de lodolitas y calizas tipo mudstone indican ambientes tranquilos donde el nivel base era alto y el oleaje no interfería en el transporte y depósito de los sedimentos. Las calizas tipo wackestone son de un ambiente un poco más somero pero de igual forma se puede inferir un ambiente de plataforma externa a interna.

Figura 53. (A) Fotografía de la muestra de caliza tipo Mudstone. (B) Fotografía de una capa de caliza tipo Wackestone



El segmento 9 está compuesto por Lodolitas de color gris oscuro a negro en capas con geometría tabular gruesas a muy gruesas, con estructura laminada plano paralela; intercalada con caliza tipo mudstone color gris oscuro en capas delgadas a medias con estructura nodular (concreciones) y el segmento 10 está ubicado en el tope de la sección estratigráfica, va desde el metro 103.5 al 126, con un espesor de 22.5 metros, de los cuales 7.5 metros son sección levantada y el

resto segmentos cubiertos que por la geomorfología de la zona corresponderían a litologías blandas. La litofacie asociada a este segmento es *L int M* y corresponden a un ambiente de plataforma interna, permitiendo una dinámica de sedimentación de baja energía en la que se depositaron capas de lodolitas y Mudstone de coloración rojiza, que de acuerdo con Reading esta coloración se debe a un ambiente reductor durante la sedimentación y la oxidación de la roca, producto de su exhumación (Ver Figura 53).

Figura 54. Afloramiento ubicado en la Zona La Calera. Se observa la coloración rojiza típica del segmento 9.

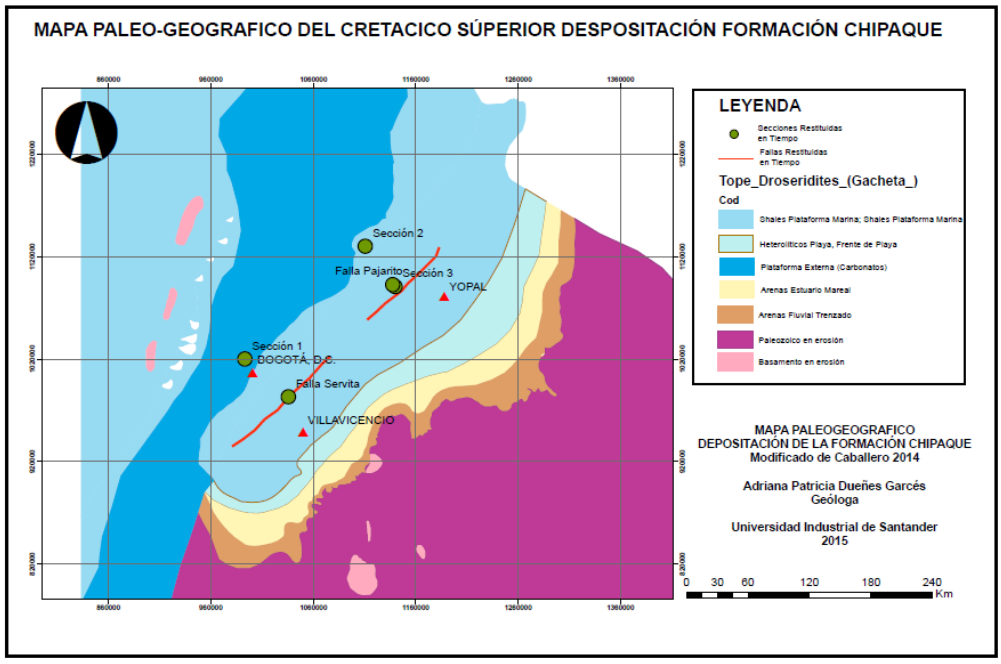


Tabla 13. Ambientes de depósito definidos para la Sección Formación Tibasosa – Municipio de Cuche (Boyacá)

SEGMENTO	AMBIENTE	ASOCIACIÓN DE LITOFACIES
10	Plataforma Interna	*L lam am*
9	Plataforma Interna	*L int M*
8	Plataforma Externa	*M int W*
7	Plataforma Externa	*L lam int W int M int A biot lam*
6	Shoreface Lower	*A(L) lam*
5	Plataforma Interna	*L lam int L f int (L o-lam int A) int A m*
4	Plataforma Interna	*L lam mld int A(L) mld*
3	Plataforma Interna	*A(L) mld biot int L lam mld*
2	Río Trenzado a Meándrico	Alc int L lam
1	Río Trenzado	A(c) int Cal

6.2 MAPA PALEOGEOGRÁFICO DEL CRETÁCICO SUPERIOR

Figura 55. Mapa Paleogeográfico del Turoniano, Cretácico Superior



Fuente: CABALLERO VÍCTOR M., NARANJO J., DE LA PARRA F., QUINTERO I., MORA A., RODRIGUEZ G. Asistencia Técnica: Estudio de Unidades Reservorio Bloque CPO-09, Informe Final. Ecopetrol – Instituto Colombiano del Petróleo, Coordinación de Asistencias Técnicas Especializadas Exploración – CEC. 83 Pg. 2015

El mapa Paleogeográfico obtenido en este trabajo se presenta como aporte al mapa elaborado por Caballero[70] el cual tiene restauración Palinspastica y se elaboró con base a correlaciones de secciones desde la Cuenca de Caguan – Putumayo hasta Catatumbo. Las secciones medidas de la Formación Chipaqueen este proyecto y la Fallas existentes tienen restitución a 90Ma, lo cual muestra los datos movidos hacia el Este en la actualidad debido al acortamiento que tuvo la Cordillera Oriental por la acreción desde la Cordillera Central. El mapa elaborado por (Ingeominas, 1996), muestra un ambiente de plataforma Externa Carbonatada que coincide con los ambientes de las secciones medidas; por lo tanto se incorporó a este trabajo.

Los análisis de Palinología realizados a las muestras seleccionadas de cada sección medida en campo de la Formación Chipaque indican que su depósito se generó entre los 96 y 82 Ma, lo que evidencia una unidad perteneciente al Cretácico Superior de finales del Cenomaniano hasta principios del Campaniano, El análisis de litofacies muestra posibles ambientes de depósito de plataforma somera de la Formación Chipaque. Al Sur Occidente de la Cordillera Oriental (sección 1, área de Choachí, Cundinamarca) se evidencia depósito de abundante material carbonatado, 30% de los 1100 m medidos, por esta razón se indica plataforma marina carbonatada para el sector nombrado (Ver figura55), esta facie cabonatada se observa a lo largo de la ahora zona Occidental de la Cuenca Cordillera Oriental, Valle Medio del Magdalena y Valle Superior del Magdalena (Ingeominas). Se debe hacer mayor control en la zona para identificar y delimitar mejor el área de plataforma carbonatada. La sección 2 ubicada en el Municipio de El Crucero se identificó una zona de depósito de plataforma interna con aporte continental. Teniendo en cuenta que durante la edad de depósito de la Formación Chipaque el nivel eustático base alcanzó el nivel más alto del Mesozoico. En la

[70] CABALLERO VÍCTOR M., NARANJO J., DE LA PARRA F., QUINTERO I., MORA A., RODRIGUEZ G. Asistencia Técnica: Estudio de Unidades Reservorio Bloque CPO-09, Informe Final. Ecopetrol – Instituto Colombiano del Petróleo, Coordinación de Asistencias Técnicas Especializadas Exploración – CEC. 83 Pg. 2015.

sección 2 que se encuentra hacia el Piedemonte Llanero, al Nororiente de la Cordillera Oriental se definió un ambiente de plataforma interna con algunos aportes de material continental y en menor proporción material carbonatado (Ver figura 55); Un relativo aumento del nivel base durante el Cenomaniano Tardío[71] induce una ligera profundización y un notorio decrecimiento de material detrítico en la cuenca, este aumento del nivel base causo depositación lenta de lutitas negras laminadas y facies pelágicas micríticas en zonas distales de la cuenca. La mayor superficie de inundación en el límite del Cenomaniano – Turoniano se caracteriza por un horizonte fosilífero en la Formación Frontera y Formación San Rafael[72]. Durante el Turoniano – Conianciano la hoy cuenca de Llanos Orientales en sus estribaciones se inundó[73] a diferencia del resto de la cuenca.

6.3 ANÁLISIS DE HISTORIAS DE SUBSIDENCIA Y FACTOR (β) DE ESTIRAMIENTO DE LA CORTEZA.

El registro estratigráfico nos permite reconstruir la historia de enterramiento en cada punto que se simula; la subsidencia total es la suma del hundimiento tectónico y el hundimiento por peso de los sedimentos.

Para realizar el análisis de las historias de subsidencia se deben tener en cuenta algunas variables que son de gran importancia para entender los resultados. Lo primero que se debe hacer con los datos compilados es calcular la porosidad de la roca a la profundidad actual empleando la siguiente formula: $\Phi = \Phi_o e^{-cy,}$ donde Y es la profundidad actual, Φ_o y c son valores definidos para cada litología (Ver Tabla 14)

[71] VILLAMIL, 1993
[72] Ibid
[73] COOPER, ADDISON, ÁLVAREZ, CORAL, GRAHAM, HAYWARD, MARTÍNEZ, NAAR, PEÑAS, PULHAM, AND TABORDA, Op. Cit.

Tabla 14. North Sea (Allen and Allen, p. 268)

C	Φ0	LITHOLOGY	ABBR	GRAIN ρ kg/m3	REFERENCES
0,00051	0,63	Shale	SH	2720	1
0,00027	0,49	Sandstone	SST	2650	1
0,00071	0,7	Chalk	CHA	2710	1
0,00039	0,56	Shaly Sandstone	SH-SST	2680	1
		Mantle		3300	
		Water		1030	

- **COEFICIENTE (β) DE ESTIRAMIENTO**

Los datos base para hallar el coeficiente de estiramiento (β) son los ingresados en la tabla 15. El mayor estiramiento se dió al Sur Occidente de la Cordillera Oriental, puento en el cual se produjo el mayor espacio de acomodación para la depositación de las Formaciones Cretacicas.

Tabla 15. Valores constantes y variables para cálculo de coeficiente de estiramiento.

DATOS DE ENTRADA		
yL	90000	Espesor inicial de la litosfera (km)
yc	27000	Espesor inicial de la corteza (km)
Tm	1333	Temperatura del manto (C)
□□	3,28E-05	Coeficiente de expansión termal (C-1)
□**s**	1060	Densidad de los sedimentos (kg/m3)
□**m**	3300	Densidad del manto (a 0°C) kg/m3
□**w**□	1060	Densidad del agua kg/m3
□	9,50E-07	Difusividad termal m2/s
□	2,84E+00	Conductividad termal (Wm-1°C-1
c	950	heat capacity (JKg-1K-1)
□**c**	2800	Densidad corteza
□**l**	3150	Densidad litosfera

6.3.1 Sección Sur, Chipaque Choachí

Tabla 16. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección.

Formación	Litología				Edad Base	Edad Tope	Water Depth (+) Elevation (-)	Nivel Eustatico	Espesor Observado
	SH	SST	CHA	SH-SST					
Sabana	75,0%	25,0%	0,0%	0,0%	28,00	0,00	-500,00	150,00	300,00
Discordancia	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	28,00	11,00	-500,00	150,00	0,00
Usme	80,0%	20,0%	0,0%	0,0%	37,00	28,00	-150,00	150,00	500,00
Regadera	20,0%	80,0%	0,0%	0,0%	44,00	37,00	-100,00	200,00	210,00
Bogota	85,0%	15,0%	0,0%	0,0%	59,00	44,00	-150,00	225,00	1.415,00
Cacho	20,0%	80,0%	0,0%	0,0%	61,00	59,00	-100,00	195,00	100,00
Guaduas	80,0%	20,0%	0,0%	0,0%	69,00	61,00	-100,00	205,00	600,00
Guadalupe	30,0%	55,0%	0,0%	15,0%	87,00	69,00	0,00	215,00	630,00
Chipaque	60,0%	10,0%	30,0%	0,0%	98,00	87,00	50,00	225,00	1.100,00
Une	25,0%	75,0%	0,0%	0,0%	105,00	98,00	10,00	245,00	905,00
Fomeque	70,0%	10,0%	20,0%	0,0%	131,00	105,00	30,00	160,00	1.000,00
Caqueza	10,0%	90,0%	0,0%	0,0%	134,00	131,00	15,00	140,00	300,00
Macanal	90,0%	10,0%	0,0%	0,0%	141,00	134,00	50,00	125,00	2.900,00
Buenavista	15,0%	85,0%	0,0%	0,0%	150,00	141,00	10,00	160,00	45

Fuente: Tomados de: RENZONI G. Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana N.5, pp.75-127. 1968, ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E, FUQUEN, J. y ACOSTA, J. Memoria Explicativa de la Plancha 192 Laguna de Tota. INGEOMINAS. 2001, BAYONA, G., VALENCIA, A., & ORTIZ, J. Control de Subsidencia en el Flanco Este de la Oriental y Correlaciones Estratigráficas del Sector Sur de los Llanos Orientales. Informe Interno ICP. 2008, VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectonogénesis de los Andes Colombianos: Boletín Geológico del Ingeominas vol. 6 n.1-3, pp 67-128. 1958, MORA, A. Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia. PhD Thesis, Universit _t Potsdam, Potsdam. 2007, MORA, A. y KAMMER, A. Comparación de los estilos estructurales en la sección entre Bogotá y los Farallones de Medina, Cordillera Oriental de Colombia. Geología Colombiana No. 24, pp.55-82. 1999.

