

**DISTRIBUCIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN PICACHO Y SU
CORRELACIÓN CON IMPREGNACIÓN DE BITUMEN EN EL BLOQUE
YACENTE DE LA FALLA DE SOAPAGA**

LAURA MILENA PEÑARANDA CAMARGO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**DISTRIBUCIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN PICACHO Y SU
CORRELACIÓN CON IMPREGNACIÓN DE BITUMEN EN EL BLOQUE
YACENTE DE LA FALLA DE SOAPAGA**

LAURA MILENA PEÑARANDA CAMARGO

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

Director:

VÍCTOR CABALLERO

MSc. Geología

Codirector:

GIOVANNY JIMÉNEZ DÍAZ

PhD., Geología

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

A los profesores que durante estos dos años de estudio nos compartieron sus conocimientos en los seminarios, en especial a el profesor Víctor Caballero y Giovanny Jiménez.

A los estudiantes de pregrado y mis compañeras por la colaboración y apoyo en el desarrollo de la etapa de campo.

Al instituto Colombiano de Petróleo en convenio con la Universidad Industrial de Santander por su soporte económico.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	22
1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	22
1.2 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL	22
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 FACIES.....	24
2.2 ASOCIACIÓN Y SUCESIÓN DE FACIES.....	27
2.3 CICLOS ESTRATIGRÁFICOS.....	28
2.4 AMBIENTES SEDIMENTARIOS.....	28
2.5 SISTEMAS FLUVIALES	29
2.5.1 Canales Fluviales.....	30
2.5.2 Depósito de desborde	31
2.6 PALEOCORRIENTES	33
2.7 DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO	34
3. ANTECEDENTES.....	38
3.1 LOCALIZACIÓN.....	38
3.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO	38
3.2.1 Formación Socha Inferior o Areniscas de Socha (Tpasi)	40
3.2.2 Formación Socha Superior o Arcillas de Socha (Tpars)	41
3.2.3 Formación Picacho (Tep).....	42
3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	45
4. METODOLOGÍA	47

4.1 FASE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	47
4.2 FASE CAMPO	47
4.2.1 Levantamiento de secciones estratigráficas y toma de muestras.	47
4.2.2 Distribución granulométrica.....	52
4.2.3 Petrografía	54
4.2.4 Palinología	54
4.2.5 Medición de Paleocorrientes.....	55
4.3 FASE DE LABORATORIO.....	56
4.3.1 Distribución granulométrica.....	56
4.3.2 Petrografía	57
4.3.3 Palinología	58
4.4 FASE DE OFICINA	59
4.4.1 Interpretación de facies y ciclos estratigráficos.....	59
4.4.2 Ambientes depositacionales	59
4.4.3 Paleocorrientes.	60
4.4.4 Palinología	60
5. RESULTADOS.....	62
5.1 ESTRATIGRAFÍA	62
5.1.1 Localidad Cerro El Uvo (LCEU)	62
5.1.2 Localidad Curva de Cosgua (LCC)	63
5.2 LOCALIDAD QUEBRADA HONDA.....	64
5.2.1 Localidad Playa Blanca.....	64
5.3 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	65
5.4 DISTRIBUCIÓN DE PALEOCORRIENTES:	75
5.5 PETROGRAFÍA DE LAS ARENISCAS.....	77
5.6 PALINOLOGÍA.....	83
6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	86
6.1 DEFINICIÓN DE EDAD DE LA FORMACIÓN PICACHO.....	86
6.2 DISTRIBUCIÓN DE FACIES E IMPREGNACIÓN	88
6.2.1 Impregnación	90

6.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE FACIES Y PROCEDENCIA	97
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFÍA.....	102
ANEXOS	110

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Ubicación de la áreas con potencial de arenas bituminosas en Colombia, (modificado, puntos rojos: áreas prospectivas, línea continua: delimitación de cuencas sedimentarias (el tamaño del círculo rojo corresponde al potencial de arenas bituminosas)).....	19
Figura 2. Zonas geomorfológicas en sistemas aluviales y fluviales	32
Figura 3. Tipos de ríos	33
Figura 4. Mapa geológico del área de Pesca a Sogamoso (Fm Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga) con las localización de los trabajos realizados y secciones levantadas este trabajo. LCC: Localidad Curva de Cosgua, LPC: Localidad Puente Cajones, LQH: Localidad Quebrada Honda, LPLB: Localidad Playa Blanca, LPR: Localidad Paz de Rio, LCEU: Localidad Cerro el Uvo, LPB: Localidad Peña Blanca.	39
Figura 5. Columna estratigráfica generalizada Formaciones Guaduas, Picacho y Grupo Socha, parte sur de Sogamoso.....	44
Figura 6. Diagrama estructuras principales de la zona de estudio. Falla de Soapaga, Sinclinal de Beteitiva y Falla Otenga	46
Figura 7. Formato de descripción para levantamiento de las columnas estratigráficas.....	49
Figura 8. Convenciones utilizadas en las columnas estratigráficas.	49
Figura 9. Localización secciones levantadas (LCEU, LCC, LQH, LPLB).....	50
Figura 10. Mapa de muestras para granulometría, sección delgada y palinología de Formación Picacho en bloque yacente de la Falla de Soapaga	53

Figura 11. Diagrama bivalente de desviación estándar gráfica vs. Promedio gráfico de las muestras Formación Picacho utilizando el diagrama de Friedman (1967); Miola & Weiser (1968)	72
Figura 12. Diagrama bivalente de oblicuidad gráfica contra desviación estándar gráfica de las muestras de la Formación Picacho utilizando el diagrama Friedman (1967).	73
Figura 13. Mapa de distribución de tamaño de grano de la Formación Picacho en bloque yacente de la Falla de Soapaga.....	74
Figura 14. Diagrama roseta indicando la posible dirección de flujo de los sedimentos de la Formación Picacho; la dirección preferencial es NE con algunas desviaciones hacia el NW y SE.	75
Figura 15. Mapa de distribución de paleocorrientes para cada sitio muestreado en la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.....	76
Figura 16. Clasificación composicional para las muestras analizadas bajo microscopía óptica, utilizando el diagrama QFL propuesto por Folk, (1974)	78
Figura 17. Diagrama triangular de Dickinson, clasificación fuente de aporte de sedimentos de la Formación Picacho	83
Figura 18. Gráfico de probabilidad de edades para las muestras COS-03-P, COS-04-P y QH-10-P, donde 0 es la menor probabilidad y 0.2 es la máxima probabilidad de la edad de la muestra	87
Figura 19. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Cerro el Uvo para la Formación Picacho donde se detallan las estructuras sedimentarias, intervalos con impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub-ambientes de depósito.	93
Figura 20. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Curva de Cosgua para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub -ambientes de depósito.....	94
Figura 21. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Quebrada Honda para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies ambientes y sub -ambientes de depósito.	95

Figura 22. Columna estratigráfica tipo de la localidad Playa Blanca para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub -ambientes de depósito.....	96
Figura 23. Modelo de distribución de facies, porcentaje de gravas, dirección de paleocorrientes, dirección del río (modificado de Bayona et al., 2013), espesores de impregnación, tamaño de arenas, ubicación del paleoalto en la Formación Picacho	99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Códigos universales de litofacies, A) códigos de textura, B) ejemplos de códigos, C) ejemplos de códigos de litofacies	26
Tabla 2. Tamaño de tamices con su respectivo término general	56
Tabla 3. Espesores totales para cada columna estratigráfica levantada, medida con bastón de Jacob y con poligonal	62
Tabla 4. Parámetros y datos estadísticos de textura de las muestras de acuerdo a Folk & Ward (1957) para muestras de areniscas de la Formación Picacho.	66
Tabla 5. Composición de las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho. Cm: cemento, Mx: matriz.	79
Tabla 6. Composición del armazón las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho. Qm: cuarzo monocrystalino, Ch: chert, Qp: cuarzo policristalino, Fpl: feldespato plagioclasa, Fk: feldespato potásico, Fi: feldespato indefinido, Lm: líticos metamórficos, Ls: líticos sedimentarios, Lp: líticos plutónicos, Lv: líticos volcánicos, Li: líticos indiferenciado, Ca: calcita, Min. Traza: minerales traza	80
Tabla 7. Rasgos texturales de las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho.	81
Tabla 8. Conteo palinoestratigráfico de las muestras tomadas en las localidades Quebrada Honda (QH) y Curva de Cosgua (COS).	84
Tabla 9. Identificación y descripción de litofacies y asociaciones de facies de la Formación Picacho (Nomenclatura de litofacies de acuerdo a Farrel, 2012).	88
Tabla 10. Sucesión de facies e interpretación de ambientes de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.	89
Tabla 11. Asociación de facies para las localidades levantadas.	90

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A. Columna estratigráfica Cerro el Uvo (LCEU) (Medio magnético)
- ANEXO B. Columna estratigráfica Curva de Cosgua (LCC) (Medio magnético)
- ANEXO C. Columna estratigráfica Quebrada Honda (LQH) (Medio magnético)
- ANEXO D. Columna estratigráfica Playa Blanca (LPLB) (Medio magnético)
- ANEXO E. Granulometría muestras (Medio magnético)
- ANEXO F. Código en R y Percentiles (Medio magnético)
- ANEXO G. Datos paleocorrientes (Medio magnético)
- ANEXO. H. Petrografía (Medio magnético)
- ANEXO I. Facies (Medio magnético)
- ANEXO J. Descripción de facies (Medio magnético)
- ANEXO K. Coordenadas (Medio magnético)

RESUMEN

TITULO: DISTRIBUCIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN PICACHO Y SU CORRELACIÓN CON IMPREGNACIÓN DE BITUMEN EN EL BLOQUE YACENTE DE LA FALLA DE SOAPAGA *

AUTOR: LAURA MILENA PEÑARANDA CAMARGO **

PALABRAS CLAVES: Análisis De Facies, Ambiente De Depositación, Formación Picacho, Paleocorrientes, Distribución Granulométrica, Impregnación.

DESCRIPCIÓN

Debido a la disminución en la producción y reservas en yacimientos convencionales, uno de los intereses de Ecopetrol en los últimos años ha sido evaluar, como estrategia para aumentar los recursos prospectivos de la empresa, zonas con potencial de hidrocarburos no convencionales. Una de estas zonas corresponde al área de Sogamoso, donde se ha reportado la presencia de arenas bituminosas en segmentos de la Formación Picacho sin ser claro aún los factores que controlan y restringen dichas acumulaciones. En este trabajo se llevó a cabo un estudio de la Formación Picacho aflorante en el bloque yacente de la Falla de Soapaga con el objetivo de establecer los posibles ambientes de acumulación que dieron origen a esta Formación, así como la posible relación entre la impregnación de hidrocarburos y la facies sedimentaria. Los resultados obtenidos sugieren que en el área de estudio, la Formación Picacho se depositó entre los 40 y 45 millones de años (Eoceno Medio) y que el ambiente que dio origen a los depósitos de esta formación corresponde a un sistema fluvial trenzado cuya área de aporte posiblemente se encontraba localizada hacia el sureste (SE) del área de depósito. La impregnación de hidrocarburos es baja hacia el sur del área de estudio y está concentrada en espesores menores a las 2 metros. Por su parte, hacia el norte la impregnación es media a alta y se concentra en espesores entre los 4 y 10 metros. Esta impregnación de la Formación Picacho se encuentra restringida a facies depositadas en canales fluviales de alto a medio régimen de flujo.

* Tesis de Mestría

** Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Geología. Director: MSc. Victor Caballero, Codirector: Ph.D. Giovanni Jimenez

SUMMARY

TITLE: FACIES DISTRIBUTION OF THE PICACHO FORMATION IN THE HANGING WALL OF THE SOAPAGA FAULT AND THEIR RELATION WITH OIL IMPREGNATION^{*}

AUTHOR: LAURA MILENA PEÑARANDA CAMARGO ^{**}

KEY WORDS: Facies Analysis, Environment Of Deposition, Picacho Formation, Paleocurrents, Granulometric Distribution, Oil Impregnation

DESCRIPTION

During the last years, the state oil company of Colombia (Ecopetrol S.A) has shown great interest in the exploration and potential of non-conventional resources as strategy of increasing their prospective resources. One of the focuses has been the Sogamoso area, where previous studies have shown the presence of tar sands in several intervals of the Picacho Formation. The factors that control such accumulations are still unknown as well as their distribution within the Formation. In this work, the Picacho Formation was studied in several outcrops located in the hanging wall of the Soapaga fault. The main objective of the study was to determinate the environment of the deposition of the Picacho Formation and the possible relationship between facies and oil impregnation observed on specific intervals of the Formation. According with the results, the Picacho Formation in the study area was deposited during the Middle Eocene (40-45 my) as a result of channel deposits in a braided fluvial system. The source of sediment was possible located toward de southeast (SE) of the study area. The impregnation is low in sections located at the south in thicknesses less than 2 meters. Sections located at the north, exhibits medium to high impregnation and is concentrated in thickness between 4 and 10 meters. The results of this study suggest that impregnation in the Formation Picacho is restricted to fluvial channels with medium to high flow regime.

^{*} Master Theses

^{**} Faculty of physicochemical Sciences. Geology School. Directress: MSc. Victor Caballero, Codirectress: Ph.D. Giovanni Jimenez

INTRODUCCIÓN

Debido a la disminución en la producción y falta de reservas en yacimientos convencionales, uno de los intereses de Ecopetrol en los últimos años ha sido el de evaluar el potencial de hidrocarburos no convencionales en diversas regiones de Colombia como estrategia para aumentar los recursos prospectivos de la empresa. Uno de estos recursos corresponde a las arenas bituminosas (también conocidas como arenas petrolíferas o arenas asfálticas), las cuales son mezclas viscosas de arena, arcilla, agua y una sustancia viscosa denominada bitumen¹ que ocurren naturalmente en determinadas regiones y son consideradas una fuente natural de hidrocarburos. El bitumen está compuesto principalmente por altos contenido de Carbón, en menor proporción Hidrogeno y unas pequeñas cantidades de metales como níquel, hierro y vanadio principalmente. Las arenas bituminosas están consideradas dentro del grupo de los crudos pesados y extrapesados, con densidades iguales o menores a 10⁻¹ API². Debido a su alta viscosidad (mayor a 10000 cP) es generalmente inmóvil en el reservorio y se requieren de diferentes técnicas para poder extraerlo.

Existe un acuerdo generalizado, que la mayoría de los crudos pesados y el bitumen natural, fueron originalmente expelidos de la roca generadora como crudos ligeros y migraron en esta condición hacia la trampa. Posteriormente, estas trampas se elevaron alcanzando la zona de oxidación, donde finalmente diferentes procesos (degradación bacteriana, evaporación y lavado por agua) convirtieron el crudo liviano en pesado³.

¹ CHILINGRAIN, G. bitumens, aspahalts and tar sands, Developments in petroleum science 7. Essevier scientific publishing company. Primera edición. .315p. 1978

² MEYER, M., ATTANASI, E., FREEMAN, A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world, U.S. geological Survey. 37p. 2007

³ Ibid

A nivel mundial y de acuerdo al USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) los recursos de bitumen (OOIP) ascienden a 5.5 billones de barriles y reservas de 651.000 millones de barriles⁴. De acuerdo a este estudio, las regiones con mayores reservas (total original oil in place in billion barrels) en orden descendente corresponden a Norte América (2391); Sur América (2260); Transcaucasia (430) y Rusia (347), con los depósitos más grandes concentrados en Canadá y Venezuela. Las reservas individuales de cada uno de estos países es igual o superior al total de reservas de petróleo convencional de todo el mundo.