Los datos de la Formación Chipaque usados para la historia de enterramiento fueron tomados de la sección medida durante el campo de este trabajo. La Formación midió 1100 metros y se tomaron muestras para análisis palinológicos y análisis geoquímicos para realizar modelos de generación de hidrocarburos. Se

determino un 60% de contenido lutitico, 10% de areniscas, 30% de calizas. La Formación Fómeque se trabaja como un depósito deplataforma somera a profunda.

Tabla 17. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 32500, β: 1.62), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación.

YL	Yc	Coeficiente (β)
90000	32500	1,62
100000	34500	1,61
125000	35000	1,6

Figura 56. Historia de subsidencia de la sección Sur. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua).

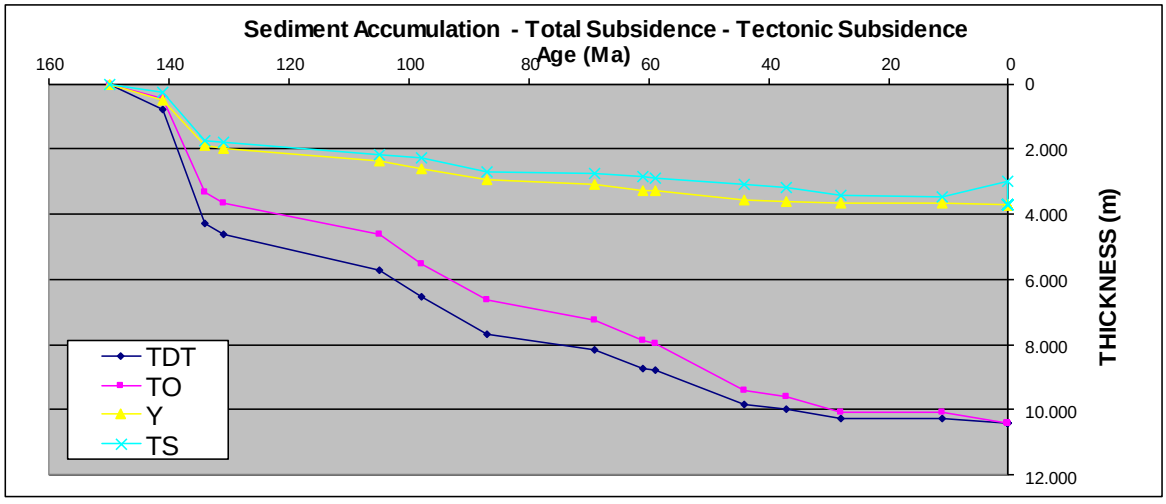
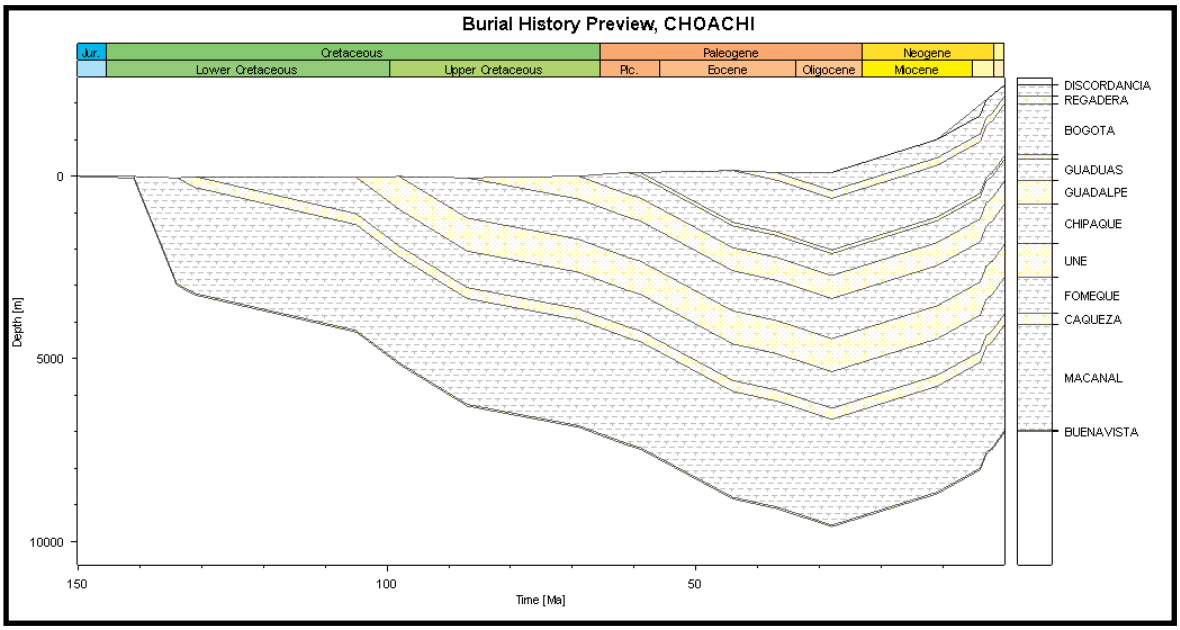


Figura 57. Historia de subsidencia de la sección Sur. Modelada por PetroMod.



Las curvas de enterramiento para esta sección muestran una rápida subsidencia entre los 140 y 131 Ma para la zona sur de la Cuenca Cordillera Oriental; lo cual indica un periodo de extensión y adelgazamiento de la corteza en el cual se generó un gran espacio de acomodación que permitió la depositación de la Formación Macanal con un espesor de más de 2000 metros de lutitas y la Formación Cáqueza. Se asume este tiempo como un periodo de rifting. Seguido de esto se observa que la curva se suaviza entre 131 y 98 Ma y se hace levemente asintótica con el eje del tiempo; lo cual indica posiblemente una etapa de subsidencia térmica en la cual se da la depositación de la Formación Fómeque y Formación Une. A los 98 Ma se da un periodo corto de subsidencia hasta 87 Ma lo cual indicaría un segundo periodo hundimiento en esta edad de tipo tectónico, lo cual permite la creación de una espacio de acumulación para la Formación Chipaque, Dura, plaeners, Labor y Tierna. Al comienzo del Paleoceno desde los 65 Ma se evidencia un periodo de levantamiento y erosión relacionados con las

primeras etapas de inversión[74]. Y un periodo de estabilización tectónica y subsidencia por carga de sedimentos que permite la depositación de las Formaciones Terciarias.

6.3.2 Sección Chipaque área Pajarito

Tabla 19. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección.

Formación	Litología				Edad Base	Edad Tope	Water Depth (+) Elevation (-)	Nivel Eustático	Espesor Observado
	(%)SH	(%)SST	(%)CHA	(%)SH-SST					
Carbonera	60%	40%	0%	0%	37,00	20,00	-200,00	140,00	1310,00
Mirador	35%	65%	0%	0%	54,00	37,00	-200,00	200,00	200,00
Discordancia	0%	0%	0%	0%	55,00	54,00	-150,00	200,00	0,00
Los Cuervos	75%	25%	0%	0%	58,00	55,00	-150,00	200,00	280,00
Barco	40%	60%	0%	0%	63,00	58,00	-100,00	180,00	113,00
discordancia	0%	0%	0%	0%	68,00	63,00	-50,00	220,00	0,00
Grupo Guadalupe	40%	60%	0%	0%	86,00	68,00	10,00	220,00	345,00
Chipaque	70%	20%	10%	0%	96,00	86,00	50,00	230,00	607,00
Une	30%	70%	0%	0%	112,00	96,00	40,00	200,00	903,00
Fomeque	75%	25%	0%	0%	127,00	112,00	20,00	180,00	553,00
Las Juntas	25%	75%	0%	0%	132,00	127,00	5,00	140,00	404,00
Macanal	90%	10%	0%	0%	137,00	132,00	25,00	125,00	1370,00

Fuente: ULLOA, C. y RODRIGUEZ, E. Geología del cuadrángulo K-13, Tauramena. Ingeominas, informe 1706, 22 p. 1976, COLMENARES, F. Columnas estratigráficas en el Piedemonte Llanero para la BPColombia (solo información de columnas esquemáticas). 1993, BAYONA, G., VALENCIA, A., MAHECHA, H., ACOSTA, D., VILLAMARIN, P., VILLAMIZAR, C, MORA, A., OJEDA, G., GAMBA, N., Enterramiento-Erosión-Levantamiento de dominios estructurales del Piedemonte norte, central y Llanos Sur integrando modelamiento flexural con datos de geoquímica y termocronología: Reporte interno de ECOPETROL S.A.-ICP. 2008a, Geostratos – Petrobras. Cartografía Geológica del Bloque Tierra Negra 2003: Reporte Interno - Petrobras Colombia Ltda. 2003.

[74] SARMIENTO, 2001. Op. Cit.

Los datos de la Formación Chipaque usados para la historia de enterramiento fueron tomados de la sección medida durante el campo de este trabajo. La Formación midió 607 metros y se tomaron muestras para análisis palinológicos y análisis geoquímicos para realizar modelos de generación de hidrocarburos. Se determino un 70% de contenido lutitico, 20% de areniscas, 10% de calizas.La Formación Fomeque se asume como un depósito de plataforma somera a profunda entre (+)40 y 100m.

Figura 58. Historia subsidencia de la sección Pajarito. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua).

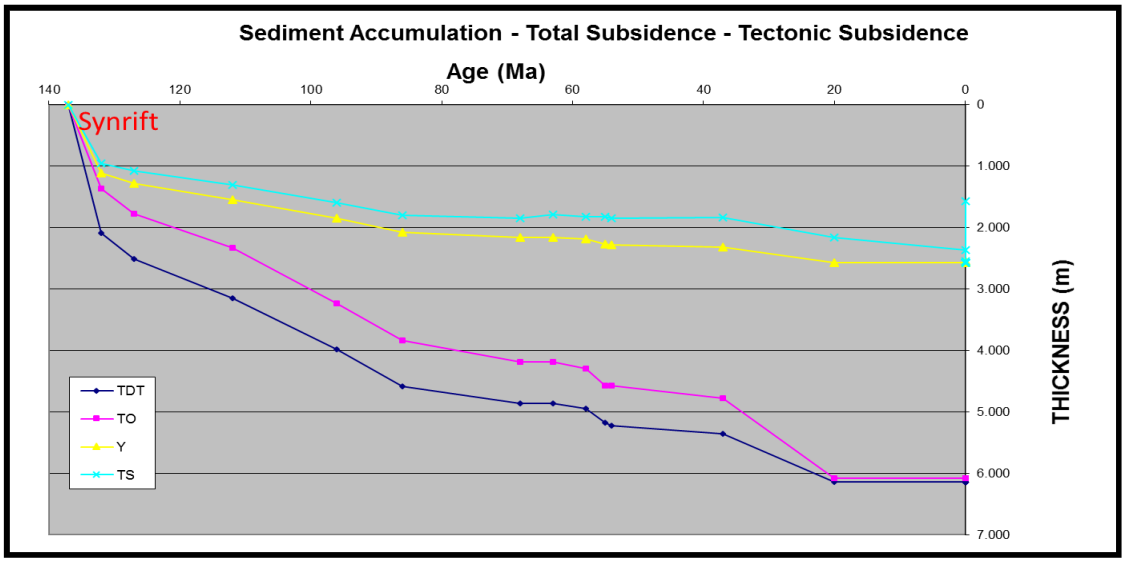
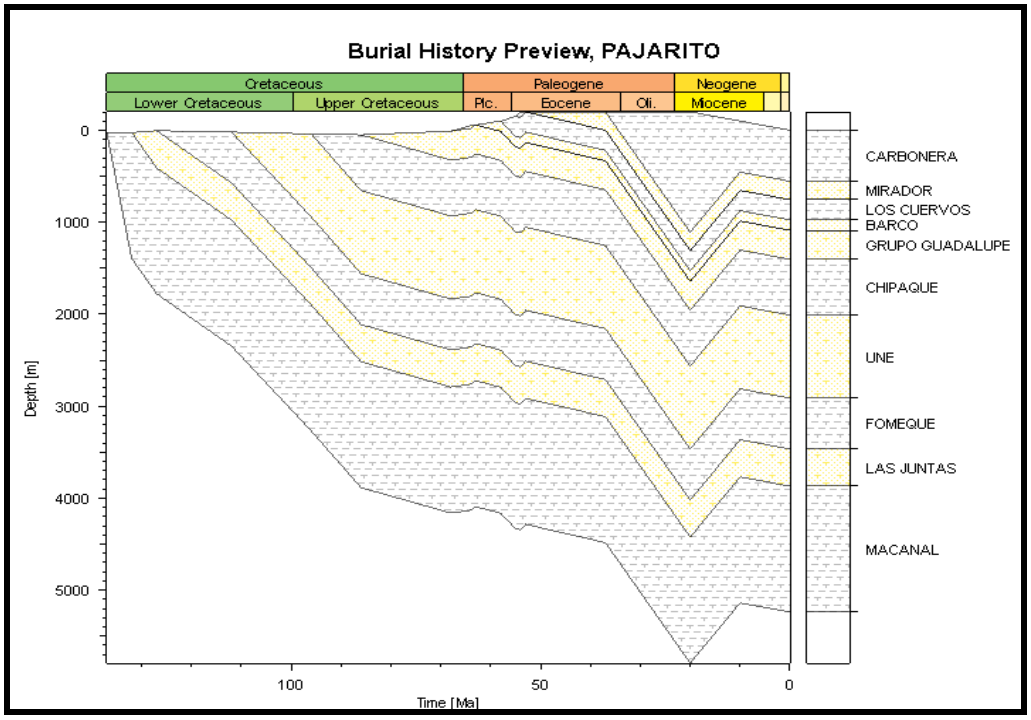


Tabla 20. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 28000, β: 1.57), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación.

YL	Yc	Coeficiente (β)
90000	28000	1,57
100000	29000	1,5
125000	33000	1,54

Figura 59. Historia de subsidencia de la sección Pajarito modelado en PetroMod.



La historia de subsidencia en la zona nororiental de la Cordillera Oriental hacia el piedemonte llanero (Municipio de Pajarito) inicia con una etapa de subsidencia rápida por extensión cortical del Cretácico Temprano en la cual se profundiza la cuenca lo suficiente para permitir la depositación de las Formaciones Macanal y

Las Juntas, lo cual muestra una etapa de Synrift hasta 127 Ma. La subsidencia disminuye indicando al parecer un periodo de subsidencia térmica la cual genera un espacio de acomodación y depositación de la Formación Fómeque que tiene su tope a los 112 Ma. Entre los 96 y 86 Ma se observa un evento de profundización de la cuenca por hundimiento tectónico; este espacio de acomodación permite la depositación de la Formación Chipaque y el Grupo Guadalupe. A los 68 Ma se observa un periodo de aparente levantamiento, el cual indica un cambio de batimetría que marca el cambio de ambiente sedimentario de Formaciones marinas a Formaciones continentales.

6.3.3 Sección Tibasosa

Tabla 21. Datos usados para realizar la historia de enterramiento de la sección Tibasosa. Tomados de: Montoya y Reyes (2005), Martinez (1995), Sarmiento (1992), Ulloa y Rodriguez (1974).

Formación	LITHOLOGY				Edad Base	Edad Tope	Water Depth (+) Elevation (-)	Nivel Eustatico	Espesor Observado
	SH	SST	CHA	SH-SST					
Plioceno	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%	5,00	0,00	0	200,00	1.250,00
Mioceno Sup	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%	11,00	5,00	-5,00	210,00	1.100,00
Discordancia	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	29,00	11,00	-5,00	210,00	0,00
Concentración	60,0%	40,0%	0,0%	0,0%	44,00	29,00	5,00	190,00	200,00
Picacho	5,0%	95,0%	0,0%	0,0%	55,00	44,00	-5,00	180,00	180,00
Bogotá	65,0%	35,0%	0,0%	0,0%	58,00	55,00	-5,00	200,00	400,00
Cacho	20,0%	80,0%	0,0%	0,0%	63,00	58,00	-5,00	190,00	170,00
Guaduas	70,0%	30,0%	0,0%	0,0%	70,00	63,00	0,00	200,00	650,00
Guadalupe	30,0%	65,0%	5,0%	0,0%	84,00	70,00	10,00	210,00	335,00
Chipaque	70,0%	30,0%	0,0%	0,0%	95,00	84,00	50,00	230,00	750,00
Une	30,0%	70,0%	0,0%	0,0%	105,00	95,00	5,00	240,00	500,00
Tibasosa	20,0%	30,0%	50,0%	0,0%	133,00	105,00	-15,00	200,00	600,00
Discordancia	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	145,50	133,00	-15,00	250,00	0,00

Los datos de la Formación Tibasosa usados para la historia de enterramiento fueron tomados de la sección medida durante el campo de este trabajo. La Formación midió 600 metros y se tomaron muestras para análisis palinológicos y análisis geoquímicos para realizar modelos de generación de hidrocarburos. Se definieron 4 miembros en los cuales de setermino un 20% de contenido lutitico, 30% de areniscas, 50% de calizas. La Formación Fómeque se trabaja como un depósito deplataforma somera a profunda (+) 40 y 100m.

Tabla 22. Datos obtenidos de coeficiente beta representados en 3 modelos al variar el espesor de la litosfera y de la corteza en valores permitidos. El modelo que más se aproximó a los datos teóricos fue (YL: 90000, Yc: 29000, β: 1.41), por lo tanto el modelo 1D se calibró con esta combinación.

YL	Yc	Coeficiente (β)
90000	29000	1.41
100000	31000	1.39
125000	32000	1.385

Figura 60. Historia de subsidencia de la sección Tibasosa. Se observan tres curvas; TDT: suma de los espesores decompactados; TO: sumatoria de los espesores observados; Y: corrección por carga de sedimentos; TS: Subsidencia tectónica (subsidencia ue no es debida a carga de sedimentos ó carga de agua).

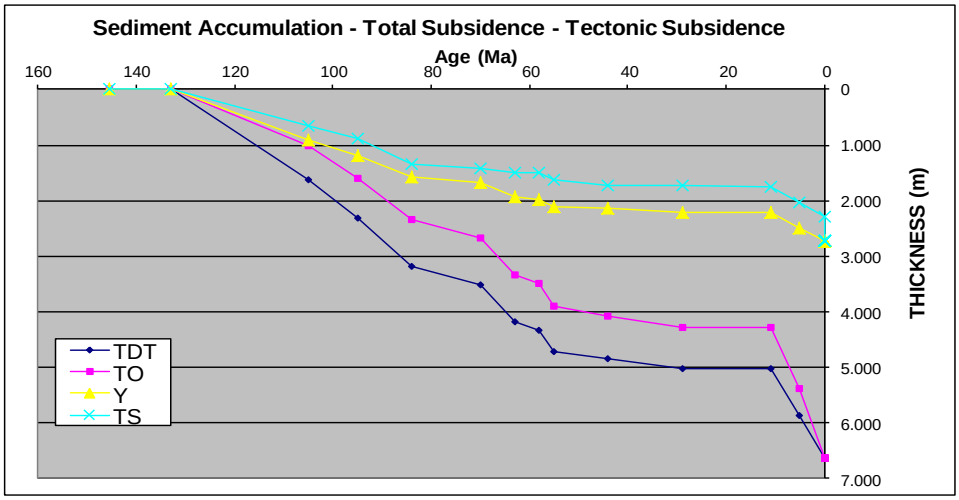
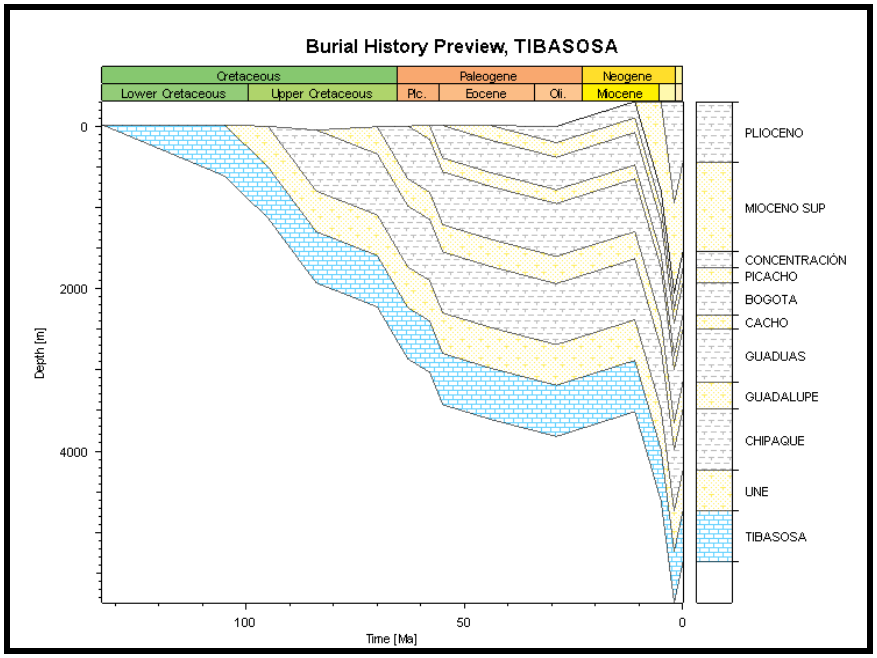


Figura 61. Historia de subsidencia de la sección Tibasosa modelada en PetroMod

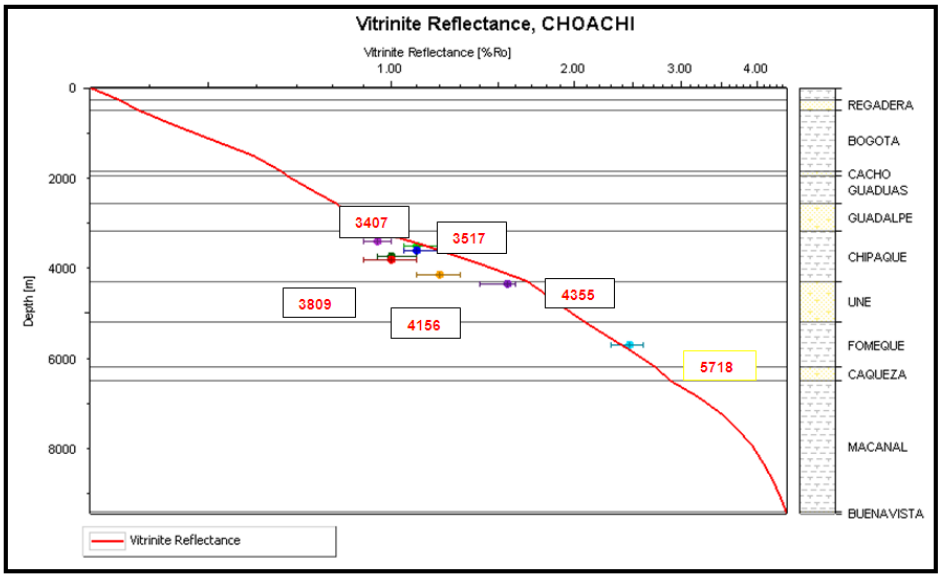


Se observa un periodo de rápida subsidencia y creación de gran espacio de acomodación desde los 133 hasta los 84 Ma. En este periodo se depositaron Formaciones de secuencia Cretácica Temprana como Tibasosa, Une y Formación Chipaque y Formación Guadalupe del Cretácico Superior. Cabe resaltar que la Formación Tibasosa en la sección se encuentra sobre una discordancia que no se representa por ser un periodo largo y no fue posible ubicarlo en la hoja de cálculo. Seguido de dicho periodo de extensión y depositación se observa un tiempo de poca subsidencia posiblemente subsidencia térmica la cual continúa generando espacio de acomodación para la Formación Guaduas, Cacho, Bogotá y Picacho. A los 44 Ma se observa el inicio de la inversión y la secuencia se ve afectada por la Falla de Guaicaramo. Se puede identificar un periodo de levantamiento y erosión del periodo de depositación Terciaria. Entre los 55 Ma y 44 Ma la línea se vuelve asintótica con su eje, lo que indica un periodo de posible depositación y erosión. (Ver figura 61).