Los estudios sobre la presencia de arenas bituminosas en el país son recientes y no se tienen cifras exactas de la cantidad de reservas⁵. En el año 2008, la firma Arthur D' Little realizó para la Agencia Nacional de Hidrocarburos, una investigación denominada "Opportunities and challenges for the development of unconventional hydrocarbon resource in Colombia" en la cual hace una valoración de áreas en Colombia con potencial de Hidrocarburos no Convencionales. En este estudio se presentan las áreas geográficas con mayor potencial, un análisis de los retos a mediano y largo plazo con recomendaciones para el desarrollo de este tipo de recursos y se describen algunas tecnologías de producción. En el tema específico de arenas bituminosas, el estudio de D'little⁶ identificó 5 áreas prospectivas (Figura 1) en Colombia, cuyas reservas acumuladas oscilan entre los 40 y 60 Gbbl (mil millones de barriles recuperables) de petróleo recuperables. Las mayores reservas se encuentran en las regiones de San Vicente y Florencia en el departamento de Caquetá. En el departamento del Meta se reportan depósitos en el Río Guejar y en el departamento de Santander se encuentran depósitos en el Río Nare. Finalmente, en el departamento de Boyacá, en el municipio de Sogamoso se encuentran manifestaciones de arenas

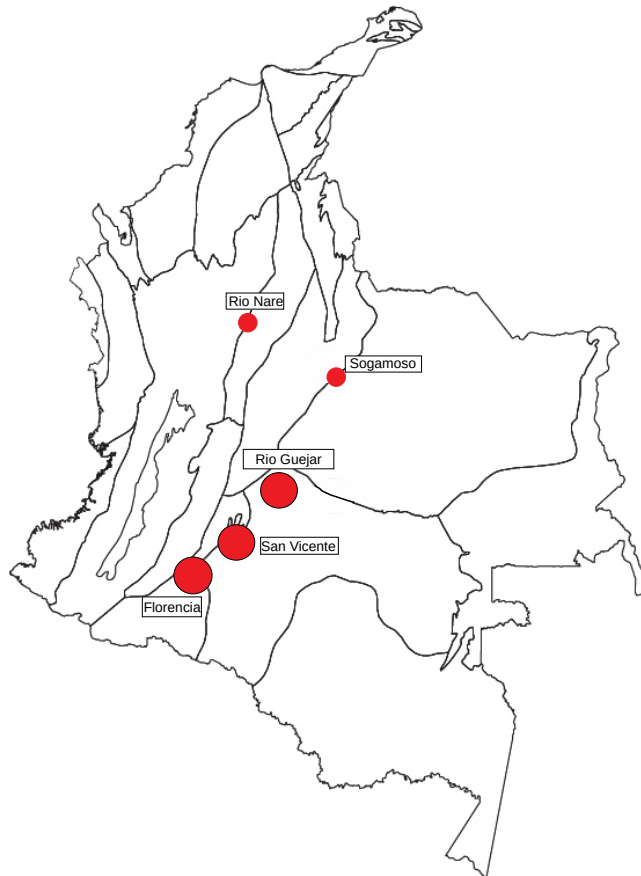
⁴ Ibid

⁵ ORTIZ, D., BRICEÑO, M. Caracterización de la cadena estratégica de valor para la explotación de arenas bituminosas en Colombia como fuente convencional de petróleo. Tesis pregrado Pontificia Universidad Javeriana. 135 p. 2009

⁶ D'LITTLE, ARTUR., Evaluación del Potencial de recursos de energía no convencional en Colombia. Reporte interno, ANH. 73-79p. 2008

bituminosa, las cuales son el objeto del presente estudio.

Figura 1. Ubicación de la áreas con potencial de arenas bituminosas en Colombia, (modificado, puntos rojos: áreas prospectivas, línea continua: delimitación de cuencas sedimentarias (el tamaño del círculo rojo corresponde al potencial de arenas bituminosas)).



En el área de Sogamoso y específicamente el área localizada en el bloque yacente de la Falla de Soapaga, de acuerdo con Ulloa⁷ se presentan areniscas bituminosas (areniscas impregnadas de aceite) que se restringen horizontal y

⁷ ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E.; FUQUEN, A.; Acosta, J. Geología de la plancha 192, laguna de tota, escala 1:100.000 Ingeominas, Bogotá, 50p 2001

verticalmente en la Formación Picacho de edad Eoceno. Los factores que controlan y restringen la distribución de bitumen en esta Formación son aún desconocidas y su entendimiento permitiría establecer estrategias de exploración y explotación.

Estudios realizados en la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, sugieren que existe una relación directa entre la facies y la saturación de hidrocarburos⁸, donde la facies con mayor saturación de hidrocarburos pesados son aquellas que presentan el menor contenido de lodo en la matriz y han sido depositadas en un bajo régimen de flujo en ambientes submareales.

En este estudio se investigó la distribución de facies de la Formación Picacho aflorante en el bloque yacente de la Falla de Soapaga con el objetivo de establecer si el contenido de bitumen presente en las areniscas que la componen está relacionado con un ambiente de depositación específico y/o un tipo particular de facies. Para tal fin, se realizó el levantamiento estratigráfico de cuatro secciones de superficie correspondiente a 383 metros de columna, se tomaron 87 muestras para análisis de tamaño de grano mediante tamices, 21 muestras para estudio petrográfico de secciones delgadas, 10 muestras para análisis palinológicos y se tomaron aproximadamente 400 mediciones de paleocorrientes. Con toda esta información, se logró determinar la distribución espacial de facies y tamaño de grano de esta unidad, la clasificación composicional de sus areniscas, se interpretó su posible ambiente de depósito y se establecieron las posibles direcciones de flujo que dieron origen a su depósito.

Los resultados obtenidos sugieren que hacia el sur del área de estudio, las areniscas de la Formación Picacho corresponden principalmente a sublitoarenitas, de tamaño de grano grueso, mientras que hacia el norte, corresponden a

⁸ CABALLERO, M., Modelo Sedimentológico de la Cuenca Llanos Sur, Ecopetrol S.A. ICP, Presentaciones internas Grupo del proyecto Nuevas Tecnologías para la evaluación del potencial de crudos pesados en la cuenca Llanos Sur. 2013

cuarzoarenitas de tamaño de grano fino. La dirección preferencial de flujo, determinada a partir de los datos de paleocorrientes, evidencian una dirección de flujo preferencial NE con algunas variaciones que podrían indicar cambios locales en la dirección la corriente. En cuanto a la impregnación de bitumen (arenas bituminosas), esta es mayor hacia la parte norte del área de estudio y se encuentra restringida a capas de poco espesor dentro de la Formación Picacho.

1. OBJETIVOS

1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Existe alguna relación entre facies, asociación de facies y la impregnación de bitumen presente en la Formación Picacho aflorante el bloque yacente de la Falla de Soapaga?

1.2 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Cuál es la sucesión de facies en la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga?
- ¿Cuáles son los ambientes de depositación de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga?
- ¿Cuál es la distribución de la facies asociadas en la Formación Picacho situadas en el bloque yacente de la Falla de Soapaga?

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

Establecer la distribución de facies de la Formación Picacho en 4 localidades en el bloque yacente de la Falla de Soapaga y determinar si existe alguna relación con la impregnación de bitumen presente en los sedimentos de esta Formación.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la distribución geográfica de facies mediante su identificación y su sucesión en las rocas de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.
- Caracterizar los ambientes y sub-ambientes de depósito de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.
- Establecer un modelo de distribución de facies para la Formación Picacho aflorante en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 FACIES

Este término hace referencia a unidades estratigráficas que se distinguen por presentar características litológicas (textura, composición), estructurales (estructuras sedimentarias) y orgánicas (fósiles) detectables en campo⁹. La anterior definición implica que la facies sedimentaria es una propiedad de los paquetes de roca que debido a propiedades físicas, químicas y biológicas de los ambientes donde ocurrió su depósito, hereda una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas que reflejan la historia de su depositación¹⁰. Existen diferentes tipos de facies, entre las más comunes están las Litofacies que hacen referencia al conjunto de características físicas como color, litología, textura y estructuras sedimentarias; las Biofacies definidas con base a su contenido fósil y las Icnofacies que se definen de acuerdo a los trazas fósiles (icnofósiles) presentes. La variedad de ambientes de depósito ha hecho que se propongan diferentes sistemas de clasificación específicos para cada ambiente (ej: Bouma¹¹ Miall¹²) y en algunos casos clasificaciones separadas para cada subambiente. Una estandarización de los códigos facies permitiría que los principios que rigen los procesos sedimentológicos sean aplicados consistentemente a secuencias sedimentarias composicionalmente variables¹³ (. La nomenclatura estandarizada

⁹ BLATT, H., & MIDDLETON, G. M. R. Origin of Sedimentary Rocks. New Jersey, Prentice Hall. 782p. 1980

¹⁰ BOGGS, S. Principles of sedimentology and stratigraphy: Merrill. Columbus, Ohio, 784p 1987

¹¹ BOUMA, A. H., KUENEN, P. H., & SHEPARD, F. P. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier. 168 p. 1962

¹² MIALL, A. D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits: Earth- science Reviews v.22, 1-23p. 1985

¹³ FARRELL, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D. J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., ... & LAUTIER, J. C. Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock. Journal of Sedimentary Research, 82(6), 364-378. 2012

de códigos de litofacies propuesta por Farrel¹⁴ cumple este objetivo y puede ser utilizada universalmente en cualquier tipo de ambiente de depósito. Está definida con base a la textura y atributos más importantes con el uso opcional de prefijos que definen la composición y cementación y un sufijo que define la fábrica. En el caso de la textura, en la tabla 1 se presentan todos los tipos de textura con las posibles combinaciones de porcentaje de grava, arena y limo. Cada textura tiene su respectivo código y generalmente está acompañada por uno o dos atributos (Tabla 1). Una de las ventajas de esta clasificación es que es posible usarla tanto en secuencias simples (relativamente homogéneas) como en secuencias complejas (heterolíticas). En el caso de litologías heterolíticas, se utiliza el símbolo de barra inclinada (/) para separar dos códigos texturales, en donde la primera litología es la predominante. Por ejemplo, una arenisca con estratificación ondulosa intercalada con limo se representa como S/M_w. Dependiendo de la litología que se esté describiendo, puede ser de gran utilidad utilizar un código que haga referencia a la composición y que permita por ejemplo diferenciar litologías predominantemente siliciclasticas, bioclásticas, glauco-fosfaticas, y/o lignito-carbonosas¹⁵. Un código de litofacies que no presente un prefijo, como por ejemplo sG_x (arenisca-conglomeratica con estratificación cruzada) inmediatamente se interpreta como siliciclastica. Si el código lleva un prefijo, como por ejemplo mxd (pe: mxd sG_x) representa la misma arenisca conglomeratica pero compuesta por una mezcla de granos siliciclasticos y bioclásticos. Si el prefijo que precede al código es bio (pe: bio sG_x) significa que es la misma arenisca conglomeratica pero incluye en su composición más de un 70% de bioclastos. También es posible incluir dentro del código de facies un atributo que hace referencia a la cementación y que permite diferenciar sedimentos no consolidados de rocas solidas o cementadas. Cuando la roca es cementada se agrega el prefijo cem al código de la litofacies. Por ejemplo, una arenisca conglomeratica de bioclastos cementada se representa como: cem bio sG_x. Finalmente, es posible adicionar un código a

¹⁴ Ibid

¹⁵ Ibid

manera de sufijo, que hace referencia a la fábrica y especialmente cuando la roca es una mezcla de diferentes tamaños de grano (grava, arenisca y limo). La fábrica incluye cuatro categorías: clasto-soportada (c); matriz soportada (m); clasto/matriz soportada (c/m) e indeterminada (n). Por ejemplo un conglomerado areno-limoso (C:A:L = 20:50:30), matriz soportado y compuesto de bioclastos y siliciclastos se representaría por el código: mxd gmS_b – m.

Tabla 1. Códigos universales de litofacies, A) códigos de textura, B) ejemplos de códigos, C) ejemplos de códigos de litofacies

Textura		Atributos		Ejemplos de códigos de litofacies	
Código	Descripción	Código	Descripción	código	Descripción
G	grava	m	macizo	sG,gr	grava,arenosa,gradacional
sG	grava,arenosa	biot	bioturbado	msG,ch	capas,cahoticas,de,grava,areno,lodosa
mG	grava,lodosa	b	madrigeura	(s)G,mot	moteado,de,grava,levemente,arenosa
smG	grava,lodo,arenosa	lam	laminada		
msG	grava,areno,lodosa	b8am	madriguera,laminada	Sm	areniscas,macizas
S	arenisca	l	capa,lenticular	S,biot	arenisca,bioturbadas
mS	arenisca,lodosa	w	capa,ondulosa	Sx	areniscas,con,estratificacion,cruzada
gS	arenisca,gravosa	f	capa,flaser	Sb	areniscas,con,madrigueras
gmS	arenisca,lodosa,gravosa	gr	gradación	S,r8am	areniscas,con,laminacion,rizada
mgS	arenisca,gravosa,arenosa	x	estratificación,cruzada		
M	lodolita	con	convoluta	(m)S,f	capas,flaser,de,areniscas,ligeramente,lodosa
sM	lodolita,arenosa	s	remolino	mS,b	areniscas,lodosas,con,madrigueras
gM	lodolita,gravosa	r	rizado		
gsM	lodolita,arena,gravosa	r8am	laminación,ondulosa	Mlam	lodolita,laminada
sgM	lodolita,gravo,arenosa	org	restos,vegetales	(s)M,l	capa,lenticular,de,lodolita,ligeramente,arenosa
(g)	ligeramente,gravosa	mot	moteada	sM,b	lodolitas,arenosas,con,madriguera
(s)	ligeramente,arenosa	rt,8mor	raiz,moteada		
(m)	ligeramente,lodosa	bnd	bandeado	Estratos heterolíticos	
©	ligeramente,arcillosa	cem	cementado	G/S	intercalación,grava,y,areniscas,dominando,las,gravas
(z)	ligeramente,limosa	lig	lignito	S/G	intercalación,areniscas,y,gravas,dominando,las,areniscas
ot	otros			S/M,w	capas,ondulosas,de,intercalacion,de,areniscas,y,lodolitas
C	arcillolita			M/S,l	capas,lenticulares,de,intercalacion,lodolita,y,areniscas
Z	limolita			M/G	intercalación,de,lodolitas,y,conglomerados,dominando,las,lodolitas

Fuente: FARRELL, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D. J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., ... & LAUTIER, J. C. Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock. *Journal of Sedimentary Research*, 82(6), 364-378. 2012

2.2 ASOCIACIÓN Y SUCESIÓN DE FACIES

La ley de Walther explica que las facies que ocurren en sucesiones verticales también ocurrieron en ambientes lateralmente adyacentes al momento del depósito¹⁶ o como es descrito por Nichols¹⁷ si una facies se encuentra sobreimpuesta a otra en una sucesión estratigráfica, estas dos facies debieron depositarse adyacente una a la otra en un determinado tiempo si entre ellas no existe una traslocación o ausencia de facies. Este principio se cumple siempre y cuando no existan faltantes de registro como discordancias. Las características de cada ambiente de depósito están dictaminadas por una combinación de procesos¹⁸ y las facies producidas por estos procesos se conocen como asociación de facies. Este término hace referencia a un grupo de facies que se encuentran genéticamente relacionadas y que en conjunto reflejan un ambiente de depósito. El análisis de una sucesión de facies involucra dos procesos¹⁹. Primero, el reconocimiento de las facies que pueden ser interpretadas en términos de los procesos que las produjeron y en el segundo las facies son agrupadas en asociaciones de manera que reflejen una combinación de procesos y por lo tanto de ambientes de depósito. Cuando en una asociación de facies, cada una ocurre en un orden particular, se conoce como sucesión de facies o secuencia de facies²⁰ y esto pasa cuando hay una repetición de una serie de procesos como respuesta a cambios regulares en las condiciones del ambiente²¹. Este concepto implica que ciertas propiedades de las facies, como por ejemplo la proporción de arena, el grado de bioturbación o el tamaño de grano entre otras, cambien progresivamente

¹⁶ MIDDLETON, G. V. Johannes Walther's law of the correlation of facies. Geological Society of America Bulletin, 84(3), 979-988p. 1973

¹⁷ NICHOLS, G., Sedimentology and stratigraphy, Willey-balckwell, 432 p. 2009

¹⁸ WALKER, R. G., & JAMES, N. P. (Eds.). Facies models: response to sea level change. Ontario: Geological Association of Canada. 780p. 1992

¹⁹ D. ZERVAS, G.J. NICHOLS, R. HALL, H.R. SMYTH, C. LÜTHJE AND F. MURTAGH, Computers & Geosciences, SedLog, 35, 2151-2159, Disponible en: <http://www.sedlog.com>. 2009

²⁰ READING, H. G., & LEVELL, B. K. Controls on the sedimentary rock record. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy, 36p. 1996

²¹ D. ZERVAS. NICHOLS. HALL, SMYTH, LÜTHJE AND MURTAGH, Op. Cit.

en un sentido específico (lateramente o verticalmente), entre estas sobresalen las secesiones grano y estrato crecientes o decrecientes²².