7. ANÁLISIS DE MODELOS 1D PARA LAS FORMACIONES CHIPAQUE Y TIBASOSA

7.1 SECCIÓN CHIPAQUE CHOACHÍ

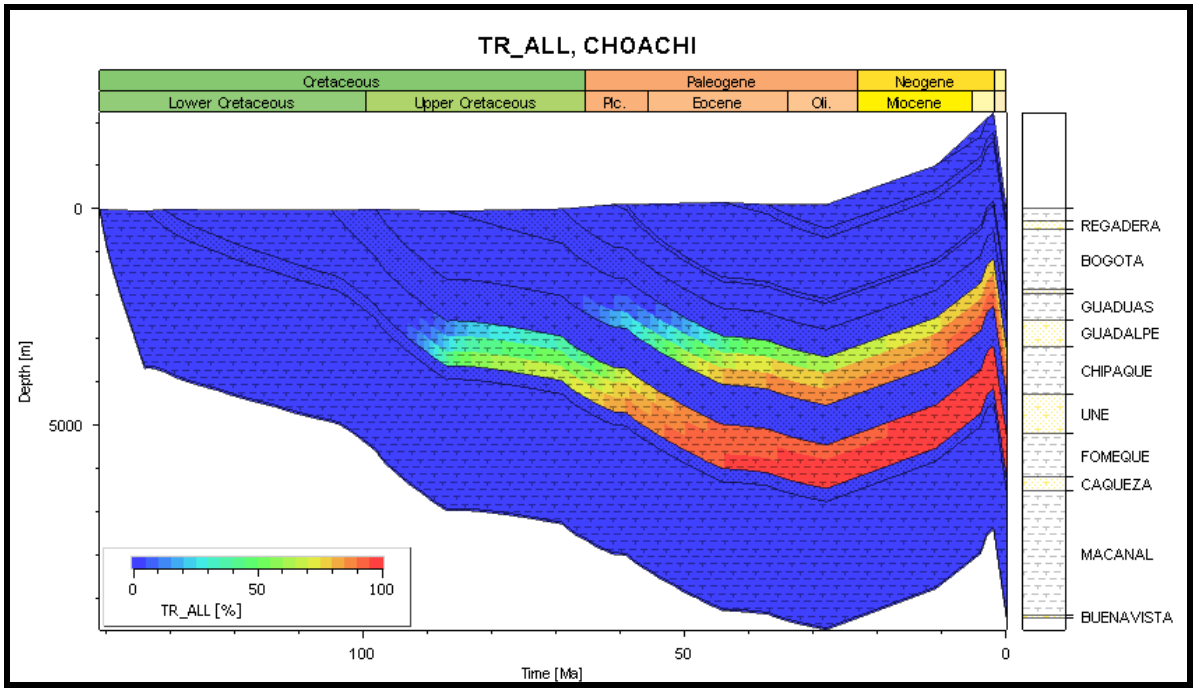
Figura 62. Calibración del modelo 1 (Formación Chipaque) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita.En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 4355m= 1.55, 4156m = 1.2, 3809m= 1.0, 3743m= 1.0, 3601m=1.1, 3517m=1.1, 3407m=0.95. En cuadro amarillo Ro Fomeque: 5718m= 2.46, tomado de Mora et al., (2008).



Con los datos obtenidos de reflectancia de vitrinita se realizó la calibración del modelo (Figura 62); en esta figura se observa que los datos de vitrinita para la Formación Chipaque al Sur de la Cordillera Oriental actualmente se encuentran en

1.37 % y 0.84%. Lo cual indica que se debieron acumular entre 3.7 y 5.7 km de sedimentos sobre esta unidad para alcanzar dichos valores. Con el valor de la reflectancia de vitrinita de la muestra AP-RB-948 (Ver anexo B) que se encuentra más al tope de la Formación (0.94%), se puede inferir que deberían haber 3.7 a 4.4 km de sedimentos sobre Chipaque. Si sumamos la sección tenemos 3.9 Km de sedimentos y un faltante de 500m los cuales se asumen como espesor erosionado del Oligoceno Superior y Mioceno Inferior.

Figura 63. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Chipaque (Sección Sur). Edad Vs Profundidad

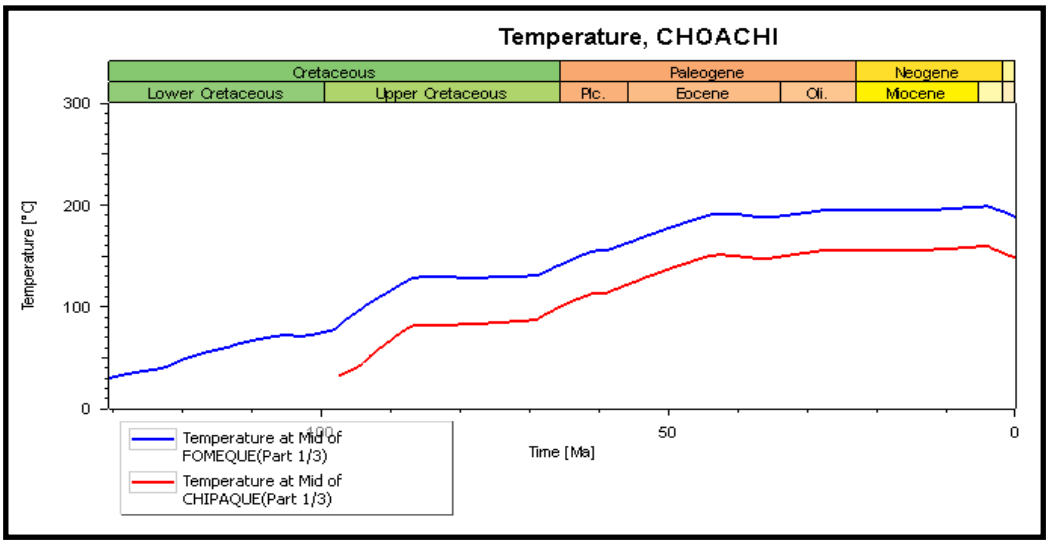


Al calibrar el modelo con los datos de Ro y las condiciones límite descritas en la sección 4.4.1 y teniendo la historia de enterramiento se generó el modelo de transformación de la matéria orgánica el cual mostró que para la Formación Chipaque Al sur de la Cordillera Oriental, zona Oeste (Sinclinal de Usme y

alrrededores), se inició la transformación a los 58 Ma lo que indica que ya se habian depositado las Formaciones Guadalupe, Guaduas, Cacho y parte de la Formación Bogotá. Para este momento la Formación Chipaque tenía suficiente carga de sedimentos para alcanzar temperaturas de generación; llegando al 26.51% de transformación inicialmente. Se observan tasas aceleradas de transformación encontrando que a los 51 Ma se había transformado un 53%. En el perfil de subsidencia a los 28 Ma continúa en generación e inicia un periodo de deformación a causa del levantamiento de la Cordillera Oriental. A los 20 Ma de años la Formación Chipaque alcanza una generación del 85.5% y continúa la erosión y depositación de nuevos sedimentos. Actualmente 0 Ma la Formación Chipaque está en el 82% de su transformación de la matéria orgánica; lo que indica que podría estar generando hidrocarburos.

La Formación Fómeque inicia la transformación de la materia orgánica a los 87 Ma cuando se encontraba a 3200m de profundidad. A partir de esta edad la Formación Fomeque inicia un periodo acelerados de transformación de la materia orgánica, a los 83Ma alcanzo un 57% de tranformación. A los 83 Ma ya se tenia la suficiente carga de sedimentos y suficiente enterramiento de la Formación lo que podria indicar que los crudos de esta edad se depositaron en la Formación Une. A los 66Ma alcanza un 80% de la transformación, para esta edad no se habia exhumado la Cordillera Oriental y la acción de la Fallas era normal. Al inicio del Paleoceno donde inicia la inversión tectonica la Formación habia transformado un 83% de la materia orgánica. El levantamiento de la Cordillera Oriental inicia a los 24 Ma donde se observa un 95% de transformación y un enterramiento de 6300m, para esta edad posiblemente solo se encontraba produciendo gas y los crudos entrampados pudieron migrar o se pudieron perder sin un entrampamiento.

Figura 64. Curva de Paleotemperatura de la Formación Chipaque (Sección Sur).



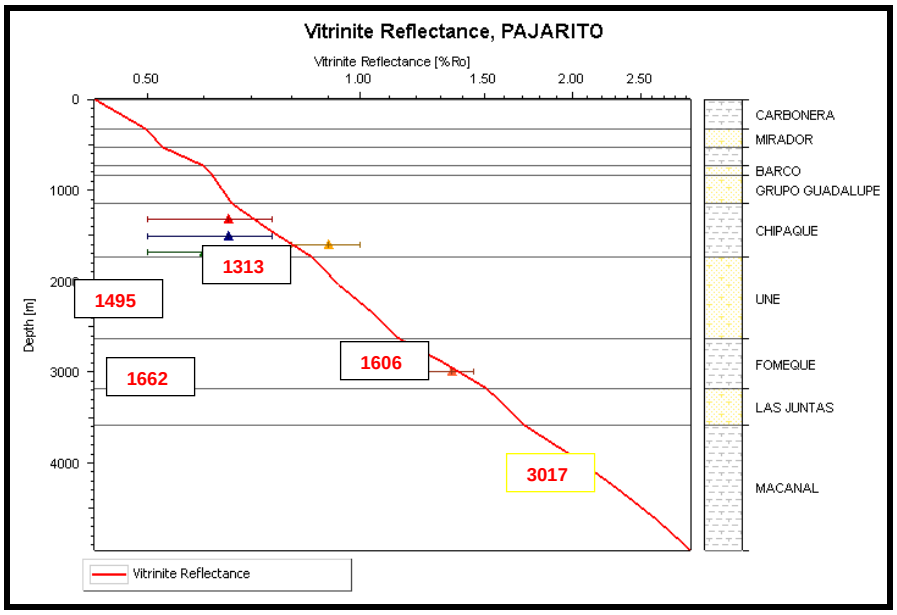
La paleotemperatura de la Formación Chipaque durante el Cretácico únicamente alcanza valores hasta 52°C; al entrar al Paleoceno inicia un ascenso constante hasta alcanzar su pico máximo en el Oligoceno Medio a los 29 Ma, donde se observa un valor de 135 °C (Ver figura 64). En el mismo punto el máximo enterramiento de la Formación se da a 4584 m. seguido de esto la temperatura se mantiene en valores cercanos durante el Mioceno hasta que empieza a disminuir a finales del Mioceno Superior.

La Formación Chipaque inicia un ascenso constante de la temperatura a partir del Paleoceno Inferior, hasta llegar a los 133°C a los 28 Ma, donde se observa su enterramiento máximo de 3690 m y un Ro de 1.24% (Ver figura 64). Para esta edad la Formación se encuentra en ventana de generación de gas e hidrocarburos. En el Eoceno Medio a Superior se infiere la etapa de mayor generación de hidrocarburos (43-33 Ma), en dicha edad ya se había depositado hasta parte de la Formación Regadera, lo cual indica carga de sedimentos, porcentaje de Ro y temperatura suficientes para acumular hidrocarburos

posiblemente en la Formación Guadalupe. La Paleotemperatura de la Formación Fomeque a los 85Ma de años alcanza su máxima temperatura de generación de hidrocarburos 125°C, para esta edad la Formación tiene enterramiento suficiente para generar y expulsar crudo por lo cual se considera el pico máximo de generación. Al inicio del Paleoceno la temperatura alcanza valores de 160 °C y valores de Reflectancia de Vitrinita de 1.28 % hasta 1.58% indican que no se encuentra más en ventana de generación y posiblemente continúa generando gas.

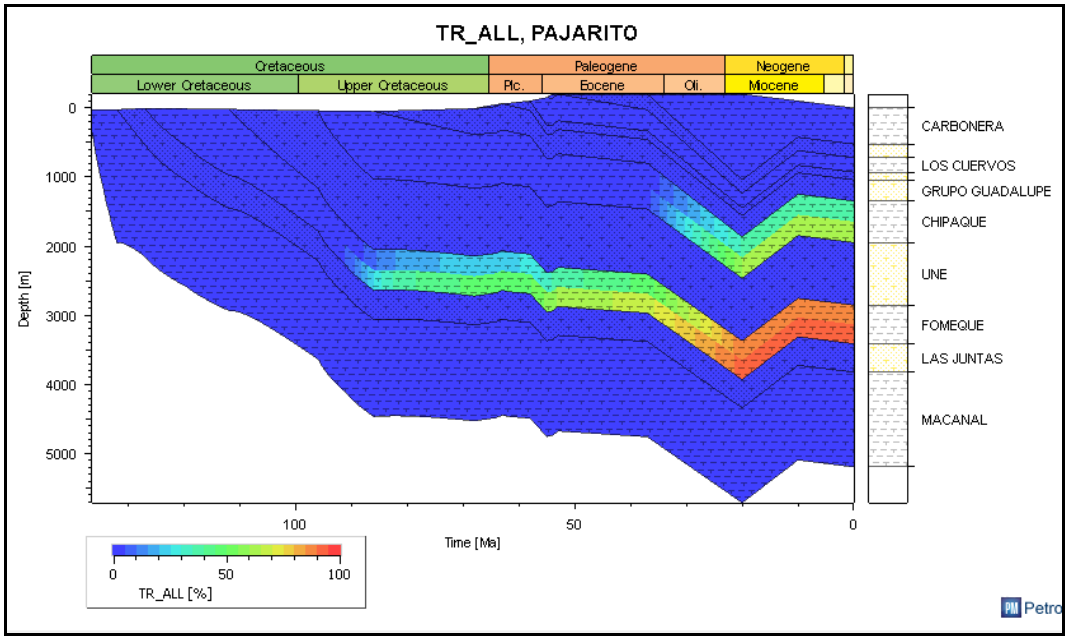
7.2 SECCIÓN CHIPAQUE PAJARITO

Figura 65. Calibración del modelo 2 (Formación Chipaque) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita. En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 1662m= 0.60, 1606m = 0.89, 1495m= 0.64, 1313m= 0.65, cuadro amarillo Ro Fomeque: 3017m= 1.31, tomado de pozo Golconda-1-compilados Nemcok-ICP.



La calibración del modelo se realizó con los datos de vitrinita que arrojaron los análisis de laboratorio (Ver Figura 65). Para la muestra AP-QAB-B245 se adquirió un Ro de 0.7 (ver anexo B); lo cual indica que sobre la Formación Chipaque se depositaron 3.7 Km de sedimentos. En los datos usados para la reconstrucción de la historia de subsidencia tenemos 2855 m de sedimentos; lo que indicaría un faltante de 845 m. Se observan 2 discordancias la primera entre los 68 Ma y 63 Ma donde se erosionaron 30 m de la Formación Chipaque[75]. La segunda 55-54 Ma se erodaron 60m de la Formación Barco, según Modelamiento geodinámico de Bayona[76]. A los 1035 m faltantes se descuentan los 90 m erodados y quedaría un faltante de 755m, lo cual indica que se encuentra erodada la Formación Guayabo y León por completo y parte de la Formación Carbonera.

Figura 66. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Chipaque (Sección Pajarito). Edad Vs Profundidad



[75] BAYONA, G., VALENCIA, A., MAHECHA, H., ACOSTA, D., VILLAMARIN, P., VILLAMIZAR, C, MORA, A., OJEDA, G., GAMBA, N., Enterramiento-Erosión-Levantamiento de dominios estructurales del Piedemonte norte, central y Llanos Sur integrando modelamiento flexural con datos de geoquímica y termocronología: Reporte interno de ECOPETROL S.A.-ICP. 2008a

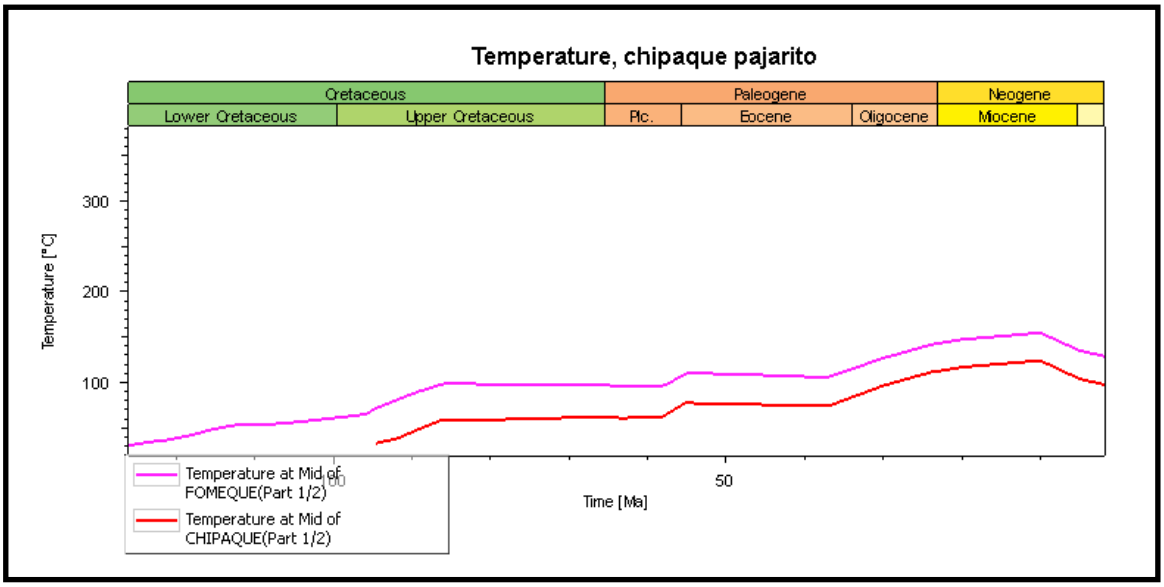
[76] Ibid

El modelo de transformación de la materia orgánica para la Formación Fómeque hacia el Piedemonte Llanero muestra que inició a los 89 Ma edad en la cual la transformación fue rápida, teniendo en cuenta que a los 69 Ma se había transformado el 44%. Durante el Paleoceno continúa la transformación llegando al 56% a los 55 Ma. El Máximo enterramiento se observa Entre los 51 y 37 Ma a 2916m, periodo en el cual se asume la máxima generación y expulsión de hidrocarburos por encontrarse en ventana de generación (120-127 °C y 0.8-1.2 %Ro). A los 36Ma la Formación Fomeque llegó al 70% de transformación de la materia ogánica. En esta edad la temperatura incrementa y los datos de Ro indican rocas en ventana de generación de gas.

La Formación Chipaque en el Pidemonte Llanero inicia la transformación de la materia orgánica a los 34Ma, lo cual coincide con el inicio del levantamiento de la Cordillera Oriental. Por lo cual los hidrocarburos que alcanzo a generar y expulsar, posiblemente so se entramparon en la Formación Guadalupe, la posibilidad es que pudieran migrar y encontrar trampas de cabalgamiento ubicadas en el Piedemonte Llanero. Parte del crudo se perdío por la exhumación.

Actualmente la Formación Chipaque se encuentra en ventana de generación al parecer por un sobreenterramiento debido a la depositación de nuevas Formaciones. La transformación de la material orgánica se encuentra en un 60% y un Ro de 0.9 – 1.0%.

Figura 67. Curva de Paleotemperatura de la Formación Chipaque y Formación Tibasosa (Sección Pajarito).

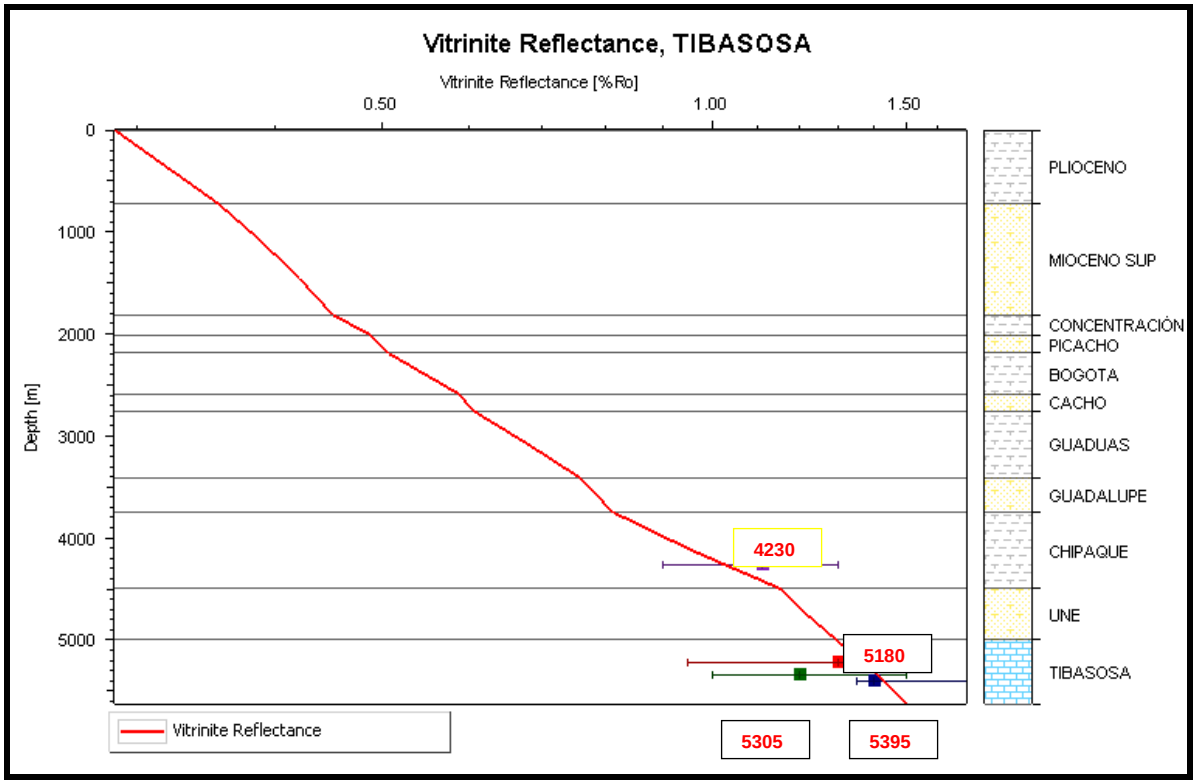


El modelo de temperatura Vs edad muestra que la Formación Fómeque alcanza su máxima temperatura 147 °C a los 24 Ma, en donde se observa su máximo enterramiento y capacidad de generación. Para el Cretácico Superior la formación alcanzó una temperatura de 120°C lo que indica valores de Ro entre 0.4 y 0.6% y enterramiento entre 2.3 y 2.7 Km (Ver Figura 65). Al iniciar el Paleoceno la temperatura alcanza los 129 °C y se mantiene hasta finales del Eoceno. Para esta edad inicia un aumento drástico en la temperatura de la Formación hasta llegar al Máximo. Actualmente se observan valores de 130 a 140 °C y Ro entre 1.4 y 1.3%. Lo que indicaría que se está produciendo posiblemente gas.

La temperatura de la Formación Chipaque en el área del Piedemonte llega a un máximo de 125 °C a los 20 Ma. Lo que indica una Formación que actualmente se encuentra en generación de hidrocarburos posiblemente con Ro entre 0.9 y 1.0 y un enterramiento mayor a 1600 m.

7.3 SECCIÓN TIBASOSA-MUNICIPIO DE CUCHE

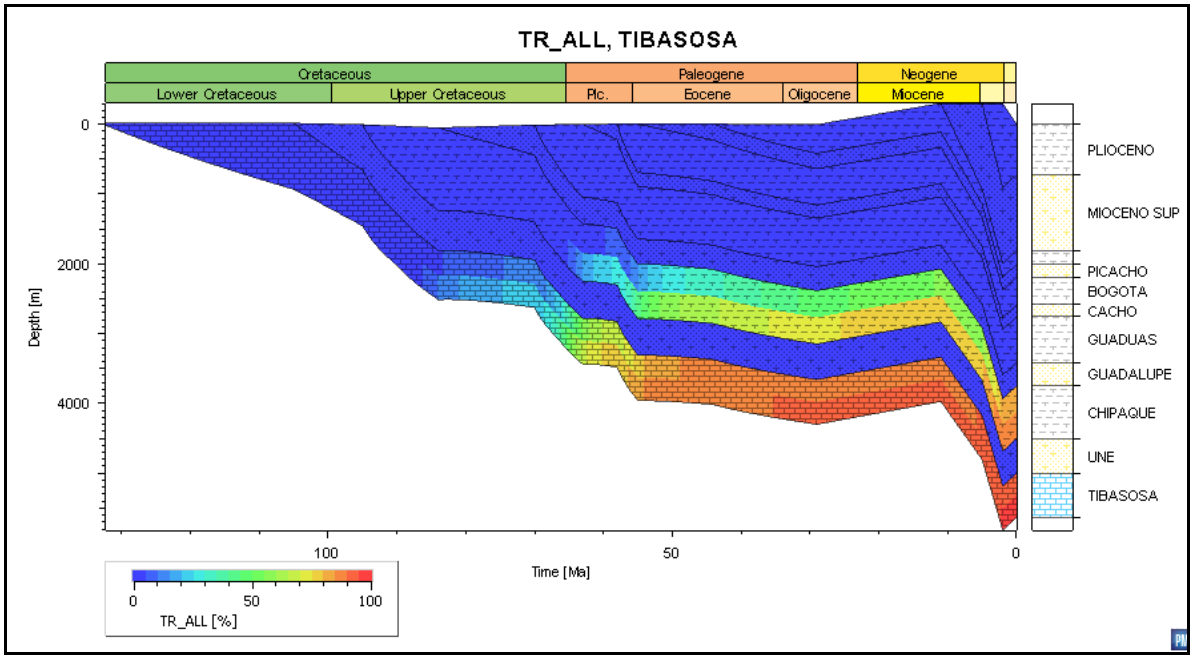
Figura 68. Calibración del modelo 3 (Formación Tibasosa, municipio de Cuche) con valores calculados de Reflectancia de Vitrinita. En la gráfica se observan los datos de Reflectancia de Vitrinita obtenidos de las muestras colectadas en campo. En cuadro negro se observan las profundidades a las que fueron tomadas y sus correspondientes valores de Ro son: 5395m= 1.41, 5305m = 1.2, 5180m= 1.3, En cuadro amarillo Ro Chipaque: 4230m= 1.12, tomado de Bayona et al., (2008a).