2.3 CICLOS ESTRATIGRÁFICOS

Los ciclos estratigráficos observados en una secuencia estratigráfica son el producto de cambios unidireccionales en el nivel base hacia máximos o hacia mínimos espacio de acomodación contra suministro de sedimentos A/S . a medida que el nivel base aumenta la acomodación se incrementa y se genera nuevo espacio hacia el continente, esto, a su vez, aumenta la capacidad total de almacenamiento dentro de la cuenca donde antes predominaba el bypass o erosión.²³

2.4 AMBIENTES SEDIMENTARIOS

Las condiciones físicas, químicas y biológicas bajo las cuales un sedimento se acumula se conocen como ambiente sedimentario²⁴. La integración de todas estas condiciones en un espacio particular durante el depósito de sedimentos, produce cuerpos de roca con propiedades texturales, composicionales y estructurales particulares²⁵. En este sentido, cada ambiente de depósito posee una combinación

²² WALKER, & JAMES Op. Cit.

²³ RAMON, J. C., & CROSS, T. A Correlation strategies and methods in continental strata, Middle Magdalena Basin, Colombia. Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden. 1997

²⁴ KRUMBEIN, W. C., & SLOSS, L. L. Stratigraphy and sedimentatio, San Francisco: Freeman. 660p. 1963

²⁵ SHEPARD, F. P., & MOORE, D. G. Central Texas Coast Sedimentation: Characteristics of Sedimentary Environment, Recent History, and Diagenesis: PART 2. AAPG Bulletin, 39(8), 1463-1593p. 1955

única de procesos y por lo tanto el producto de estos procesos (las rocas sedimentarias) también poseen una asociación única de características que los hacen diferenciables entre sí ²⁶ . En términos generales, los ambientes sedimentarios son clasificados en categorías “mayores” como por ejemplo delta, estuario, línea de costa, fluvial, etc. y estos a su vez son divididos en subcategorías: delta dominado por marea, delta dominado por río, llanuras de inundación, etc. De acuerdo a estudios realizados en la Formación Picacho, esta se depositó en un sistema fluvial. De acuerdo a Saylor²⁷ se depositó en un sistema de ríos trenzados (braided fluvial), mientras que Pardo & Roche²⁸ interpretan la Fm. Picacho como depósitos fluviales dominados por areniscas gravosas.

2.5 SISTEMAS FLUVIALES

Los sistemas fluviales actúan como el mecanismo principal de transporte de detritos, llevándolos de las áreas montañosas hacia lagos y océanos donde finalmente la mayoría del sedimento clástico es depositado. Estos sistemas también pueden actuar como ambiente de depósito, acumulando sedimentos dentro de los canales y en las llanuras de inundación. Esencialmente tres zonas geomorfológicas pueden ser reconocidas en los sistemas fluviales (Figura 1). En la zona de erosión, las corrientes cortan y remueven material rocoso del suelo de los valles y lo transportan por medio de las corrientes; en la zona de transferencia, la pendiente es mucho más baja y las corrientes ya no producen erosión sino que simplemente transportan el material rocoso; finalmente en la zona de depósito, el sedimento es depositado en los canales del río, en las llanuras de inundación o en

²⁶ D. ZERVAS, NICHOLS, HALL, SMYTH, LÜTHJE AND. MURTAGH, Op. Cit

²⁷ SAYLOR, J. E., HORTON, B. K., NIE, J., CORREDOR, J., & MORA, A. Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia. Basin Research, 23(4), 377-402p. 2011

²⁸ PARDO, A. & ROCHE, E. Stratigraphy, palinology and paleofacies of the lower Tertiary rocks from the Paz de río region (Chicamocha river valley, Eastern cordillera, Colombia. 34p. 2009

los abanicos aluviales. En un ambiente fluvial el agua esta confinada a los canales, los cuales son depresiones profundas de la superficie terrestre que confinan el flujo de agua. Por su parte, las llanuras de inundación son áreas de tierras localizadas afuera de los canales o entre los canales que únicamente reciben agua cuando el rio inunda o se desborda.

2.5.1 Canales Fluviales. En términos generales, existen tres características que permiten definir la forma de los canales de los ríos (Figura 3)²⁹. El primer aspecto hace referencia a que tan recto o sinuoso es el canal; el segundo a la presencia o ausencia de barras de arena o conglomerados dentro del canal y el tercero al número de canales separados que presenta el rio. De esta manera, es posible definir tres tipos principales de canales, los cuales deben ser vistos como miembros extremos de un continuo de formas.

- Canales trenzados (braided): son un tipo de rio que transportan una alta proporción de sedimentos principalmente por mecanismo de saltación y rodamiento. En las áreas donde los sedimentos son finalmente depositados se forman barras que hacen que el flujo del canal se dividida y den origen a una forma trenzada³⁰. Generalmente, las barras están compuestas de arenas, gravas o una mezcla de ambas y pueden variar en forma y tamaño. Las barras longitudinales son elongadas a lo largo del eje del canal, mientras que las barras transversales son más anchas que largas y se distribuyen a través del canal. De acuerdo a Nichols³¹, un típica secuencia formada por el depósito de un sistema fluvial trenzado corresponde a una sucesión granodecreciente; hacia la base una superficie erosiva representa la base del canal y es suprayacida por un capa de material grueso que representa el depósito en el suelo del canal. Los depósitos de las barras están representados por sets de gránulos y guijos

²⁹ D. ZERVAS, NICHOLS, HALL, SMYTH, LÜTHJE AND MURTAGH Op. Cit

³⁰ Ibid

³¹ Ibid

con estratificación cruzada. Finalmente, cuando la barra está inactiva o no hay más movimiento se deposita hacia el techo una secuencia de arenas fina o limo.

- Canales meandriformes (meandering): los meandros se desarrollan por la erosión de uno de los bancos del río y depositación en lado opuesto³². Esta característica, hace que los canales migren lateralmente y formen depósitos en la parte interna denominados barras puntuales (point bar). Estos ríos transportan y depositan principalmente una mezcla de carga de fondo y carga en suspensión. La carga de fondo es transportada por el flujo y con el material más grueso arrastrado por la parte más profunda del canal. De acuerdo a Nichols³³, los depósitos de point bar son secuencias granodecrecientes (material grueso a la base y fino al tope) con estratificación cruzada de gran escala hacia la base y sets de laminación cruzada hacia el tope. Cuando el canal migra, la parte superior del point bar es cubierta por depósitos de inundación.

2.5.2 Depósito de desborde. Cuando la descarga que transporta un río excede la capacidad de su canal, el flujo se desborda y forma los depósitos de desborde o llanuras de inundación³⁴.

La mayoría del sedimento en este ambiente corresponde a carga en suspensión, principalmente arcilla, limo y arena fina. De acuerdo a Miall³⁵ es posible clasificar en tres grandes grupos los depósitos de desborde. Los primeros son los depósitos de material relativamente grueso formados por el desborde del material que es transportado como carga de fondo y denominados levee, crevasse-channel y crevasse splay. Los segundos corresponden a depósito de material fino formados en ambientes de muy baja energía y que generalmente son de muy corta

³² MIALL, A. D. The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. 4th corrected printing. Springer. 599p. 2006

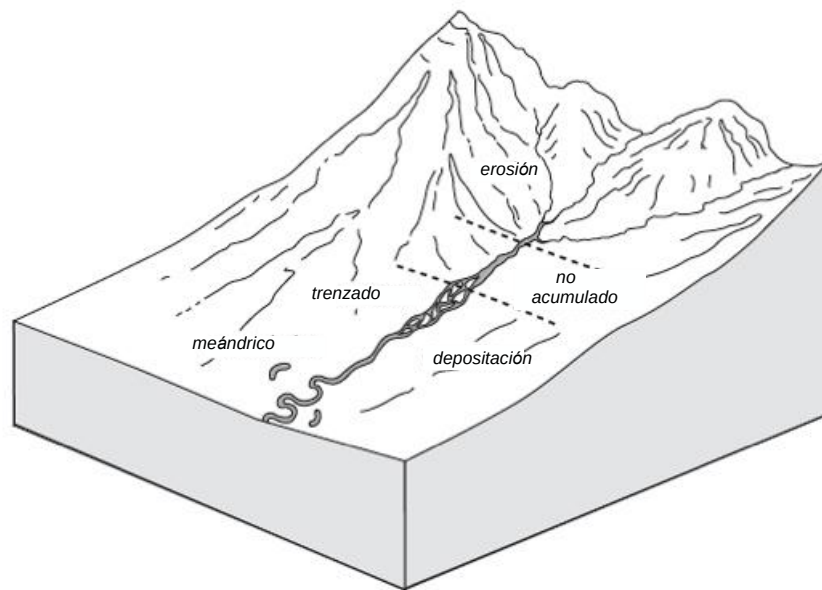
³³ Ibid

³⁴ Ibid

³⁵ MIALL, Op. Cit

duración, denominados ephemeral shhet floods y flooplain ponds. Y finalmente los sedimentos bioquímicos formados por pedogensis, evaporación o actividad orgánica. De acuerdo a Nichols³⁶ las principales estructuras observadas en depósitos de desborde corresponden a: capas delgadas a muy delgadas con gradación normal de arena a limo; evidencia de inicio de flujos rápidos (representados por laminación plana paralela) acompañados por evidencia de rápida depositacion (laminación ondulosa); laminas delgadas de sedimento con amplia extensión lateral; evidencia de formación de suelos (paleosuelos).

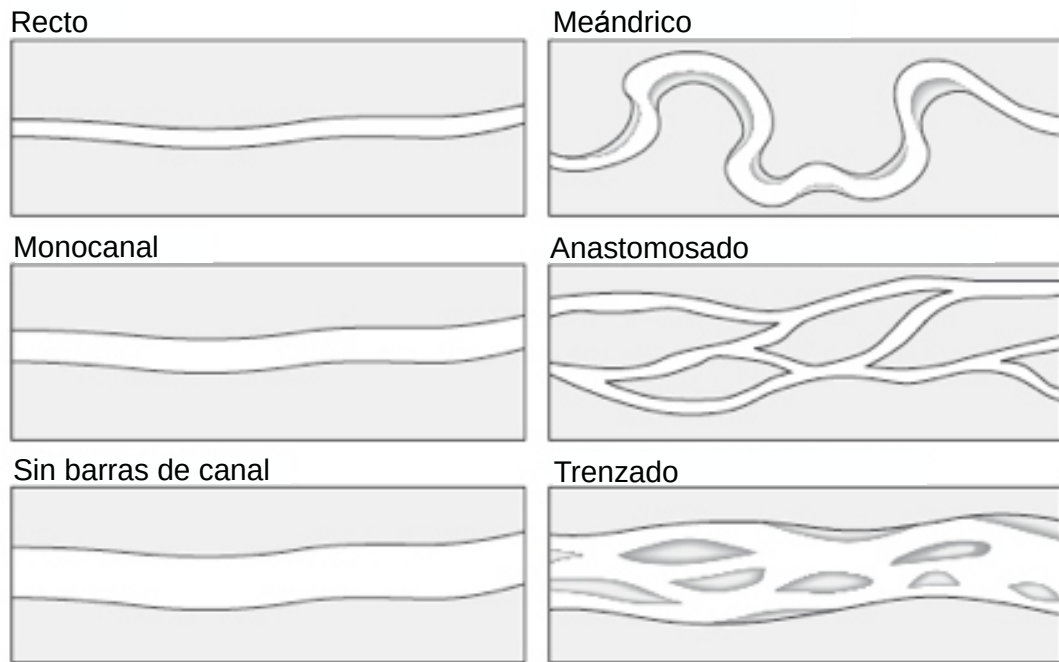
Figura 2. Zonas geomorfológicas en sistemas aluviales y fluviales



Fuente: NICHOLS, G., Sedimentology and stratigraphy , Willey-balckwell, 432 p. 2009

³⁶ NICHOLS, Op. Cit.

Figura 3. Tipos de ríos



Fuente: NICHOLS, G., Sedimentology and stratigraphy, Willey-balckwell, 432 p. 2009

2.6 PALEOCORRIENTES

Los indicadores de paleocorrientes son evidencia de la dirección de flujo en el momento en que el sedimento fue depositado, siendo esta información muy valiosa en la reconstrucción de la paleogeografía de ambientes fluviales³⁷. Adicionalmente los análisis de paleocorrientes permiten investigar³⁸ cambios en orientación y variación de la dirección de canales y barras a lo largo de una unidad estratigráfica; reconstruir los patrones de flujo regional y local e identificar cambios en la orinetacion de sistemas fluviales a través del tiempo. Los idicadores de paleocorrientes, pueden ser tomados en diferentes estructuras sedimentarias³⁹

³⁷ Ibid

³⁸ MIALl, Op. Cit.

³⁹ STOW, D. A. Sedimentary rocks in the field: a colour guide. CRC Press. 320p. 2005

como por ejemplo estructuras erosivas, laminación/estratificación cruzada, estrías glaciares, imbricación de clastos, fabricas sedimentarias entre otros. En este estudio se utilizó como indicador de paleocorriente la estratificación cruzada en artesa y se siguió la metodología de DeCelles⁴⁰ la cual consiste en medir la orientación y buzamiento de los flancos derecho e izquierdo de una artesa que ha sido cortada por la superficie de afloramiento en un ángulo oblicuo. Los polos de estos planos permiten producir una distribución bimodal (grupos derechos e izquierdos) en una red estereográfica y definir un plano que se aproxime al promedio de cada grupo de datos.

Posteriormente se calcula la intersección de los planos promedios y el plano resultante sugiere la orientación del eje de la artesa.

2.7 DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO

La distribución de tamaño de grano en los sedimentos permite identificar los mecanismos que operaron durante el transporte y por lo tanto esta información es útil a la hora de identificar e interpretar ambientes de depósito⁴¹.

Inman⁴² estableció que el modo fundamental de transporte de los sedimentos durante el curso del depósito puede ser mediante suspensión, salto y arrastre. Adicionalmente, estableció características importantes de la distribución del tamaño de grano en los sedimentos que pueden ser útiles en la interpretación de ambientes de depósito:

⁴⁰ DECELLES, P. G., LANGFORD, R. P., & SCHWARTZ, R. K. Two new methods of paleocurrent determination from trough cross-stratification. *Journal of Sedimentary Research*, 53(2). 642p. 1983

⁴¹ PASSEGA, R. Significance of C.M diagrams sediments deposited by suspensión. *Sedimentology*, V 24, 723-733p. 1997

⁴² INMAN, D. L. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Journal of Sedimentary Research*, 19(2). 51- 70p. 1949

- **Promedio gráfico:** es un índice del grado de abrasión y agotamiento y representa el tamaño promedio del total de los sedimentos

$$Mz = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$$

- **Desviación estándar gráfica inclusiva:** Es una medida que caracteriza la energía del ambiente de depósito, y la presencia- ausencia de fracciones de granos ásperos o finos. McKinney & Friedman (1970).

$$\phi I = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \left(\frac{\phi 95 - \phi 5}{6.6} \right)$$

De acuerdo con los valores obtenidos de las fórmulas de Folk & Ward (1957) se establecen los siguientes tipos de clasificación:

<0.35φ	muy bien seleccionado
0.35 a 0.50φ	bien seleccionado
0.50 a 0.71φ	moderadamente bien seleccionado
0.71 a 1.00φ	moderadamente seleccionado
1.00 a 2.00φ	mal seleccionado
2.00 a 4.00φ	muy mal seleccionado
>4.00φ	extremadamente mal seleccionado

Oblicuidad gráfica inclusiva: Mide la asimetría en la distribución de las partículas (Friedman, 1967)

$$Ski = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2\phi 50}{2 \phi 84 - \phi 16} + \left(\frac{\phi 5 + \phi 95 - 2\phi 50}{2 \phi 95 - \phi 5} \right)$$

De acuerdo con los valores obtenidos de las fórmulas de Folk & Ward⁴³ se establecen los siguientes tipos de clasificación:

1.0 a 0.3 ϕ	oblicuidad muy fina
0.3 a 0.1 ϕ	oblicuidad fina
0.1 a -0.1 ϕ	casi simétrico
-0.1 a -0.3 ϕ	oblicuidad gruesa
-0.3 a -1.0 ϕ	oblicuidad muy gruesa

Curtosis gráfica: Es una medida de la desviación simétrica de una curva normal, presenta un grado de concentración medido alrededor de los valores centrales de la variable (mismo que presenta una distribución normal) se llama distribución mesocúrtica, si presenta un grado de concentración alto alrededor de los valores centrales de la variable se denomina distribución leptocúrtica, en cambio si presenta un reducido grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable se denomina distribución platicúrtica⁴⁴.

$$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 \phi_{75} \phi_{25}}$$

A continuación se describen los términos para describir las características de la curtosis:

<0.67 ϕ	muy platicúrtica
0.67 a 0.90 ϕ	platicúrtica
0.90 a 1.11 ϕ	mesocúrtica
1.1 a 1.50 ϕ	leptocúrtica

⁴³ FOLK, R. L., & WARD, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Research, 27(1). 3-26p. 1957

⁴⁴ Ibid

1.50 a 3.00φ	muy leptocúrtica
>3.00φ	extremadamente leptocúrtica.