Los datos de reflectancia de vitrinita usados para calibrar el modelo se tomaron de los análisis de laboratorio realizados a las muestras obtenidas en campo. Para saber el espesor erodado de la sección se usó la muestra G2J-CC-14 con un Ro

de 1.31%, lo que indica que la Formación Tibasosa debió tener entre 4.7 y 5.7 Km de sedimentos sobre ella y debió pasar por una temperatura entre 135 y 168°C (Ver figura 68). Según la tabla 21 de datos para elaboración de subsidencia muestra 5180 m de sedimentos depositados, se observa un faltante de 520 m. Se determina erosión del plioceno. El dato de Ro para la Formación Chipaque se usó para calibrar el modelo y se obtuvo de Bayona[77].

Figura 69. Gráfico de transformación de la materia orgánica de la Formación Tibaosa (Sección Tibasosa). Edad Vs Profundidad



La Formación Tibasosa inicia la transformación de la materia orgánica a los 80 Ma en el Cretácico Inferior con un enterramiento de 2554 m. Para este momento solo se había depositado hasta la Formación Chipaque, lo que indica que posiblemente este crudo se acumuló en la Formación Une o posiblemente migro a las trampas estratigráficas de la Cuenca de Llanos Orientales.

[77] Ibid

A los 67 Ma se observa una transformación del 40% y la Formación sufre mayor enterramiento por carga de sedimentos; a los 62 Ma la Formación se encuentra a 3800 m de enterramiento y la transformación llega al 69%. El máximo enterramiento se observa a los 33Ma donde la Formación se encuentra a 4087m y la deformación empieza a dicha edad.

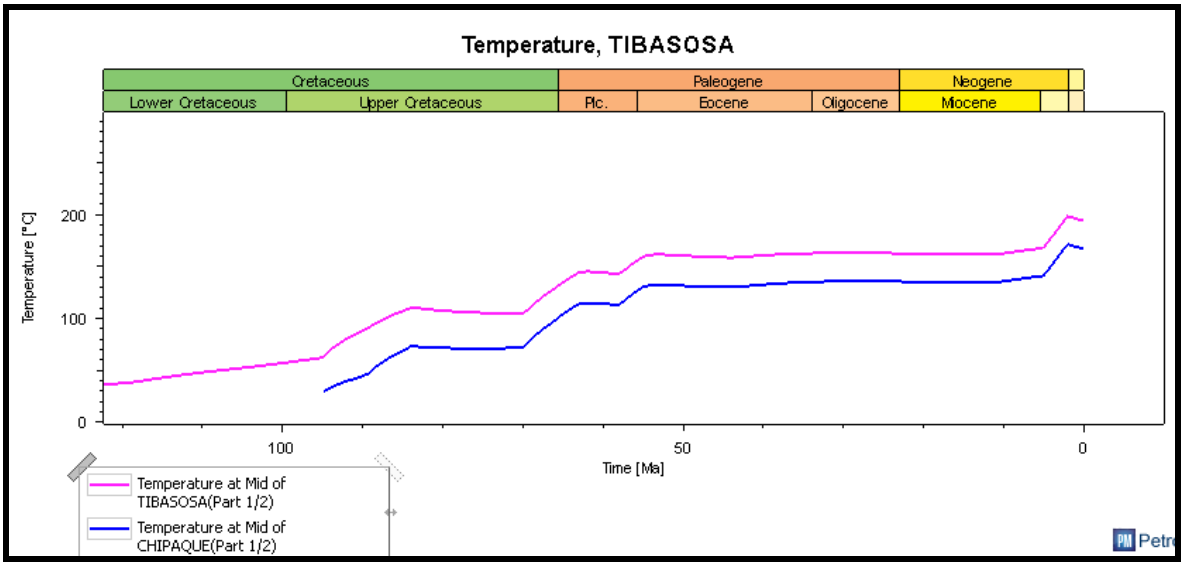
La transformación de la materia orgánica llega al 90%. Desde está edad la temperatura continúa aumentando y se observa levantamiento y erosión; Actualmente la Formación Tibasosa posiblemente es generadora de gas, puesto que los datos de reflectancia de vitrinita muestran valores altos en el presente.

Los datos de calibración para la Formación Chipaque se tomaron de la literatura existente. En este caso se tomó un Ro de 1.12 Bayona[78] para conocer la transformación de la materia orgánica de la Formación Chipaque al Noroccidente de la Cordilleta Oriental. La transformación inicia a los 62Ma con un 18% y es rápida; el máximo enterramiento se observa a 2860m (inicio del Paleozoico); a dicha profundidad la Formación está en ventana de generación y posiblemente fúe la edad de mayor generación y expulsión de hidrocarburos.

También, es el inicio de la acreción hacia el Este de la Cordillera, lo que posiblemente genero que el crudo no se entrampara en la Formación Guadalupe y que una parte migrara hacia las trampas de cabalgamiento existentes en el Piedemonte Llanero y otra no se entrampara.

[78] Ibid

Figura 70. Curva de Paleotemperatura de la Formación Tibasosa (Sección Tibasosa).



La temperatura de la Formación Tibasosa alcanza los 109 °C en el Cretácico Superior. En el Paleoceno Temprano se observa un ascenso hasta llegar a su máximo de 150°C a los 53 Ma. La Formación se continúa enterrando y la temperatura se mantiene entre los 150 y 147 °C hasta inicios del Mioceno; lo que indica que la Formación se encuentra en ventana de generación con un enterramiento entre 4000 y 4400m. El máximo enterramiento de la Formación se observa a los 32 Ma, 4400 m y Ro de 1.3%. Actualmente la temperatura se encuentra en 130°C y los datos de Reflectancia de Vitrinita entre 1.4 y 1.5% indican que la Formación no se encuentra en ventana de generación de hidrocarburos o probablemente se encuentra generando gas.

La paleotemperatura de la Formación Chipaque alcanza su máximo a 133°C a 54 Ma, una profundidad de 2624m y un Ro de 0.83%. Por estas condiciones se interpreta que a esta edad la Formación Chipaque generó la mayor cantidad de hidrocarburos para dicha sección de la Cordillera Oriental.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

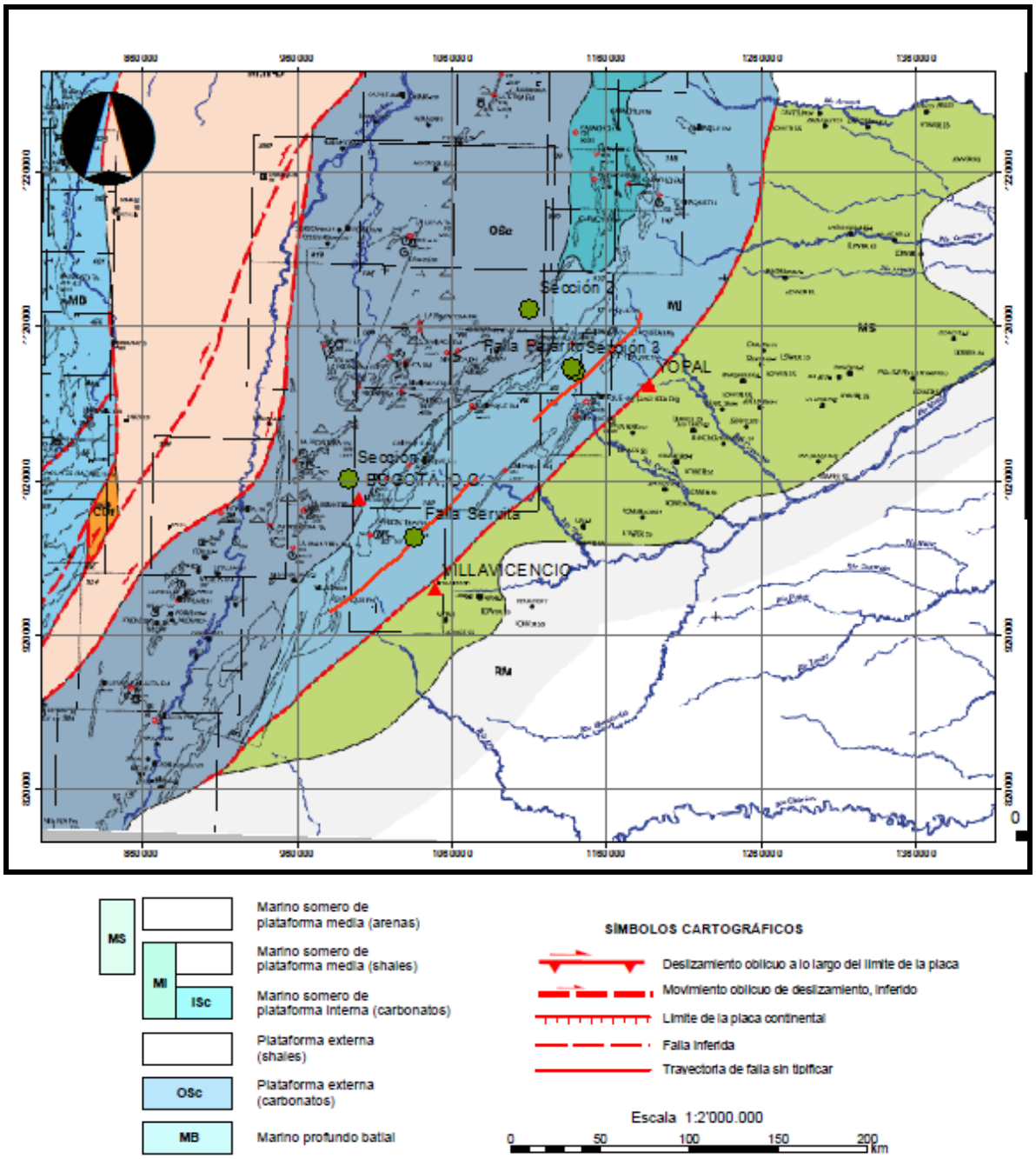
Los mapas Paleogeográficos presentados en este trabajo tienen restitución en tiempo en cuanto a las formaciones medidas y las fallas existentes de edad Turoniano. Se aporto arreglo y mejora en los contornos de plataforma marina somera y plataforma marina carbonatada en el mapa presentado por Caballero[79], e (Ingeominas). No se realizó restitución Palinspástica a las secciones usadas para hacer las correlaciones y posterior elaboración de los mapas anteriormente nombrados.

Las secciones y fallas medidas en este proyecto si presentan restitución a 90Ma.

El mapa paleogeográfico elaborado por (Ingeominas) para la edad Turoniano muestra una falla desde la actual Cuanca Caguan hasta la actual Cuenca de Catatumbo, en líneas discontinuas rojasque indica una falla inferida la cual al realizar la restitución en tiempo se observan únicamente dos tramos. Al Sur la Falla de Servitá y al Norte la Falla de Pajarito.

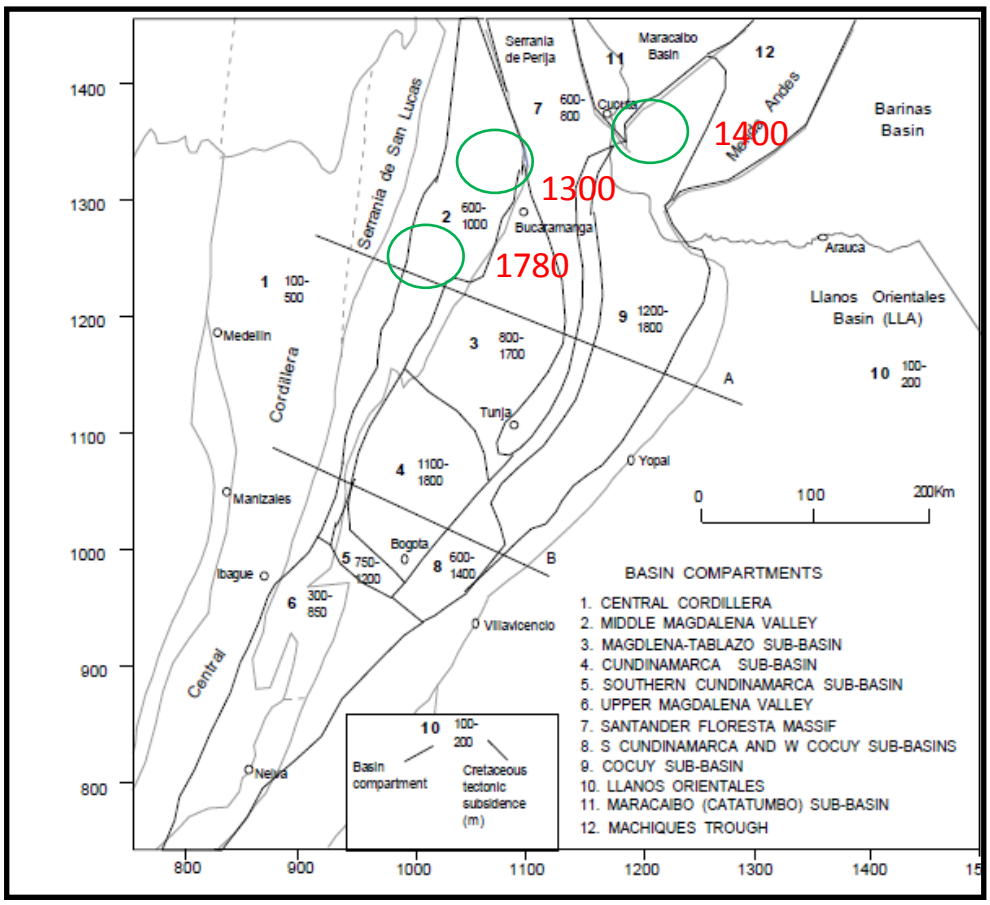
[79] CABALLERO VÍCTOR NARANJO DE LA PARRA QUINTERO MORA Op. Cit.

Figura 71. Mapa Paleogeográfico de edad Turoniano, tomado de (Ingeominas, 1996). Se observan los puntos restituidos a 90Ma de las secciones medidas y las falla existentes para esta edad.



Los coeficientes de estiramiento (β) de la corteza usados para calibrar los modelos 1D se hallaron corriendo modelos con tres valores permitidos para el espesor de la Corteza y tres valores para el espesor de la litosfera. Los modelos realizados por Sarmiento, utilizan un valor constante para espesor litosférico en 120000 m y una constante para el espesor cortical en 35000 m. Teniendo en cuenta que dichos valores varían para las diferentes zonas de la Cordillera Oriental los factores de estiramiento deben variar necesariamente en cada punto modelado. Se tomaron los modelos que más se justaran al modelo teórico y con estas combinaciones se calibraron los modelos 1D. En general el espesor litosférico se trabajó con 90000 m; el Cortical varía entre 27000 m y 32500 m. Por lo tanto se propone realizar nuevos modelos en otros puntos de control para determinar valores de coeficiente de estiramiento de la corteza, teniendo en cuenta la variabilidad de espesores tanto corticales como litosféricos.

Figura 72. Tomado de Sarmiento 2001, Mapa con factores de estiramiento hallados por Sarmiento, 2001 para compartimientos de la Cordillera Oriental. En rojo se indican los valores hallados en este trabajo.



- La sección al Sur Occidente de la Cuenca Cordillera Oriental (sección 1), hacia el Piedemonte llanero (Sección 3) y en la zona axial sobre el municipio de El Crucero (sección 2) muestran que la Formación Chipaque aumenta su espesor y contenido calcáreo hacia el Sur Occidente de la Cuenca Cordillera Oriental. Los análisis de Palinología indican que la formación Chipaque se depositó entre el Cenomaniano y el Campaniano Inferior; en un ambiente de depósito Marino Somero el cual se determinó por análisis de litofacies. Se debe realizar un campo más detallado para determinar los límites del área donde la Formación

Chipaque tiene un depósito de Plataforma Somera Carbonatada al Sur de la Cordillera Oriental

- Los análisis de subsidencia realizados muestran que para el Cretácico temprano en edad synrif la Cuenca Cordillera Oriental sufrió una rápida subsidencia que creó gran espacio de acomodación que permitió el depósito de gran cantidad de sedimentos de tipo marino y continental; los gráficos de enterramiento indican que la zona de mayor profundización fue el Sur de la cuenca en donde a los 134 Ma la cuenca se había profundizado hasta 2979 m y a final del Cretácico Superior llegó a los 6837m, para esta edad se presenta el evento de mayor inundación de la cuenca lo cual permite la depositación de la Formación Chipaque con estratos potentes de lutitas negras, magras y calizas negras con abundante contenido fósil.

- Las historias de enterramiento muestran el inicio del levantamiento y deformación de la Cuenca Cordillera Oriental. Para la sección en la zona Sur el levantamiento inicia a los 28 Ma cuando la Formación Chipaque había alcanzado un enterramiento de 3409m, en el Pidemonte la etapa de deformación inicia a los 33 Ma la Formación Chipaque tiene un enterramiento de 1255 m; el área de Tibasosa la deformación es más compleja y el levantamiento inicia a los 30 Ma.

- Los coeficientes de estiramiento (β) de la corteza definidos para cada sección indican que el mayor valor de estiramiento se ubica en la zona de Choachí (Cundinamarca) con β=1.62 en donde la subsidencia es mayor. Hacia el Piedemonte el factor hallado es β=1.57; lo que indica que hacia el Piedemonte Llanero la corteza sufrió menor estiramiento en el Cretácico que la zona Sur. El área del bloque colgante de la Falla de Soápaga sufrió un estiramiento de β=1.41. el menor estiramiento se dio en esta sección.

- Los análisis geoquímicos de Reflectancia de Vitrinita elaborados a las muestras seleccionadas de cada sección arrojaron valores que indican que la roca se encuentra sobremadura actualmente (valores entre 1.3 y 1.8) para las secciones 1 y sección 4; para la sección 3, se obtuvieron valores entre 0.6 – 1.0; lo que indica que la roca está madura y posiblemente en ventana de generación. Las Formaciones Chipaque y Tibasosa estuvieron en ventana de generación y alcanzaron el enterramiento necesario para generar y expulsar hidrocarburos.

- Los modelos 1D en PetroMod para conocer las temperaturas máximas a las que estuvieron sometidas las Formaciones Chipaque y Tibasosa indican que la sección Sur (sección 1) de la Formación Chipaque alcanza una temperatura máxima de 133°C a los 28 Ma, para este momento la formación se encontraba a 4461m de enterramiento y un Ro de 1.24%. lo que indica que para esta edad se había depositado hasta la Formación Usme y el levantamiento de la Cordillera Oriental estaba iniciando. La formación empezó a generar hidrocarburos a los 51 Ma cuando se había depositado hasta la Formación Cacho, probablemente estos hidrocarburos se entramparon en la Formación Guadalupe.

- La Formación Chipaque al Piedemonte (Sección 3), alcanza su máxima temperatura a los 20 Ma a 120°C y un Ro de 0.7 a 0.8. Dicha unidad se encuentra en ventana de generación en la actualidad e inició la transformación de la materia orgánica a los 34 Ma con valores de 0.5-0.7 de Ro y enterramiento de 1286m lo que indica que entra en ventana de generación a dicha edad. Los hidrocarburos que se generaron a esta edad posiblemente no se entramparon debido al levantamiento y periodos de erosión y depositación en la zona Este de la Cuenca Cordillera Oriental.

- La Formación Tibasosa en el municipio de Tibasosa (Sección 4) llegó a su máxima temperatura de generación a 133°C a los 64 Ma. El máximo enterramiento de la Formación se observa a 4400m. La transformación de la materia orgánica inició a los 80 Ma con un enterramiento de 3500m y un Ro de 0.72. Entró en ventana de generación y a los 83 Ma inició su expulsión. Para este momento la cantidad de sedimentos depositados sobre la formación no eran suficientes para que este hidrocarburo se entrampara. Probablemente dicho aceite no se depositó. Actualmente la formación se encuentra produciendo gas.

- Los crudos generados por la Formación Chipaque al Sur Occidente de la Cordillera oriental probablemente migraron radialmente y se depositaron en los actuales campos productores de Chicimene y Castilla; los crudos generados por la Formación Chipaque en el Pidemonte (Pajarito) probablemente migraron hacia el Sur Oriente de la Cuenca Llanos Orientales y se encuentran depositados en el actual campo productor de Rubiales. Los crudos producidos por la Formación Tibasosa al Nor Occidente de la Cordillera Orientas posiblemente fueron entrampados en la Formación Une en el momento en que se alcanzó la carga y enterramiento necesarios. Dichos hidrocarburos posiblemente se perdieron por la acción erosiva en esta zona de la Cordillera por la inversión de la Falla de Soápaga.

- Se sugiere realizar la medición de secciones sobre la Cordillera Oriental para realizar modelos 1D y 2D y conocer con más detalle las edades de transformación de materia orgánica de las rocas generadoras y definir áreas de posibles cocinas sobre la Cordillera y realizar análisis geoquímicos para obtener la relación crudo-roca y obtener las rutas de migración de los hidrocarburos hacia la Cuenca de Los Llanor Orientales, Rubiale, Chichimene, Acacias, Cusiana, Cupiagua y demás campos.

- Se sugiere realizar análisis geoquímicos de alta resolución a las muestras obtenidads en este trabajo para saber edades de las rocas y compararlos con las edades de los crudos extraidos de los diferentes campos productores y con ello saber la proveniencia de estos hidrocarburos.

- Se sugiere continuar con los puntos de control por medio de la medición de secciones estratigráficas de las Formaciones Tibasosa (Fomeque) y Chipaque, para con esto mejorar o generar nuevos mapas paleogeográficos con sus debidas restituciones en tiempo de deposito de las formaciones e integrar y mejorar con análisis de Bioestratigrafía.

BIBLIOGRAFÍA

ALZATE D., Juan C. & BUENO V., Mauricio: Análisis estratigráfico secuencial de las rocas cretácicas de la parte oriental del Departamento de Boyacá, Municipios de Sogamoso, Belencito y Aquitania. 1994

BALLESTEROS, I., AND NIVIA, A., La Formación Ritoque: Registro sedimentario de una albufera de comienzos del Cretácico. , in Laverde-Montaño, F.E.-S.a.F., ed., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIV, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 17 p. 1985

BAYONA, G., VALENCIA, A., & ORTIZ, J. Control de Subsidencia en el Flanco Este de la Oriental y Correlaciones Estratigráficas del Sector Sur de los Llanos Orientales. Informe Interno ICP. 2008.

BAYONA, G., VALENCIA, A., MAHECHA, H., ACOSTA, D., VILLAMARIN, P., VILLAMIZAR, C, MORA, A., OJEDA, G., GAMBA, N., Enterramiento-Erosión-Levantamiento de dominios estructurales del Piedemonte norte, central y Llanos Sur integrando modelamiento flexural con datos de geoquímica y termocronología: Reporte interno de ECOPETROL S.A.-ICP. 2008a

BAYONA, G., VILLAMARIN, P., MORA, A., OJEDA, G., CORTES, M., VALENCIA, A., MAHECHA, H., TORRES, V., Exploratory Implications of Forebulge Geometry and Migration in the Llanos Basin. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Memorias del X Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas, 10 p., in CD. 2009

CABALLERO VÍCTOR M., NARANJO J., DE LA PARRA F., QUINTERO I., MORA A., RODRIGUEZ G. Asistencia Técnica: Estudio de Unidades Reservorio Bloque CPO-09, Informe Final. Ecopetrol – Instituto Colombiano del Petróleo, Coordinación de Asistencias Técnicas Especializadas Exploración – CEC. 83 Pg. 2015.