3. ANTECEDENTES

3.1 LOCALIZACIÓN

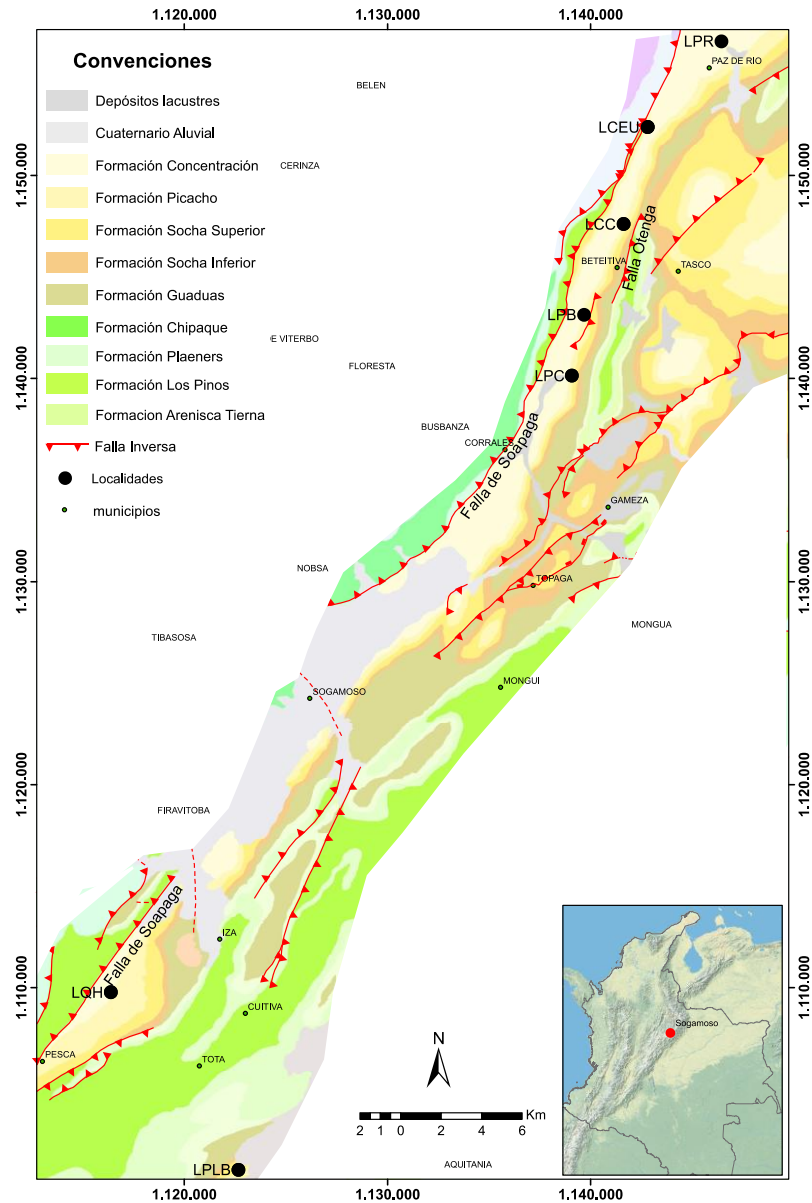
El área de estudio se encuentra localizada entre los municipios de Paz de Río y Tota (Figura 4) entre las coordenadas con origen Bogotá (E: 1142779 a E: 1122944 y N: 1152386 a N: 1100865) pasando por Sogamoso y Pesca los cuales se encuentran dentro de la Cuenca de la Cordillera Oriental, ubicada en los Andes Colombianos al noreste de Suramérica, dentro del departamento de Boyacá. Las secciones estudiadas se encuentran en el bloque yacente de la Falla de Soapaga (Figura 4).

3.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO

En el área de Paz de Río - Tota aflora principalmente una secuencia sedimentaria de edad Cenozoica que de acuerdo a Ulloa⁴⁵ comprende de base a tope las Formaciones Areniscas de Socha, Arcillas de Socha y Picacho (Figura 4). A continuación se hace una breve descripción de cada unidad.

⁴⁵ ULLOA, RODRÍGUEZ, FUQUEN, ACOSTA, Op. Cit.

Figura 4. Mapa geológico del área de Pesca a Sogamoso (Fm Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga) con las localización de los trabajos realizados y secciones levantadas este trabajo. LCC: Localidad Curva de Cosgua, LPC: Localidad Puente Cajones, LQH: Localidad Quebrada Honda, LPLB: Localidad Playa Blanca, LPR: Localidad Paz de Rio, LCEU: Localidad Cerro el Uvo, LPB: Localidad Peña Blanca.



3.2.1 Formación Socha Inferior o Areniscas de Socha (Tpasi)

Definición: La Formación Socha Inferior, suprayace disconforme a la Formación Guaduas e infrayace concordante y transicional a la Formación Socha Superior. De acuerdo a Ulloa⁴⁶ hacia el sur de la ciudad de Sogamoso, esta unidad presenta un espesor de 140 metros, mientras que Bayona⁴⁷ reporta para el área de Umbita un espesor de 257 metros.

Litología: hacia el tope, esta unidad está compuesta principalmente por areniscas de grano medio, mientras que hacia la base presenta arenisca de grano grueso a muy grueso (presentando localmente guijos de cuarzo) l. Las areniscas son compactas, de color amarillo rojizo y los granos que componen el armazón son subangulares con una moderada selección. Intercalado entre los paquetes de arenisca se presentan delgadas láminas de lodolita gris oscuro a rojo.

Ambientes de depósito: Diversos autores han sugerido diferentes ambientes de depósito para la Formación Areniscas de Socha. De acuerdo a Bayona⁴⁸, esta se depósito en una planicie fluvial, mientras que para Saylor⁴⁹ fue en un ambiente fluvial trenzado. En cambio, el estudio adelantado por Pardo & Roche⁵⁰ sugiere un ambiente de islotes de barras longitudinales, mientras que para Guerrero & Sarmiento⁵¹ el depósito corresponde a llanuras de inundación fluvial.

⁴⁶ Ibid

⁴⁷ BAYONA, G.; CARDONA, A.; JARAMILLO, C.; MORA, A.; MONTES, C.; CABALLERO, V.; MAHECHA, H.; LAMUS, F.; MONTENEGRO, O.; JIMÉNEZ, G.; MESA, A.; VALENCIA, V. Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean–South American convergence in early Palaeogene time. Geological Society, London, Special Publications, 377(1), 285-314p. 2013

⁴⁸ Ibid

⁴⁹ SAYLOR, HORTON, NIE, CORREDOR, & MORA, Op. Cit

⁵⁰ PARDO, & ROCHE, Op. Cit.

⁵¹ GUERRERO, J., & SARMIENTO, G. Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en exploración petrolera. Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences; Vol. 20 (1996); 3-66p. 1996

Edad: La edad de acumulación de la Formación Socha Inferior según De Porta et al (1974) correspondería a Paleoceno Tardío. Para Bayona⁵² correspondería a Paleoceno tardío a medio, basada en análisis palinológicos

3.2.2 Formación Socha Superior o Arcillas de Socha (Tpars)

Definición: La Formación Socha Superior se presenta en contacto concordante con la Formación Socha Inferior e infrayace en contacto discordante con la Formación Picacho. (Figura 5). De acuerdo a Ulloa, hacia el sur de Sogamoso esta unidad presenta un espesor de 217 metros mientras que Bayona reporta un espesor de 400 metros en el área de Umbita.

Litología: Hacia la base esta unidad es compuesta por arcillas arenosas de color verde oscuro con intercalaciones de areniscas. En la parte media formada por arcillas verdosas con mantos de carbón y hacia el tope presenta intercalaciones de areniscas de grano medio con arcillas. La presencia de yeso es continua en toda la unidad (Figura 5).

Ambientes de depósito: Las interpretaciones de ambientes de depósito según los autores son: ambientes de ríos anastomosados, depósitos fluviales dominados por arcillas⁵³ depósitos de llanura costera o de inundación fluvial sujetos a procesos de formación de suelos, planicie fluvial llanuras aluviales de inundación con canales.

Edad: La edad de acumulación de la Formación Socha Superior es Paleoceno temprano basada en análisis palinológicos⁵⁴.

⁵² BAYONA, CARDONA, JARAMILLO, MORA, MONTES, CABALLERO, MAHECHA, LAMUS, MONTENEGRO, JIMÉNEZ, MESA, VALENCIA, Op. Cit

⁵³ PARDO, & ROCHE. Op. Cit

⁵⁴ VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico, 6 (1-3) 70p. 1957

3.2.3 Formación Picacho (Tep)

Definición: La Formación Picacho fue descrita por primera vez por Alvarado & Sarmiento⁵⁵ y su localidad tipo se encuentra al norte de la población de Beteitiva en las proximidades de los Cerros El Fraile y Picacho, del cual deriva su nombre, y que se encuentran situados al Oeste de la población de Paz de Río (Fig. 3). En esta localidad presenta un espesor entre 90 y 115 metros mientras que en la vía Corrales - Paz de Río,⁵⁶ reportan un espesor de 138.8 m. Por su parte Ulloa indican que al sur de la localidad de Sogamoso esta Formación tiene un espesor de 560m, mientras que Bayona reporta para el área de Umbita un espesor de 245 metros. La Formación Picacho se encuentra en contacto disconforme sobre la Formación Socha Superior e infrayace disconforme con la Formación Concentración⁵⁷ (Figura 4).

Litología: De acuerdo con Alvarado & Sarmiento⁵⁸ al norte del municipio de Beteitiva, hacia la base presenta areniscas conglomeráticas, y areniscas de grano medio y hacia el tope areniscas conglomeráticas con cantos de cuarzo y areniscas tamaño medio a grueso de color blanco, citan la presencia de impregnaciones de asfalto. Por su parte Ulloa divide la Formación Picacho aflorante al norte de la ciudad de Sogamoso en tres segmentos (Fig. 4): el segmento A, presenta areniscas de grano medio a grueso cuarzosas y feldespáticas con lentes conglomeráticos de cuarzo con cantos hasta de 1,5 cm e intercalaciones de lodolita; el segmento B, consta de lodolitas rojo amarillentas y el segmento C presenta areniscas cuarzo - feldespáticas de grano medio a grueso.

⁵⁵ ALVARADO, B. & SARMIENTO, R., Informe Geológico sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz del Río, Departamento de Boyacá. Serv. Geol. Nal., Informe 468. Bogotá. 132p. 1944

⁵⁶ Ibid

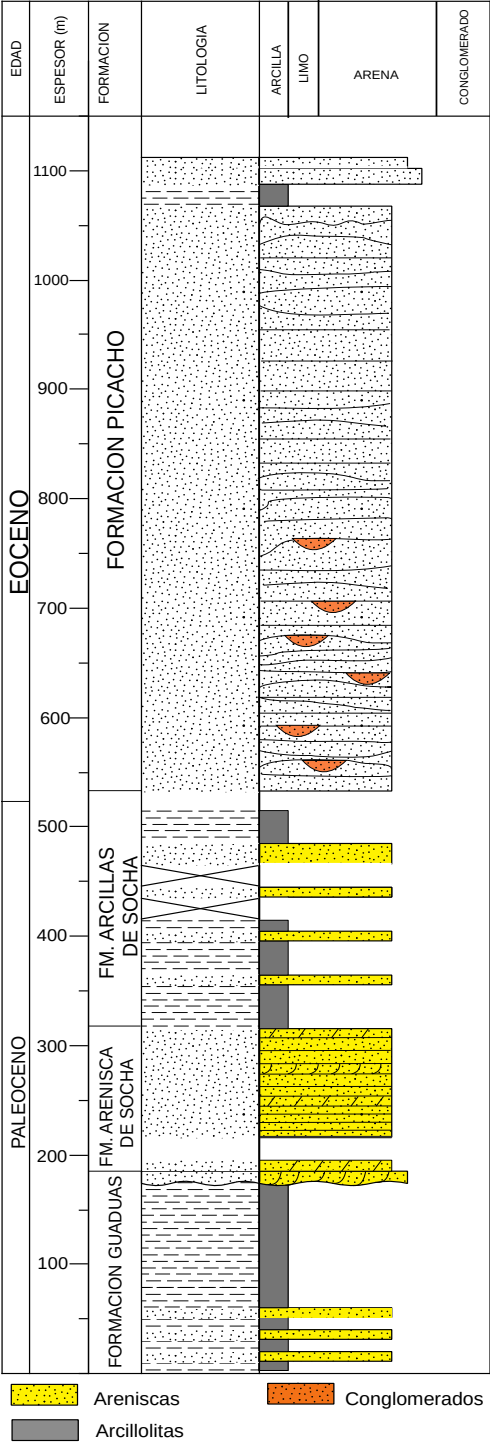
⁵⁷ DE PORTA, N., TABORDA, B., TAYLOR, P., TÉLLEZ, N., & VALENCIA, D. Léxico Capítulo 7 124 Estratigráfico de Colombia: Tertiaire et Quaternaire. Union Internationale Des Sciences Géologiques, Amérique Latine, v.5 620p. 1974

⁵⁸ ALVARADO, & SARMIENTO, Op. Cit

Ambientes de depósito: En cuanto a los ambientes de acumulación, hacia la localidad Peña Blanca (LPB) (Fig. 3), interpretan la Formación Picacho como depositada en ambientes fluviales trenzados y hacia la localidad de Paz del Río (LPR) (Fig. 3) interpretan ambientes de anteplaya. Por su parte, Pardo & Roche determinaron que para la localidad de Peña Blanca LPB (Fig. 3) los ambientes donde se depositó la Formación Picacho, corresponden a depósitos fluviales dominados por grava. Según Osorno en la zona de Paz de Río el ambiente de depósito de esta formación es de ríos trenzados y Bayona interpreta en la localidad de Paz de Río que el ambiente de depositación corresponde a planicie fluvial.

Edad: La edad de acumulación de la Formación Picacho varía según la interpretación de los diferentes autores. Indica una edad de Eoceno Inferior basada en correlaciones litoestratigráficas con la Formación La Paz del Valle Medio del Magdalena y la Formación Mirador en el Catatumbo. De acuerdo a Pardo & Roche la edad de la Formación es Eoceno inferior a medio y fue determinada a partir de análisis palinológicos de las muestras tomadas en las secciones de la Curva de Cosgua y Peña Blanca. Finalmente Bayona propone una edad de Eoceno inferior basados en análisis palinológicos llevados a cabo en muestras de la sección de la localidad de Paz de Río.

Figura 5. Columna estratigráfica generalizada Formaciones Guaduas, Picacho y Grupo Socha, parte sur de Sogamoso



Fuente: ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E.; FUQUEN, A.; Acosta, J. Geología de la plancha 192, laguna de tota, escala 1:100.000 Ingeominas, Bogotá, 50p 2001

3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la zona de estudio se destacan estructuras principales como la Falla de Soapaga, pone en contacto rocas con diferencias de edades, en el bloque colgante se encuentra el Macizo de Floresta, compuesto por rocas de edad Precámbrico al Triásico-Jurásico, en el bloque yacente de la Falla de Soapaga se encuentran rocas de edad Cretácico Inferior hasta Paleógeno de origen sedimentario (Fig. 5). La Falla de Soapaga es una estructura definida como falla de inversión positiva Ulloa, generada a partir de eventos de inversión tectónica ocurridos durante Mesozoico según Velandia⁵⁹. Las capas del bloque yacente de la Falla de Soapaga buzan hacia el NW, en el bloque colgante, las capas asumen un buzamiento hacia el interior del Macizo de Floresta, según Kammer⁶⁰. La Falla de Soapaga no estuvo activa durante el tiempo del Paleoceno- Eoceno Temprano (Fig. 5)

La Falla Otengá es una falla inversa con componente sinistral, presenta rumbo SW – NE Y desplaza entre 300 a 350 m la secuencia Cenozoica aflorante entre las fallas de Soapaga y Canelas⁶¹ Fig. 5.

EL sinclinal de Beteitiva, involucra en superficie rocas cenozoicas, en sus flancos afloran las formaciones Guaduas, Areniscas de Socha, Arcillas de Socha, Picacho y en su núcleo la Formación Concentración. Es una estructura asimétrica que se manifiesta por la posición subvertical a invertida de su flanco occidental⁶².

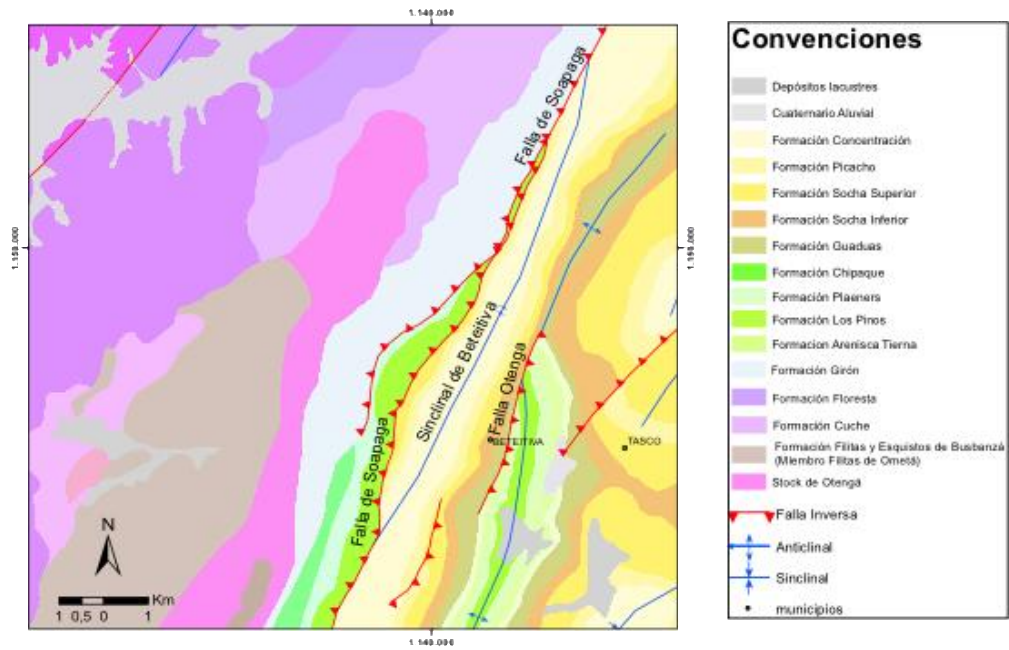
⁵⁹ VELANDIA, F. Interpretación de transcurriencia de las fallas Soapaga y Boyacá, a partir de imágenes Landsat TM. Boletín de Geología, 27(44). 12p. 2005

⁶⁰ KAMMER, A. Estructuras y deformaciones del borde oriental del Macizo de Floresta. Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences; Vol. 21 65 – 80p. 1996

⁶¹ ANH & Geoestudios. Cartografía geológica cuenca cordillera oriental-sector Soapaga, contrato nº 085, Bogotá. 329p. 2006

⁶² Ibid

Figura 6. Diagrama estructuras principales de la zona de estudio. Falla de Soapaga, Sinclinal de Beteitiva y Falla Otenga



4. METODOLOGÍA

Para la obtención de los objetivos planeados y la obtención de productos exigidos se llevó a cabo la siguiente metodología:

4.1 FASE RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Se consultaron informes geológicos de estudios anteriores realizados en el área con el fin de enriquecer la metodología y tener un marco geológico y estratigráfico de referencia. Adicionalmente algunos resultados de estos estudios fueron incluidos en las interpretaciones aquí presentadas. La revisión de informes de Ulloa, Pardo & Roche, Saylor y Bayona principalmente, así como la revisión de las planchas geológicas número 172 191⁶³ y 192 de Ingeominas, permitieron enfocar la fase de campo y ubicar las secciones estratigráficas.

4.2 FASE CAMPO

4.2.1 Levantamiento de secciones estratigráficas y toma de muestras. Para determinar la distribución de facies de la Formación Picacho, se hizo un reconocimiento de campo en el mes de noviembre del 2013, con el objetivo de cubrir toda la extensión de esta Formación en el bloque yacente a la Falla de Soapaga.

⁶³ RENZONI, G., ROSAS H., ETAYO F. Geología de la Plancha 191-Tunja. Escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá. 1967

Como resultado de este reconocimiento, se decidió realizar entre los meses de febrero a junio de 2014 el levantamiento de cuatro secciones estratigráficas a escala 1:50 mediante el uso del bastón de Jacob y corroborando el espesor total por medio de poligonales (Figura 9).

La información estratigráfica fue registrada usando el formato de descripción propuesto por Ingeominas (Figura 8) en el que se especifica el metro estratigráfico, el tamaño de grano, las estructuras sedimentarias, la textura y composición entre otras características. La nomenclatura empleada para la clasificación de rocas siliciclásticas corresponde a la de Folk⁶⁴, mientras para la descripción del tamaño de grano se empleó la clasificación granulométrica de Wentworth⁶⁵. La descripción de capas se hizo de acuerdo a Ingram⁶⁶. Para evaluar el grado de impregnación de la roca, se utilizó una escala visual que comprende 3 niveles; nivel 1: impregnación baja, nivel 2: impregnación media y nivel 3: impregnación alta

En cada una de las columnas estratigráficas levantadas, se realizaron mediciones de paleocorrientes y se tomaron muestras para petrografía, tamizaje y palinología. Las muestras fueron marcadas siguiendo la siguiente nomenclatura: (COS-01-G), iniciales del sitio-número de muestra tomada- análisis a realizar. G: granulometría, SD: sección delgada y P: palinología. A continuación se describe la ubicación y acceso a cada una de las secciones levantadas (Figura 9). Las convenciones de las litologías, las estructuras, los contactos para cada una de las secciones estratigráficas se muestran en la Figura 8.

⁶⁴ FOLK, R. L. Petrography of sedimentary rocks. Univ. Texas, Hemphill, Austin, Tex, 170p. 1974

⁶⁵ WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 377-392p. 1922

⁶⁶ INGRAM, R. L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks. Geological Society of America Bulletin, 65(9), 937-938p. 1954

Figura 7. Formato de descripción para levantamiento de las columnas estratigráficas

DATO ESTRUCTURAL	PTO. POLIGONAL	ESPESOR # DE BASTÓN	ESPESOR ACUMULADO	# FOTOGRAFÍA	MUESTRA	TIPO DE ROCA, FORMA Y ESTRUCTURAS INTERNAS	TEXTURA, CONTACTOS, LAMINACIÓN INTERNA, FÓSILES									
							Md	Wc	Pc	Gr	← Carbonatos					
							Terrígenos									
							Arenas					Grava				
20	40	60	80	A	A+Li	Li	m	e	g	mg	4	8	16	32	64	

RASGOS TEXTURALES			COMPOSICIÓN						ICNOFÓSILES	GRADO BIOTURBACIÓN	COLOR	INDICADORES DE PALEOCORRIENTE	DESCRIPCIÓN COMPLEMENTARIA: disposición y orientación de fósiles, acumulaciones biológicas, físicas o químicas; dibujo de macrofósiles, indicadores de meteorización contemporánea (hardgrounds, paleosuelos, etc)
MADUREZ: Selección, redondez, % matriz	Armazón / Matriz	Tipo de Cemento	Cuarzo	Feldespatos	Lífticos	Bioclastos	Peloides	Ooides					

Fuente: RENZONI, G., ROSAS H., ETAYO F. Geología de la Plancha 191-Tunja. Escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá. 1967

Figura 8. Convenciones utilizadas en las columnas estratigráficas.

Litologías		Estructuras		Contactos	
	Areniscas		Laminacion cruzada		Erosión
	Arcillolita		Laminacion plano paralela		Neto
	Conglomerado		Lentes de arena	Otros	
	AreniscaConglomeratica		Restos de plantas		
	Limolita		Bioturbación baja	Impregnación de hidrocarburo	
			Bioturbación moderada		

Figura 9. Localización secciones levantadas (LCEU, LCC, LQH, LPLB)



Fuente: Mapa base google maps

4.2.1.1 Sección Cerro el Uvo (LCEU): Esta sección se localiza en la vereda Colacote y se accede a ella por la vía que de Paz de Río conduce a Paz Viejo. Al llegar a la mina El Uvo, se toma un carreteable que conduce hasta un sitio conocido como tres esquinas. A partir de allí se toma una carretera a la izquierda,

pasando por el colegio Colacote y a 1,5 km se encuentra el denominado Cerro El Uvo (Figura 9). El punto de inicio del afloramiento es X: 1142819 Y: 1152377 y su punto final es X: 1142779 Y: 1152386, coordenadas origen Bogotá

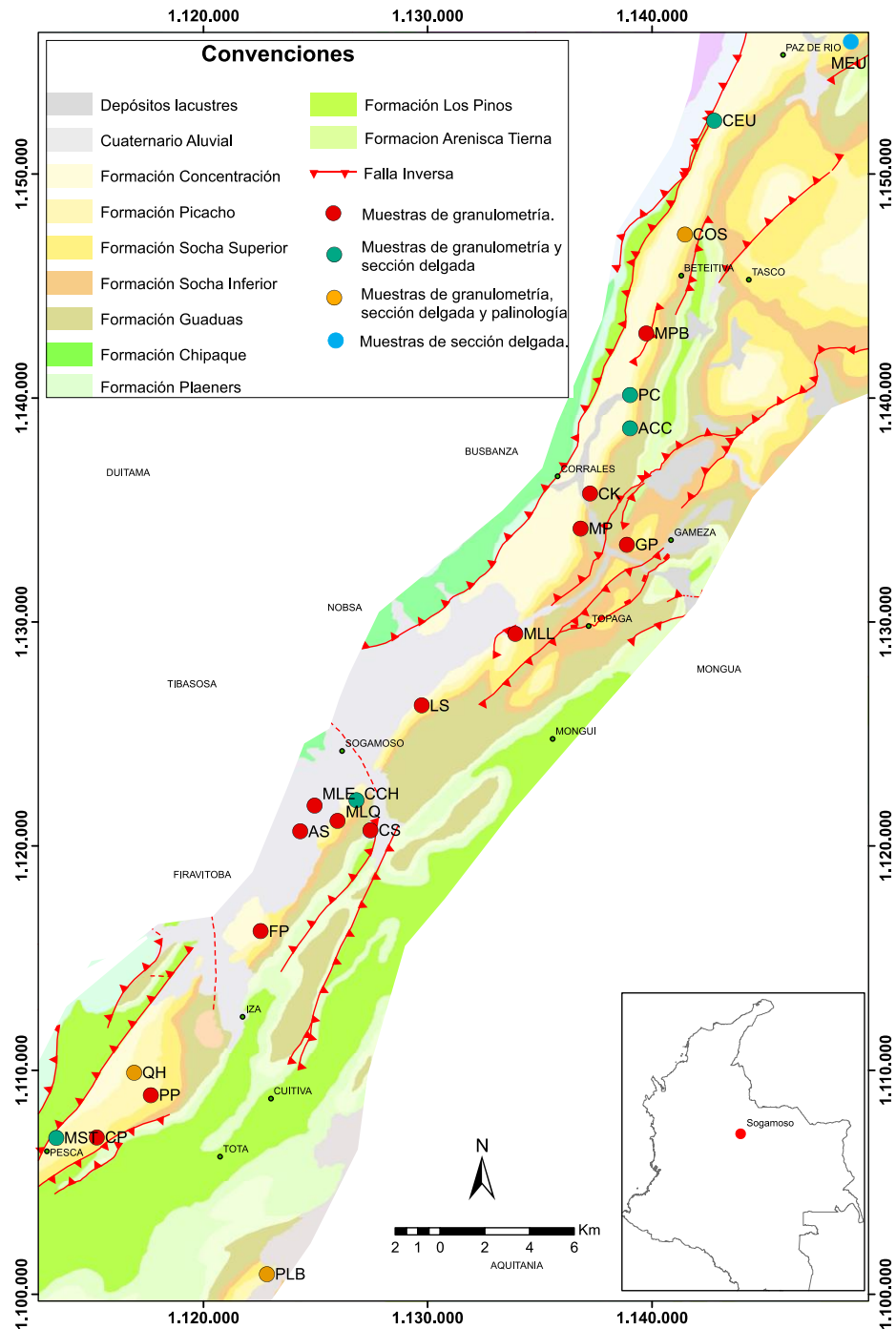
4.2.1.2 Sección Curva de Cosgua (LCC): Esta sección había sido levantada y estudiada por Pardo & Roche (2009). Para accederla es necesario transitar por la vía que de la población de Tasco conduce a Paz de Rio hasta llegar a la vereda El Pedregal. Una vez allí, se parte por un carreteable que conduce a la izquierda hasta un criadero de trucha; luego se transita a pie hasta cruzar un puente de rumbo Oeste y junto a la vía férrea se encuentran los afloramientos de roca. Este sector es conocido como la Curva de Cosgua (Figura 9). El punto de inicio del afloramiento es X: 1141470 Y:1147307 y su punto final es X: 1141414 Y: 1147368, coordenadas origen Bogotá.

4.2.1.3 Sección Quebrada Honda (LQH): Esta sección está ubicada en la Quebrada Honda Grande y para acceder a ella es necesario tomar la vía que conduce de Iza a Pesca hasta llegar al sitio donde parte un carretera que conduce a la mina La Emilia. Se toma la carretera hasta encontrar un puente de madera en el sentido Oeste, se cruza este puente y se sube aproximadamente 1 km, hasta llegar a una antigua ladrillera y 3 m más arriba se encuentra con la Quebrada Honda Grande en la vereda El Alisal (Figura 9). En las coordenadas origen Bogotá: X: 1116829 Y: 1110019.

4.2.1.4 Sección Playa Blanca (LPLB): Para acceder a esta sección es necesario tomar la vía que conduce de Sogamoso pasando por el municipio de Aquitania hasta llegar al sitio turístico llamado Playa Blanca. Al frente de la portería se encuentra el afloramiento rocoso (Figura 9). El inicio de la sección es X: 1122743 Y: 1101073 y el punto final es X: 1122944 Y: 1100865, coordenadas origen Bogotá.

4.2.2 Distribución granulométrica. Para determinar la distribución granulométrica de los sedimentos que componen la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga, se tomaron un total de ochenta y siete (87) muestras de aproximadamente 1 kg de peso cada una (Figura 10) (Anexo J). Del total de las muestras, veinticinco (25) fueron tomadas en las columnas levantadas y su posición estratigráfica se presenta en las respectivas columnas y en el anexo J. Las restantes sesenta y dos (62) muestras fueron tomadas en trece (13) estaciones de campo donde se encontraron afloramientos aislados de la Formación de la Picacho. Cada estación esta georeferenciada (Figura 10) y sus coordenadas se presentan en el Anexo J. Las estaciones fueron seleccionados tomando como base la información consignada en las planchas geológicas 172, 191 y 192.

Figura 10. Mapa de muestras para granulometría, sección delgada y palinología de Formación Picacho en bloque yacente de la Falla de Soapaga



4.2.3 Petrografía. Con el objetivo de identificar cambios composicionales y texturales, así como establecer la posible procedencia de los sedimentos que componen las areniscas de la Formación Picacho, se tomaron 21 muestras para realizar análisis petrográficos mediante sección delgada. Del total de muestras, nueve (9) fueron tomadas en las secciones levantas y su ubicación estratigráfica se presenta en las respectivas columnas. Las restantes doce (12) fueron tomadas en estaciones donde se presentan afloramientos de la Formación Picacho. Las ubicación geográfica y coordenadas de estas estaciones se presentan en la Figura 10 y en el anexo J.

4.2.4 Palinología. Con el fin de enmarcar cronoestratigráficamente las secciones levantadas y establecer correlaciones entre las mismas, se tomaron un total de 11 muestras de litologías finas para realizar análisis palinológicos (Figura 10). Estudios anteriores, como los presentados por Van der Hammen⁶⁷, Bayona⁶⁸ y en especial el estudio de Pardo & Roche⁶⁹ demuestran una buena recuperación de palinomorfos en algunos niveles de la Formación Picacho. Nueve (9) de las muestras fueron tomadas en las secciones levantadas y su posición estratigráfica se presenta en las respectivas columnas y en el anexo J. Las dos muestras restantes fueron tomadas en estaciones donde se encontraron afloramientos aislados de la Fm. Picacho (Anexo J).