CÁCERES, C., AND ETAYO-SERNA, F., Bosquejo geológico de la región del Tequendama, Opúsculo guía de la Excursión Pre-Congreso.: 1er Congreso Colombiano de Geología, Opúsculo, Bogotá, 23 p. 1969.

CARDOZO, E., AND RAMÍREZ, C., Ambientes de depósito de la Formación Rosablanca: Área de Villa de Leiva., in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIII, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 13 p. 1985

Cinemática de las Cuecas Subandinas, guía exploratoria de hidrocarburos en Piedemontes Andinos y Cuencas Intramontañas, Ecopetrol, 2012.

COLLETA, B., HEBRARD, F., LETOUZEY, J., WERNER, P., AND RUDKIEWICZ, J.L., Tectonic style and crustal structure of the eastern cordillera (Colombia) from a balanced cross-section, in J. Letouzey, ed., Petroleum and tectonics in mobile belts: proceedings of the 4th IFP Exploration and Production Research Conference., in Technip, E., ed.: Paris, p. 81-100. 1990

COLMENARES, F. Columnas estratigráficas en el Piedemonte Llanero para la BPColombia (solo información de columnas esquemáticas). 1993.

COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ÁLVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, S.H., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., 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, p. 1421–1443. 1995.

COVEY, M.C., AND DENGO, C.A., Structural evaluation of exploration leads in the Paz de Río and Tunja blocks, Eastern Cordillera, Colombia: Bogotá, Ecopetrol, 12535, Informe 2310. 1989

CUEVAS J. A., Análisis de subsidencia e historia térmica en la Cuenca de Sabinas, noreste de México. VOL. ASOC. MÉX. GEOL. PET.

Ecopetrol. Información de topes estratigráficos del Pozo Homero-1 (Informe interno). 2007

Ecopetrol. Modelos 1d de generación de hidrocarburos en la zona axial y flanco oriental de la cordillera oriental entre el páramo de sumapaz y paz del rio (Informe interno). 2008

FABRE, A., Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). In Laverde-Montaño, F.E.-S.a.F., ed., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter XIX, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 20 p. 1985a

FABRE, A., Tectonique et génération d'hydrocarbures: un modèle de l'évolution de la cordillère orientale de Colombie et du bassin des Llanos pendant le Crétacé et le teritaire.: Arch. Sc. Geneve, v. 40, p. 145-190. 1987

Farrell, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D.J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., SELF-TRAIL, J. M. & LAUTIER, J.C., Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock: Journal of Sedimentary Research, v. 82, p. 364-378. 2012

FÖLLMI, K.B., GARRISON, R.E., RAMIREZ, P.C., ZABRANO-ORTÍZ, KENNEDY, W.J., and LEHNER, B.L., Cyclic phosphate-rich successions in the Upper Cretaceous of Colombia.: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology., v. 93, p. 151-182. 1992

Geostratos – Petrobras. Cartografía Geológica del Bloque Tierra Negra 2003: Reporte Interno - Petrobras Colombia Ltda. 2003

Geostratos. Levantamiento estratigráfico y muestreo paleontológico, isotópico y geoquímico en las secciones de Chivor y Malacara, Boyacá, Colombia. Informe INGEOMINAS. 2005

GÓMEZ, E., Tectonic controls on the late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the middle Magdalena Valley basin, Eastern Cordillera and Llanos basin, Colombia.: New York, Cornell University. 2001

GUERRERO, J. & SARMIENTO, G. Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera – Geología Colombiana, n.20, p.3-66, 9 Figs., Bogotá. 1996

HEBRARD, F., Les foothills de la Cordillière Orientale de Colombie entre les rios Casanare et Cusiana. Evolution geodynamique depuis l´Eo Crétacé [Ph.D thesis]: Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 162 p. 1985

HOSSACK, J., MARTÍNEZ, J., ESTRADA, C., AND HERBERT, R., Structural evolution of the Llanos fold and thrust belt, Colombia., in McClay, K., ed., Thrust Tectonics 99 Meeting,, Royal Halloway University of London, April 26-29, June 1999, Program, London, p 110. 1999

HUBACH, E., Exploración en la región de Apulo-San Antonio-Viotá. Bol.Min. Petr., (27-27):41-60. Bucaramanga. 1931b.

Instituto de información geocientífica, minero ambiental y nuclear, Ingeominas, Geología de la plancha 266, Villavicencio. 2001

Instituto de información geocientífica, minero ambiental y nuclear, Ingeominas, Geología del cinturón esmeraldífero Oriental, planchas 210, 228 y 229. 2008

Instituto de información geocientífica, minero ambiental y nuclear, Ingeominas, Geología de la plancha 192 Laguna de Tota. 2001.

Instituto de información geocientífica, minero ambiental y nuclear, Ingeominas, Geología de la plancha 210-Guateque. 2010

Instituto de información geocientífica, minero ambiental y nuclear, Ingeominas, Mapa Geológico del departamento de Boyacá, Memoria explicativa. 2000

MARTINEZ, J. I. Microfósiles del Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas (Campaniano - Maastrichtiano) en la sección de Tausa, Cundinamarca, Colombia CT yF Vol.1, pp. 65-81. 1995

MENDOZA, H., La Formación Cumbre, modelo de transgresión marina rítmica, de comienzos del Cretácico. , in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter IX, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 17 p. 1985

MOJICA, J., KAMMER, A., AND UJUETA, G., El Jurásico del sector noroccidental de Suramérica y guía de la excursión al Valle Superior del Magdalena (Nov. 1-4/95), Regiones de Payandé y Prado, Departamento del Tolima, Colombia. , Geología Colombiana: Bogotá, 21 p. 1996

MONTOYA, D Y REYES, G. Geología de la Sabana de Bogotá. Memoria Explicativa. Ingeominas. 2005

MORA, A., Análisis estructural en la región ubicada entre La Sabana de Bogotá y La Cuenca Alta del Río Guatiquia, Flanco Oriental de la Cordillera Oriental, Tesis de pregrado, Universidad Nacional, Colombia. 1999

MORA, A. y KAMMER, A. Comparación de los estilos estructurales en la sección entre Bogotá y los Farallones de Medina, Cordillera Oriental de Colombia. Geología Colombiana No. 24, pp.55-82. 1999.

MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M.R., KAMMER, A., DIMATÉ, C., AND RODRÍGUEZ, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: Tectonics, v. 25, TC2010, doi: 10.1029/2005TC001854. 2006

MORA, A. Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia. PhD Thesis, Universit _t Potsdam, Potsdam. 2007

MORA, A., AND PARRA, M., the structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian Eastern Cordillera: Differences with other inversión related structures: CT&F—Ciencia Tecnologia y Futuro, v. 3, p. 7–21. 2008

MORENO, J.M., Stratigraphy of the Lower Cretaceous Rosablanca Formation, west flank, Eastern Cordillera, Colombia, Geología Colombiana: Bogotá, 17, p. 65-86. 1990a

MORENO, G., R. TERRAZA, D. MONTOYA, Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR): Boletín de Geología Vol. 31, N° 2. 2009

PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., and TORRES, V., ZEILINGER, G., and STRECKER, M.R., Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the northeastern Andes, Colombia: Basin Research, v. 22, doi: 10.1111/j.1365-2117.2009.00459.x. 2010

PARRA, M., MORA, A., SOBEL, E.R., STRECKER, M.R., and GONZALEZ, R., Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia: Tectonics, v. 28, TC4004, doi: 10.1029/2008TC002423. 2009b

PEPPER, A.S., and P.J. CORVI, Simple kinetic models of petroleum formation: Part-III Modelling an open system: Marine and Petroleum Geology, v.12, p. 417-452. 1995

PIMPIREV, C.T., PATARROYO, P., and SARMIENTO, G., Stratigraphy and facies analysis of the Caqueza Group, a sequence of Lower Cretaceous turbidites in the Cordillera Oriental of the Colombian Andes.: Geología Colombiana, Bogotá, v. 17, p. 297-308. 1992

PIRAQUIVE, A., J. S. DÍAZ, T. CUÉLLAR, G. ParDo & A. KAMMER, Reactivación Neógena de estructuras de rift del Cretácico Temprano asociadas con la Falla de Chámeza, Pajarito, Boyacá (Colombia): evidencias tectónicas y bioestratigráficas: Geología Colombiana, Edición Especial, 36 No. 1, pp 197-216. 2011

POLANÍA, J.H., and RODRÍGUEZ, O.C., Posibles turbiditas del Cretáceo Inferior (Miembro Socotá) en el área de Anapoima (Cundinamarca); una investigación sedimentológica basada en registros gráficos.: Geología Colombiana, Bogotá, v. 10, p. 87-91. 1978

RENZONI G. Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana N.5, pp.75-127. 1968

RUBIANO, J. L.,. Petrography and stratigraphy of the Villeta Group, Codillera Oriental, Colombia, South America. M.Sc. Thesis, Univ. South Carolina, Columbia, SC., 96 p. 1989

TORO, J., F. ROURE, N. BORDAS-LE FLOCH, S. Le Cornec-Lance, and W. Sassi, Thermal and kinematic evolution of the Eastern Cordillera fold and thrust belt, Colombia, in R. Swennen, F. Roure, and J. W. Granath, eds., Deformation, fluid flow, and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts: AAPG Hedberg Series, no. 1, p. 79– 115. 2004

SARMIENTO, G. Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. Boletín Geológico del Ingeominas, volumen 32, pp.3-44. 1992.

SARMIENTO, L.F., Stratigraphy of the Cordillera Oriental west of Bogotá, Colombia, M.Sc. Thesis: South Carolina, Columbia, University of South Carolina, 102 p. 1989

SARMIENTO-ROJAS, L, F., J.D. VAN WESS, S. CLOETINGH. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models.

SARMIENTO, L. Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion Hystory of the Eastern Cordillera, Colombia Andes. Inferences from Tectonic Models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam. 2001

SARMIENTO-ROJAS, L.F., WESS, J.D.V., and CLOETINGH, S., Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models.: Journal of South American Earth Sciences, v. 21, p. 383-411. 2006

PHILIP A. A., and J. R. ALLEN, Basin Analysis, principles and aplications. 1990.

PHILIP A. A., and J. R. ALLEN, Basin Analysis, principles and aplications. 2000.

RENZONI, G., Paleoambientes de la Formación Arcabuco y Cumbre de la Cordillera de Los Cobardes., in Etayo-Serna, F., and Laverde-Montaño, F., eds., Proyecto Cretácico, contribuciones. Chapter X, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16: Bogotá, 14 p. 1985c

ROLÓN, L.F., and CARRERO, M.M., Análisis estratigráfico de la sección Cretácica aflorante al oriente del anticlinal de Los Cobardes entre los Municipios de Guadalupe-Chima-Contratación, Departamento de Santander., Tesis pregrado Geología: Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 80 p. 1995

ULLOA, C., RODRIGUEZ, E. Geología de las planchas 170, Velez y 190, Chiquinquirá, Colombia. Ingeominas, informe No. 1794.

ULLOA, C. y RODRIGUEZ, E. Geología del cuadrángulo K-13, Tauramena. Ingeominas, informe 1706, 22 p. 1976.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E, FUQUEN, J. y ACOSTA, J. Memoria Explicativa de la Plancha 192 Laguna de Tota. INGEOMINAS. 2001.

VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectonogénesis de los Andes Colombianos: Boletín Geológico del Ingeominas vol. 6 n.1-3, pp 67-128. 1958.

VELOZA G., FAJARDO, M. de FREITAS and M. MANTILLA, Upper Cretaceous paleogeography and reservoir distribution in the Upper Magdalena Valley of Colombia: Hocol SA, Colombia.

VILLAMIL, T., Relative sea level, chronology, and a new sequence stratigraphy model for distal offshore facies, Albian to Santonian, Colombia. In: Pindell, J.A., Drake, C.D. (Eds.), Mesozoic-Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Evolution of the Caribbean Region/Northern South America: Implications for Eustasy from Exposed Sections of a Cretaceous-Eocene Passive Margin Setting. Geol. Soc.Amer. Memoir, paper C-8. 1993.

WATTS, A. B., KARNER, G. D. and STECKLER, M. S., Lithospheric flexure and the evolution of sedimentary basins. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 305: 249-281. 1982.

ANEXOS

ANEXO A. Litofacies e interpretación de ambientes de depósito (Medio magnético)

ANEXO B. Resultados de laboratorio (Geoquímica y palinología) (Medio magnético)

ANEXO C. Secciones estratigráficas (Medio magnético)