⁶⁷ VAN DER HAMMEN, T. Op. Cit

⁶⁸ BAYONA, CARDONA, JARAMILLO, MORA, MONTES, CABALLERO, MAHECHA, LAMUS, MONTENEGRO, JIMÉNEZ, MESA, VALENCIA, Op. Cit

⁶⁹ PARDO, & ROCHE, Op. Cit

4.2.5 Medición de Paleocorrientes. Con el objetivo de determinar el patrón de dirección del flujo que deposita las areniscas de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga, se tomaron aproximadamente quinientos setenta y cuatro (574) mediciones indicadoras de paleocorrientes, siguiendo el método para medición de estratificación cruzada de Stow⁷⁰ y el método para medición de flancos de artesa de estratificación cruzada en artesa de De celles⁷¹.

Del total de medidas, cuatrocientos diez (410) datos fueron obtenidos en las secciones levantas, cuyos resultados se presentan en las respectivas columnas estratigráficas. El resto de medidas (164) fueron tomadas en 13 estaciones donde se encontraron afloramientos de la Formación Picacho. Las coordenadas de las estaciones son presentadas en el Anexo F.

En la metodología propuesta por De celles⁷² se mide la orientación y buzamiento de los flancos derecho e izquierdo de una artesa presente en una capa con estratificación cruzada en artesa y que este cortada en ángulo oblicuo con respecto al afloramiento. Idealmente es preferible tomar el mayor número de datos posible (dependiendo de las condiciones del afloramiento) para posteriormente representar los polos de estos planos en una red estereográfica y distinguir de una distribución bimodal los grupos derecho e izquierdo de la artesa.⁷³

Con estos datos se define el plano que más se aproxime al promedio de cada grupo y por el método de intersección de planos se calcula la intersección y el plano resultante es interpretado como la orientación del eje de la artesa.

⁷⁰ STOW, Op. Cit

⁷¹ DECELLES, LANGFORD, & SCHWARTZ, Op. Cit

⁷² Ibid

⁷³ CABALLERO, M., Evolución tectono – sedimentaria del sinclinal de nuevo mundo, cuenca sedimentaria valle medio del Magdalena, Colombia, Durante el Oligoceno – Mioceno, Universidad Industrial de Santander. 163p. 2010

Si las capas presentan buzamiento, es necesario rotar el eje de la artesa hasta alcanzar la horizontal para de esta manera calcular la dirección de la paleocorriente.

4.3 FASE DE LABORATORIO

4.3.1 Distribución granulométrica. La mayoría de las muestras tomadas para determinar la distribución granulométrica de los sedimentos que componen la Formación Picacho presentaron bajo grado de cementación facilitando su disgregación y posterior tamizaje, el cual fue realizado en el laboratorio de ConstruSuelos de Colombia S.A.S. Cada una de las muestras se pesó y posteriormente se pasó por los tamices número $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{4}$, 4, 10, 40, 100, 200 (Tabla 2) en orden descendente de diámetro de malla (ϕ) y se pesó la cantidad retenida de muestra en cada tamiz (frecuencia acumulada).

Tabla 2. Tamaño de tamices con su respectivo término general .

Tamaño de tamiz	Nomenclatura
>200	Arena Muy Fina
200	
100	Arena Fina
40	Arena Media
10	
4	Arena Gruesa
$\frac{1}{4}$	
$\frac{3}{8}$	Grava
$\frac{1}{2}$	
$\frac{3}{4}$	

4.3.2 Petrografía. Las secciones delgadas tomadas para identificar cambios composicionales y texturales y establecer la posible procedencia de la areniscas de la Formación Picacho fueron elaboradas en el Laboratorio de Procesamientos de Muestras Geológicas (LPMG) del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), siguiendo el procedimiento establecido en el manual de procedimientos técnicos del laboratorio.

El análisis petrográfico se realizó utilizando un microscopio petrográfico de luz transmitida polarizada marca Nikon E200 en el laboratorio de óptica de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Para el análisis de cada sección delgada, se realizó un conteo convencional de 300 puntos en promedio, perpendiculares a la laminación y distribuidos a través de toda la sección delgada. Para cada uno de los puntos, se determinó la composición de la partícula observada y el tipo de contacto que presenta con las demás partículas. Una vez finalizado el conteo, se calculó el porcentaje de los componentes del armazón y de la matriz y/o cemento. La composición modal para cada muestra se calculó como el porcentaje de cada uno de los tres elementos (feldespatos, cuarzo y líticos) sobre el conteo total de estos mismos. Con el objetivo de establecer la posible procedencia de los sedimentos que componen las areniscas de la Formación Picacho, los datos obtenidos de las secciones delgadas fueron interpretados de acuerdo a las diferentes tipologías del cuarzo (monocristalino y policristalino) y la presencia de líticos, feldespatos y plagioclasas⁷⁴. Los resultados fueron graficados en los diagramas triangulares de Folk⁷⁵ y Dickinson & Suczek⁷⁶.

⁷⁴ DICKINSON, W. R., & SUCZEK, C. A. Plate tectonics and sandstone compositions. *Aapg Bulletin*, 63(12), 2164-2182. 12p. 1979

⁷⁵ FOLK, Op. Cit

⁷⁶ DICKINSON, & SUCZEK, Op. Cit

4.3.3 Palinología. Las muestras 11 muestras tomadas para establecer las edad de la Formación picacho fueron procesadas en el Laboratorio de Procesamiento de Muestras Geológicas (LPMG) del Instituto Colombiano del Petróleo, siguiendo el método propuesto por Traverse⁷⁷.

Primero se eliminan los carbonatos y silicatos presentes en la muestra mediante acidificación con HCl y HF respectivamente. Posteriormente se realiza un filtrado a través de una malla de 10 micras con el objetivo de eliminar la fracción arcillosa de las muestras. Una vez filtrado, el residuo es centrifugado con el objetivo de concentrar la materia orgánica y recuperar los palinomorfos. Finalmente, el residuo es montado en un portaobjetos y queda listo para ser analizado bajo el microscopio.

Las preparaciones palinológicas fueron analizadas por el Grupo de Bioestratigrafía del Instituto Colombiano del Petróleo. La identificación taxonómica de los palinomorfos fue llevada a cabo mediante la comparación de los especímenes encontrados con las descripciones y fotografías de la base de datos morfológica del Grupo de Bioestratigrafía. En análisis palinológicos tradicionales, en cada muestra o lámina se hace un conteo de hasta 300 palinomorfos y una vez alcanzado este número, se analiza el resto de la preparación con el objetivo de identificar y registrar nuevas especies. En el caso de específico de las muestras de este estudio, el recobro de palinomorfos fue en general muy bajo, por lo cual se analizó la totalidad de la lámina y se registraron todas las especies que se encontraron.

⁷⁷ TRAVERSE, A. Paleopalynology. New York, Academia Press, 600p. 1988

4.4 FASE DE OFICINA

4.4.1 Interpretación de facies y ciclos estratigráficos. Para la determinación de facies se siguió la nomenclatura de Farrel⁷⁸ la cual se basa principalmente en tres aspectos de la roca, el tamaño de grano, la estructura y la bioturbación.

Se interpretaron nuevas litofacies a partir de esta metodología, las cuales no están descritas en el trabajo de Farrel⁷⁹. La identificación de ciclos estratigráficos se llevó a cabo por medio del reconocimiento de tendencias unidireccionales de aumento o disminución en la relación espacio de acomodación (A) contra suministro de sedimento (S). Las columnas estratigráficas levantadas fueron digitalizadas en el software Sedlog 3.0 (2009) y CorelDraw X5 (2010).

4.4.2 Ambientes depositacionales. Para ayudar a determinar estadísticamente los posibles ambientes de depositación de la Formación Picacho en el bloque yacente a la Falla de Soapaga se realizó a partir de las curvas de distribución granulométrica (tamaño de ϕ Vs %frecuencia acumulada) se obtuvo el tamaño correspondientes a los percentiles 5, 16, 25, 50, 75, 84 y 95 (Friedman, 1967).

Este cálculo fue hecho mediante un código de programación en el lenguaje R (R Core Team) (anexo F). Con los resultados de cada uno de los percentiles se procedió a calcular parámetros individuales tales como, promedio gráfico, desviación estándar gráfica, oblicuidad gráfica, y curtosis gráfica, aplicando las fórmulas propuestas por Folk & Ward se realizaron 2 gráficos bivariados, el primero de la desviación estándar grafica contra el promedio y el segundo de la oblicuidad grafica contra la desviación estándar gráfica.

⁷⁸ FARRELL, HARRIS, MALLINSON, CULVER, RIGGS, PIERSON, & LAUTIER, Op. Cit

⁷⁹ Ibid

Finalmente para tener una idea de la distribución geográfica del tipo de sedimento presente en la Fm. Picacho, se realizó un mapa con diagramas de torta para cada estación donde se presenta en términos porcentuales el aporte de cada uno de los tamices.

4.4.3 Paleocorrientes. Para el procesamiento y representación gráfica de los datos de paleocorrientes, se utilizó el software de StereoNet⁸⁰, realizando la respectiva corrección por inclinación de las capas. Las medidas tomadas en las secciones levantadas, permiten conocer los posibles cambios en la dirección de flujo que sucedieron durante el tiempo de depósito de la unidad. Las medidas tomadas en las estaciones permiten conocer de manera general la dirección de flujo regional.

4.4.4 Palinología. La interpretación bioestratigráfica y cronoestratigráfica siguió el esquema de zonación propuesto por Jaramillo⁸¹ para el Cenozoico de Colombia. Este esquema consta de 18 zonas palinológicas (T1 hasta T18) que están calibradas con el tiempo geológico.

La zonación está basada principalmente en la aparición y desaparición (FAD y LAD) de especies de palinomorfos y cada biozona se caracteriza y se diferencia de las demás por presentar asociaciones características de especies. Para interpretar la edad de una muestra, se analiza su contenido palinológico y dependiendo de las especies allí presentes es posible interpretar una biozona específica.

⁸⁰ ALLMENDIGER, R., CARDOZO N. Stereonet 9. Disponible en: <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>. 2015

⁸¹ JARAMILLO, C.; RUEDA, M.; TORRES, V. A Palynological Zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 46 – 84 p. 2011

Como en las muestras analizadas en este trabajo el recobro de palinomorfos fue tan pobre, se utilizó la técnica de máxima verosimilitud (maximum likelihood) desarrollada por Punyasena⁸², la cual que permite comparar la abundancia y asociación de palinomorfos encontrada en una muestra contra una sección de referencia que puede estar calibrada en tiempo, biozonas o cualquier otro gradiente. El resultado es un gráfico que indica la probabilidad de que la muestra se correlacione con algún valor del gradiente. En este caso, se utilizó una sección compuesta del Cenozoico (ICP-comunicación personal) cuyo gradiente es el tiempo geológico en millones de años y se compararon las asociaciones encontradas a través del cenozoico con las asociaciones encontradas en cada una de ellas. El resultado que se obtiene es la probabilidad de que una muestra específica tenga las mismas asociaciones palinológicas de una determinada edad. La aplicación informática para correr el programa puede descargarse de la página www.life.illinois.edu/punyasena/download⁸³.

Adicionalmente, los resultados palinológicos obtenidos por Pardo & Roche en la sección de la curva de Cosgua fueron utilizados para robustecer la interpretación de ambientes de depósito de la Formación Picacho. Para este fin, se utilizó información de la afinidad natural y ecológica de algunos palinomorfos.

⁸² PUNYASENA, S. W., JARAMILLO, C., DE LA PARRA, F., & DU, Y. Probabilistic correlation of single stratigraphic samples: A generalized approach for biostratigraphic data. AAPG bulletin, 96(2), 235-244p. 2012

⁸³ Ibid

5. RESULTADOS

5.1 ESTRATIGRAFÍA

Se levantaron 4 columnas estratigráficas, para un total de 383 metros de espesor (Tabla 3). La localidad de Playa Blanca se encuentra expuesta y fue posible reconocer los contactos con las Formaciones Arcillas de Socha en la base y Formación Concentración al tope, la localidad Quebrada Honda expone la parte más superior y es posible reconocer el contacto con la Formación Concentración. La curva de Cosgua se registra contacto erosivo con la Formación Arcilla de Socha. La localidad Cerro El Uvo registra el contacto erosivo con la Formación Arcilla de Socha. Las últimas tres secciones (Quebrada Honda, Curva de Cosgua y Cerro El Uvo), se concentró el estudio en sus segmentos aflorantes debido a que en esos segmentos se encuentra las impregnación de hidrocarburo. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada sección:

Tabla 3. Espesores totales para cada columna estratigráfica levantada, medida con bastón de Jacob y con poligonal

	LCEU	LCC	LQH	LPLB
Total bastones (m)	43.9	74,2	50.5	214.4
Total poligonal (m)	43,08	-	50,99	214.4

5.1.1 Localidad Cerro El Uvo (LCEU). En la sección aflorante llamado el Cerro El Uvo se levantó un total de 43.9 m que fueron medidos con el bastón de Jacob y poligonal (Tabla 3).

Ciclos estratigráficos: Esta sección presenta de base a techo un grupo de 6 ciclos estratigráficos principalmente separadas por superficies de erosión, granodecreciente de facies de grano medio fluvial e intercalaciones de arcillas de planicie.

Estructuras: las estructuras presentes son estratificación cruzada, laminación plano paralela.

Espesores: Las facies medias individuales, arenosas, varían de espesor entre 2 a 7 metros y las facies arcillosas oscilan en su espesor entre 20 a 30 cm, solo una presenta un espesor de 5 metros.

Facies: Las facies de base a techo son: Slam, Sx, sGx y C (ANEXO A)

5.1.2 Localidad Curva de Cosgua (LCC). La sección aflorante llamada Localidad Curva de Cosgua se levantó un total de 75.7 metros que fueron medidos con el bastón de Jacob (Tabla 3).

Ciclos estratigráficos: La sección presenta 3 ciclos estratigráficos principales de base a techo, separados por superficies de erosión granodecreciente de facies conglomeráticas, seguidas de facies gruesas, media fluviales e intercaladas con arcillas de planicie.

Estructuras: Las estructuras presentes en los ciclos estratigráficos son laminación plano paralela, estratificación cruzada y maciza.

Espesor: Las facies conglomeráticas individuales varían de espesor entre 20 a 50 centímetros. Las facies medias presentan un espesor entre 60 cm a 6 metros y las facies arcillosas varían en su espesor entre 20 a 30 cm, solo una presenta un espesor de 5 metros.

Facies: Las facies de base a techo son: Gm, Sx, Slam, C y Clambiot (ANEXO B)

5.2 LOCALIDAD QUEBRADA HONDA

La sección aflorante llamada Quebrada Honda se levantó un total de 50.5 metros que fueron medidos con el bastón de Jacob y la poligonal (Tabla3).

Ciclos estratigráficos: La sección presenta 6 ciclos estratigráficos principales de base a techo, separados por superficie de erosión, granodecreciente que va desde facies gruesas conglomeráticas de facies conglomeráticas seguida de facies medias, finas fluviales, intercaladas con arcillas de planicie.

Estructuras: las estructuras presentes son: maciza, laminación plano paralela, estratificación cruzada.

Espesor: Los espesores de las facies conglomeráticas varían entre 30 cm y 3 m, las facies medias presenta espesores entre 20 cm y 2 metros y por ultimo las facies arcillosas de espesores entre 10 y 30 centímetros.

Facies: las facies de base a techo son: Gm, Sm, Sx, Slam, sGlam, C (ANEXO C)

5.2.1 Localidad Playa Blanca. La sección aflorante llamada Quebrada Honda se levantó un total de 214.4 metros (ANEXO D) que fueron medidos con el bastón de Jacob y la poligonal (Tabla3).

Ciclos estratigráficos: La sección presenta 17 ciclos estratigráficos principales de base a techo, separados por superficie de erosión, granodecreciente que va desde facies gruesas conglomeráticas de facies conglomeráticas seguida de

facies medias, finas fluviales, intercaladas con arcillas de planicie y 2 ciclos granodecreciente.

Estructuras: las estructuras presentes son: maciza, laminación plano paralela, estratificación cruzada.

Espesor: Los espesores de las facies conglomeráticas varían entre 50 cm y 1.5 m, las facies medias presenta espesores entre 20 cm y 4 metros y por ultimo las facies arcillosas de espesores entre 10 y 70 centímetros.

Facies: las facies de base a techo son: Gm, Sm, Sx, Slam, sGx, C, clambiot (ANEXO D)

5.3 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Con el objetivo de caracterizar granulométricamente las areniscas de la Formación Picacho, se tamizaron cada una de las muestras tomadas en campo calculando los porcentajes acumulados para cada tamiz (ANEXO E), seguido del cálculo de los percentiles realizado por un código en el lenguaje de programación R (ANEXO F) para determinar los parámetros de tamaño del grano, como tamaño medio de grano desviación estándar, oblicuidad y curtosis. Los valores de parámetros estadísticos de las 87 muestras recolectadas en diferentes localidades (Figura 10). Los resultados se presentan en la (Tabla 4)

Tabla 4. Parámetros y datos estadísticos de textura de las muestras de acuerdo a Folk & Ward (1957) para muestras de areniscas de la Formación Picacho.

Mod. = moderadamente, Ext. = extremadamente

Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
ACC-02-g	-0,938	1,682	0,548	4,499	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
ACC-03-g	-0,497	1,719	0,361	5,758	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
AS-01-g	0,636	1,562	0,241	3,783	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
AS-02-g	0,255	1,073	0,190	2,251	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
AS-03-g	-0,302	1,972	0,229	7,215	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
AS-04-g	-0,307	2,415	0,371	9,960	muy mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
AS-05-g	0,771	1,426	0,292	3,503	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
CCH-04	1,057	1,381	0,131	3,745	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
CCH-05-g	0,293	0,997	0,184	1,951	mod. seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
CCH-07-g	2,015	0,572	0,087	0,651	mod. bien seleccionado	casi simetrico	muy platicúrtica
CEU-03-g	2,030	1,143	-0,096	2,126	mal seleccionado	casi simetrico	muy leptocúrtica
CK-01-g	0,721	1,223	0,206	2,694	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
CK-02-g	0,591	1,224	0,275	2,398	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
CK-03-g	0,282	1,704	0,029	4,682	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
CK-04-g	0,883	1,304	0,166	3,275	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica

Tabla 4. (Continuación)

Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
CK-05-g	-0,300	2,302	0,016	10,059	muy mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
CK-06-g	1,484	1,234	-0,217	2,655	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
CK-07-g	1,849	0,970	-0,166	1,627	mod. seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
CK-08-g	1,849	0,970	-0,166	1,627	mod. seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
CK-09-g	2,200	1,005	-0,044	1,774	mal seleccionado	casi simetrico	muy leptocúrtica
CK-10-g	2,052	0,618	0,128	0,758	mod.bien seleccionado	oblicuidad fina	platicúrtica
COS-01-g	0,499	1,231	0,226	2,535	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
COS-09-g	-0,674	1,904	0,076	7,433	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
CP-02-g	1,558	1,574	-0,338	3,201	mal seleccionado	oblicuidad muy gruesa	ext. leptocúrtica
CP-03-g	-1,468	2,256	0,569	7,981	muy mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
CP-10-g	1,706	1,427	-0,310	2,669	mal seleccionado	oblicuidad muy gruesa	muy leptocúrtica
CS-01-g	0,092	1,561	0,121	4,143	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
CS-02-g	1,133	0,960	-0,451	1,656	mod. seleccionado	oblicuidad muy gruesa	muy leptocúrtica
CS-03-g	0,276	1,734	0,092	5,734	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
CS-04-g	2,013	0,558	0,083	0,619	mod. bien seleccionado	casi simetrico	muy platicúrtica
FP-02-g	1,795	1,101	-0,192	1,939	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
FP-03-g	1,076	1,621	-0,207	5,200	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	ext. leptocúrtica

Tabla 4. (Continuación)

Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
GP-01-g	1,980	0,743	-0,054	1,066	mod. seleccionado	casi simetrico	mesocúrtica
GP-02-g	1,653	1,552	-0,081	4,870	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
GP-03-g	2,228	0,970	0,023	1,612	mod. seleccionado	casi simetrico	muy leptocúrtica
LS-01-g	0,068	0,857	0,845	0,870	mod. seleccionado	oblicuidad muy fina	platicúrtica
LS-02-g	0,042	0,866	0,858	0,887	mod. seleccionado	oblicuidad muy fina	platicúrtica
LS-03-g	1,217	1,333	-0,089	3,500	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
LS-04-g	0,751	1,527	0,107	4,467	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
LS-05-g	0,894	1,421	-0,078	4,025	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
LS-06-g	0,545	1,137	0,597	1,673	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	muy leptocúrtica
LS-07	1,351	1,267	-0,190	3,036	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	ext. leptocúrtica
MLE-01-g	0,544	1,298	0,294	2,679	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLE-02-g	0,588	1,598	0,197	4,030	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
MLE-03-g	0,437	1,065	0,208	2,012	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLE-04-g	0,414	1,142	0,249	2,290	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLE-05-g	0,237	0,894	0,144	1,584	mod. seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLL-01-g	0,703	1,312	0,286	2,796	mal seleccionado	oblicuidad fina	mesocúrtica
MLL-02-g	0,187	1,918	-0,002	6,584	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica

Tabla 4. (Continuación)

Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
MLL-03-g	0,569	1,282	0,219	2,697	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLL-04-g	0,811	1,306	0,186	3,228	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
MLQ-01-g	0,146	1,280	0,114	3,149	mal seleccionado	oblicuidad fina	ext. leptocúrtica
MLQ-02-g	0,253	0,984	0,187	1,897	mod. seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLQ-03-g	0,212	0,889	0,154	1,564	mod. seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MLQ-04-g	0,255	0,931	0,161	1,712	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MP-03-g	2,015	0,827	-0,044	1,303	mod. seleccionado	casi simetrico	leptocúrtica
MP-04-g	-0,544	1,724	-0,025	5,790	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
MP-05-g	1,319	1,239	-0,260	2,846	mal seleccionado	casi simetrico	muy leptocúrtica
MP-06-g	0,915	1,269	0,090	3,151	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	ext. leptocúrtica
MPB-01-g	0,349	1,072	0,217	2,167	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
MPB-02-g	1,938	0,704	-0,193	0,970	mod. seleccionado	oblicuidad gruesa	mesocúrtica
MPB-03-g	-0,757	1,801	0,392	6,366	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
MPB-04-g	0,201	0,847	0,121	1,425	mod. seleccionado	oblicuidad fina	leptocúrtica
MST-02-g	-0,031	1,444	0,064	3,748	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
PC-04-g	2,291	0,757	0,196	0,972	mod. seleccionado	oblicuidad fina	mesocúrtica
PLB-01-g	1,276	1,291	-0,143	3,234	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	ext. leptocúrtica

Tabla 4. (Continuación)

Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
PLB-02-g	1,801	1,052	-0,184	1,797	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
PLB-03-g	0,653	1,288	0,234	2,854	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
PLB-04-g	0,917	1,240	-0,013	3,026	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
PLB-05-g	0,586	1,222	0,247	2,438	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
PLB-06-g	1,776	0,702	0,104	0,636	mod. seleccionado	oblicuidad fina	muy platicúrtica
PLB-07-g	0,088	1,264	0,692	1,636	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	muy leptocúrtica
PLB-08-g	0,331	1,131	0,774	1,439	mal seleccionado	oblicuidad muy fina	leptocúrtica
PLB-09-g	0,838	1,159	0,196	1,693	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
PLB-11-g	0,140	0,769	0,036	1,171	mod. seleccionado	casi simetrico	leptocúrtica
PLB-12-g	0,179	1,805	0,059	5,356	mal seleccionado	casi simetrico	ext. leptocúrtica
PP-01-g	1,989	0,603	0,009	0,722	mod. seleccionado	casi simetrico	platicúrtica
PP-02-g	-0,904	2,298	0,496	10,730	muy mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
PP-03-g	2,019	0,667	0,101	0,879	mod. seleccionado	oblicuidad fina	platicúrtica
PP-04-g	2,019	0,667	0,101	0,879	mod. seleccionado	oblicuidad fina	platicúrtica
QH-01-g	1,580	1,234	-0,198	2,459	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
QH-02-g	1,691	1,009	-0,251	1,557	mal seleccionado	oblicuidad gruesa	muy leptocúrtica
QH-04-g	1,952	0,809	-0,108	1,246	mod. seleccionado	oblicuidad gruesa	leptocúrtica

Tabla 4. (Continuación)

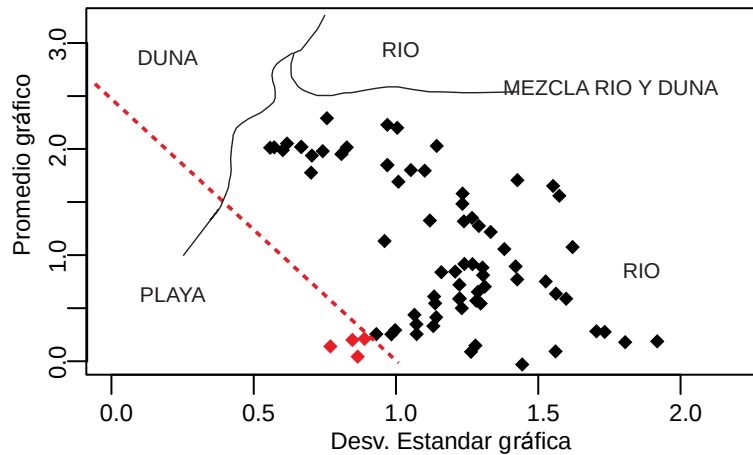
Muestra	Promedio gráfico	Desviación Estándar gráfica	Oblicuidad gráfica	Curtosis gráfica	Clase de Desviación Est.	Clase de oblicuidad	Clase de curtosis
QH-04-g	1,952	0,809	-0,108	1,246	mod. seleccionado	oblicuidad gruesa	leptocúrtica
QH-05-g	0,845	1,208	0,004	2,868	mal seleccionado	casi simetrico	muy leptocúrtica
QH-06-g	-1,387	2,180	0,319	9,197	muy mal seleccionado	oblicuidad muy fina	ext. leptocúrtica
QH-07-g	0,610	1,134	0,153	2,309	mal seleccionado	oblicuidad fina	muy leptocúrtica
QH-09-g	1,326	1,119	-0,320	2,280	mal seleccionado	oblicuidad muy gruesa	muy leptocúrtica

Los diagramas bivariados de las figuras 10 y 11 representan diferentes combinaciones de las variables granulométricas de las arenisca de la Formación Picacho. La figura 11 representa la desviación estándar gráfica contra el promedio gráfico de los tamaños de las areniscas. De acuerdo a Friedman⁸⁴ y Miola & Weiser⁸⁵, estos dos parámetros permiten diferenciar entre areniscas depositadas en ambientes de dunas, ambientes fluviales, ambientes de playa y combinación entre ellos (Figura 11). La mayoría de las muestras analizadas de la Formación Picacho se encuentran en el campo de río (Figura 11) y únicamente cuatro muestras (diamantes rojos) serían, de acuerdo a este diagrama, más afines a depósitos por ambientes de playa. Estas cuatro muestras corresponden las muestras LS-01-g, MLQ-03-g, MLE-05-g Y CCH-05-g.

⁸⁴ FRIEDMAN, G. M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Research*, 37(2). Pp 327 – 234p. 1967

⁸⁵ MIOLA, R.J & WEISER, D. Textural parameters: An evaluation *Jour. Sediment. Petrol.*, v.38(1), 45-53p. 1968

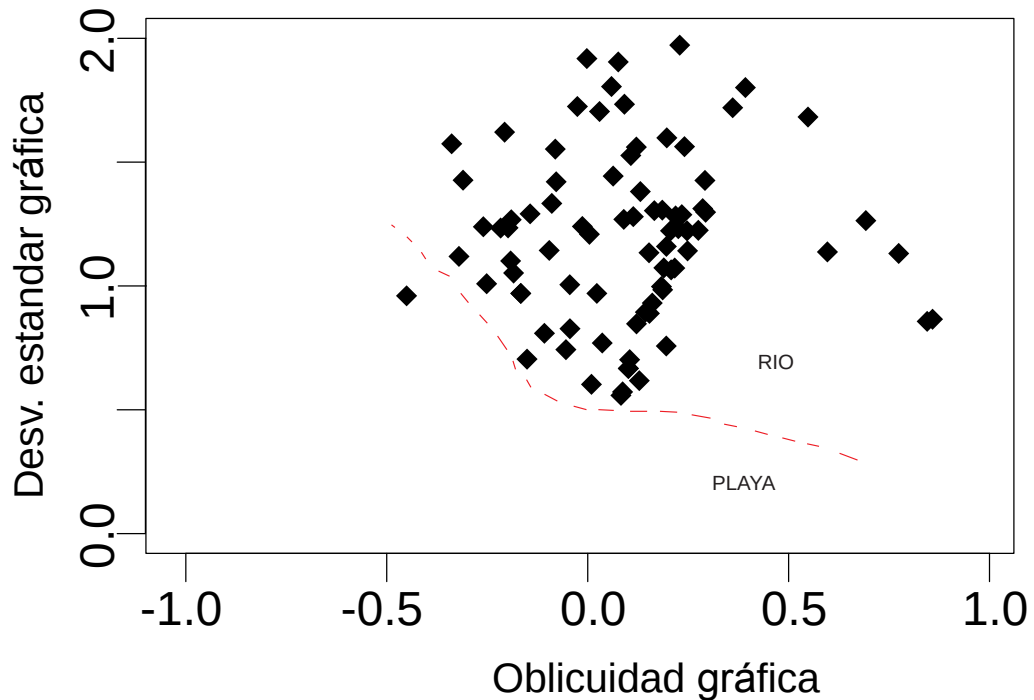
Figura 11. Diagrama bivalente de desviación estándar gráfica vs. Promedio gráfico de las muestras Formación Picacho utilizando el diagrama de Friedman (1967); Miola & Weiser (1968)



Friedman⁸⁶ propone que un diagrama bivariado entre la oblicuidad gráfica contra la desviación estándar gráfica (Figura 12) que permite distinguir entre areniscas depositas en ambientes de rio y areniscas depositadas en ambientes de playa. Los resultados obtenidos en las areniscas de la Formación Picacho, sugieren que todas las muestras, con excepción de una (CS-02-g), se encuentran en el campo de depósitos fluviales (Figura 13).

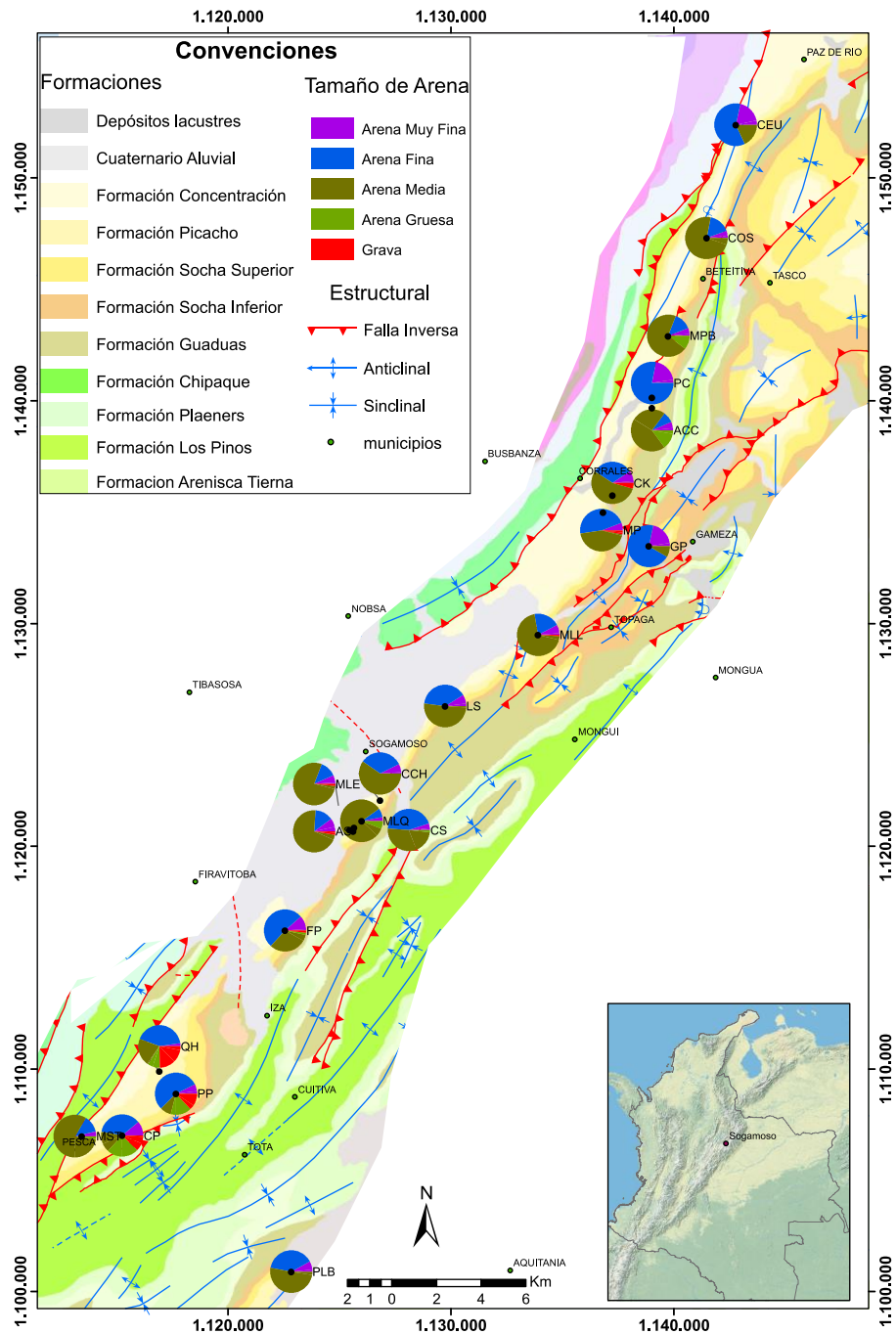
⁸⁶ Ibid

Figura 12. Diagrama bivalente de oblicuidad gráfica contra desviación estándar gráfica de las muestras de la Formación Picacho utilizando el diagrama Friedman (1967).



Con el objetivo de obtener un mejor entendimiento de la distribución geográfica del tamaño de grano de las areniscas presentes en la Formación Picacho, se realizó un mapa de diagrama de tortas (Figura 14) y (Tabla 3), donde cada torta representa el porcentaje de los diferentes tamaños de granos para una muestra de arenisca tomada en ese punto. Los resultados indican que hacia el NE (cerca al municipio de Paz de Río) la fracción que domina son el tamaño arena fina a muy fina y en menor proporción el tamaño arena media. Hacia la parte central de la zona de estudio (alrededores de la ciudad de Sogamoso) domina la fracción arena media y en menor proporción el tamaño arena fina. Hacia la parte SW predominan las areniscas de tamaño fino a medio, aunque también es posible encontrar dominancia de tamaño grava superior a 19 mm.

Figura 13. Mapa de distribución de tamaño de grano de la Formación Picacho en bloque yacente de la Falla de Soapaga.



5.4 DISTRIBUCIÓN DE PALEOCORRIENTES:

En cada una de las localidades levantadas y estaciones de muestreo se tomaron datos de paleocorriente (ANEXO G). Los resultados sugieren una dirección preferencial de flujo con dirección NE (Figura 14) para el depósito de la Formación Picacho con algunas desviaciones hacia el EW (Figura 16) los cuales pueden ser debidos a cambios locales en la dirección de flujo. Las paleocorrientes indicarían por lo tanto que la principal procedencia de los sedimentos se encontraría en dirección SW de la posición actual de la Formación Picacho.

Figura 14. Diagrama roseta indicando la posible dirección de flujo de los sedimentos de la Formación Picacho; la dirección preferencial es NE con algunas desviaciones hacia el NW y SE.

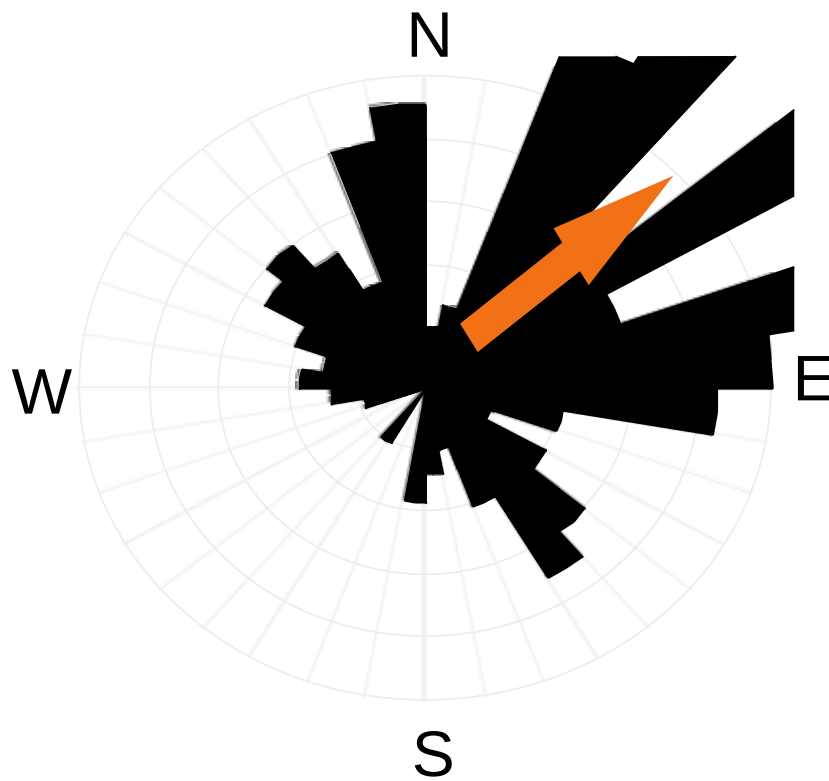
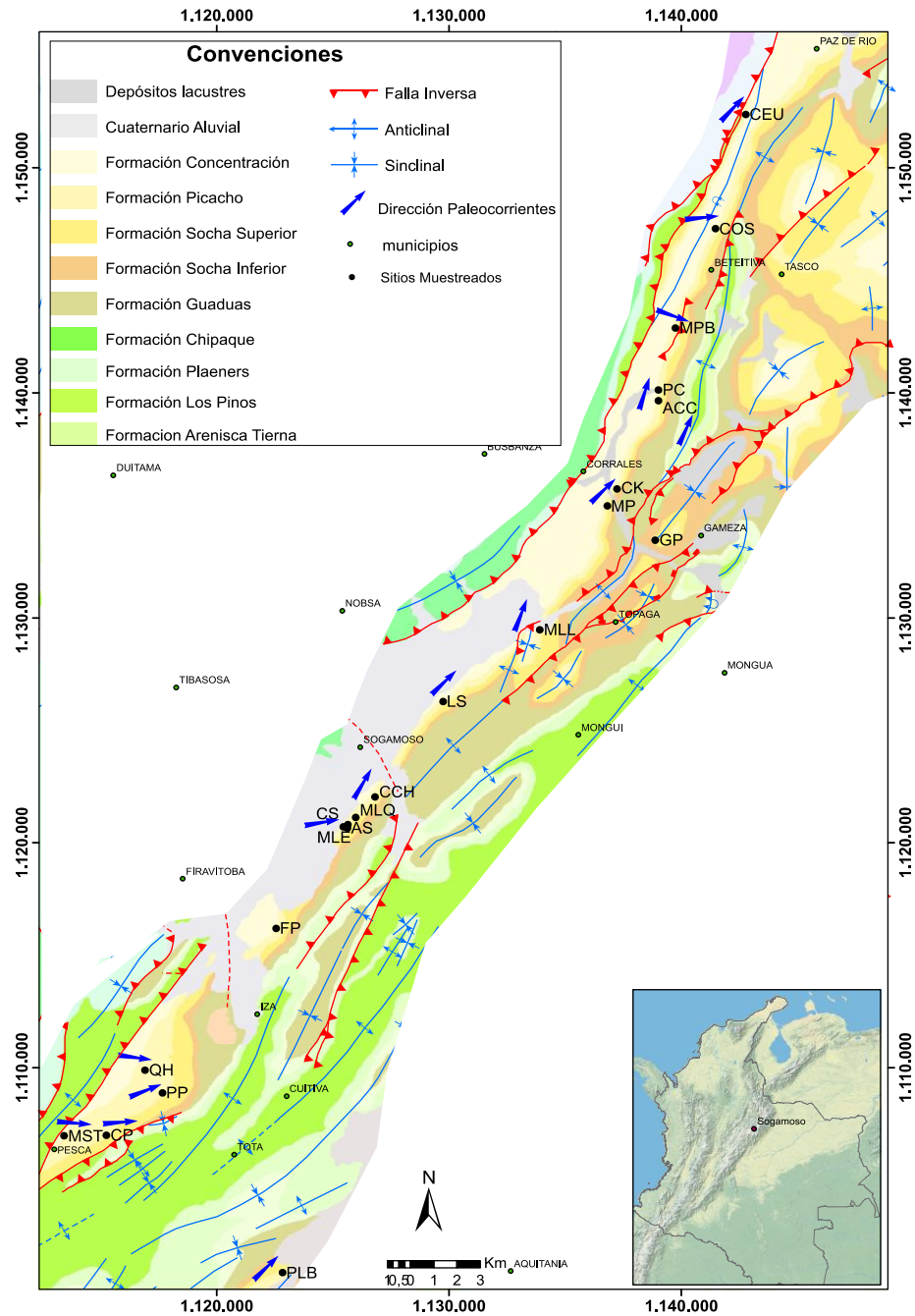


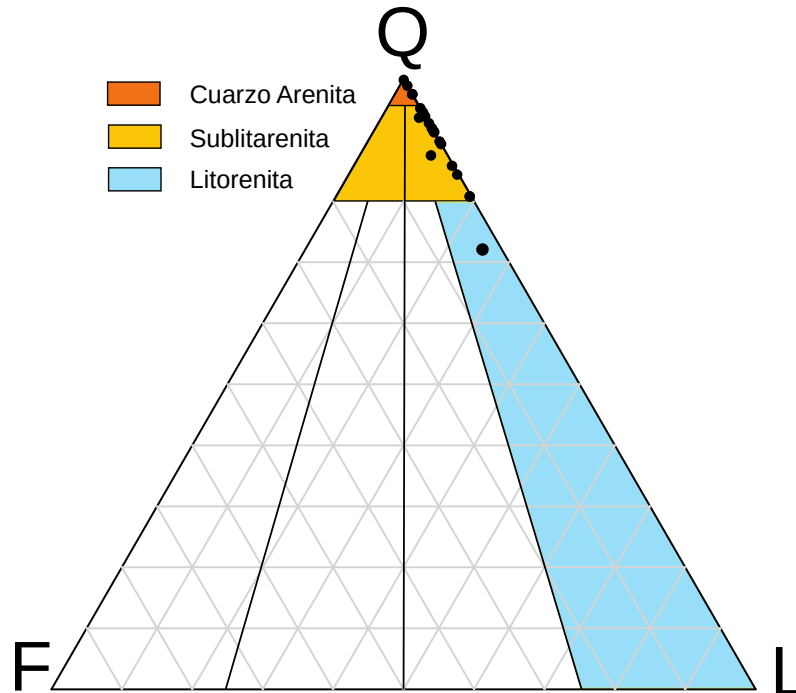
Figura 15. Mapa de distribución de paleocorrientes para cada sitio muestreado en la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga



5.5 PETROGRAFÍA DE LAS ARENISCAS

Se analizaron petrográficamente un total de 21 muestras de las areniscas de la Formación Picacho (Tablas 5 - 7, Figura 11). De acuerdo al diagrama de la clasificación composicional de Folk, cuatro (4) muestras corresponden a cuarzoarenitas, (MEU-01-SD, COS-05-SD, CEU-05-SD y COS-02-SD), diecisiete (17) muestras corresponden a sublitoarenitas (MEU-02-SD, PC-03-SD, CCH-03-SD, COS-09-SD, PC-01-SD, COS-06-SD, CEU-06-SD, MST-01-SD, MLE-03-SD, CEU-07-SD, PC-02-SD, COS-07-SD, CCH-02-SD, MST-04-SD, ACC-01-SD, MST-03-SD) y una (1) muestra es clasificada como litoarenita (QH-10-SD) (Tabla 6, Figura 17). Las muestras clasificadas como cuarzoarenitas, se presentan al norte del área de estudio, mientras que la única muestra correspondiente en la clasificación a litoarenita se encuentra al sur de la zona estudiada cerca al municipio de Pesca.

Figura 16. Clasificación composicional para las muestras analizadas bajo microscopia óptica, utilizando el diagrama QFL propuesto por Folk, (1974)



De acuerdo a los análisis petrográficos realizados en las secciones delgadas (ANEXO G), las areniscas de la Formación Picacho (tabla 6), se caracterizan por presentar un armazón compuesto por granos de cuarzo principalmente cuarzo monocristalino y en menor proporción fragmentos líticos en su mayoría de origen metamórfico. El tamaño de grano que predomina (tabla 7) es arena de grano fino a medio, moderadamente calibrada con granos subredondeados y contactos cóncavos, el cemento es caolín y de idiomorfismo subhedral.

Tabla 5. Composición de las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho. Cm: cemento, Mx: matriz.

Muestras	Total Puntos	Armazón	Cm	Mx	Porosidad	Oil	Cm+Mx+Porosidad
MEU-01-SD	288	207	7	6	68	0	81
MEU-02-SD	291	213	13	0	65	0	78
PC-02-SD	303	228	12	9	54	16	75
PC-03-SD	288	203	13	10	62	7	85
CCH-03-SD	289	211	5	0	73	0	78
COS-09-SD	288	197	6	24	61	0	91
COS-07-SD	289	199	8	21	61	0	90
CCH-02-SD	288	160	23	36	69	0	128
COS-05-SD	289	211	16	0	62	0	78
PC-01-SD	288	184	8	12	84	0	104
MST-04-SD	290	240	11	0	39	0	50
COS-06-SD	288	238	4	11	35	0	50
CEU-06-SD	288	202	5	7	74	0	86
ACC-01-SD	288	212	12	45	19	0	76
MST-01-SD	288	203	3	7	75	0	85
MLE-03-SD	282	213	16	15	38	10	69
QH-10-SD	289	174	10	34	71	0	115
CEU-07-SD	288	170	8	36	39	0	83
MST-03-SD	288	211	10	34	33	0	77
CEU-05-SD	288	175	10	34	69	0	113
COS-02-SD	297	164	10	42	81	0	133

Tabla 6. Composición del armazón las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho. Qm: cuarzo monocristalino, Ch: chert, Qp: cuarzo policristalino, Fpl: feldespato plagioclasa, Fk: feldespato potásico, Fi: feldespato indefinido, Lm: líticos metamórficos, Ls: líticos sedimentarios, Lp: líticos plutónicos, Lv: líticos volcánicos, Li: líticos indiferenciado, Ca: calcita, Min. Traza: minerales traza

	ARMAZÓN													COMPOSICIÓN MODAL			
Muestras	Qm	Ch	Qp	Fpl	Fk	Fi	Lm	Ls	Lp	Lv	Li	Ca	Min. traza	%F	%L	%Qz	conteo total
MEU-01-SD	162	0	42	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0,00	1,45	98,55	207
MEU-02-SD	145	0	50	0	0	2	0	0	0	0	12	0	4	0,96	5,74	93,30	209
PC-02-SD	116	11	53	0	0	5	15	0	0	0	5	0	7	2,44	9,76	87,80	205
PC-03-SD	136	0	26	0	0	0	7	1	0	0	8	0	18	0,00	8,99	91,01	178
CCH-03-SD	177	0	13	0	0	0	0	0	0	0	19	0	2	0,00	9,09	90,91	209
COS-09-SD	163	0	18	0	0	0	5	0	0	0	6	0	5	0,00	5,73	94,27	192
COS-07-SD	127	0	33	0	0	0	17	7	0	0	15	0	0	0,00	19,60	80,40	199
CCH-02-SD	117	0	18	0	0	0	8	0	0	0	8	0	9	0,00	10,60	89,40	151
COS-05-SD	186	0	18	0	0	0	0	0	0	0	6	0	1	0,00	2,86	97,14	210
PC-01-SD	141	0	29	0	0	0	9	0	0	0	5	0	0	0,00	7,61	92,39	184
MST-04-SD	158	0	47	0	0	0	20	5	0	0	10	0	0	0,00	14,58	85,42	240
COS-06-SD	173	0	45	0	0	0	9	0	0	0	11	0	0	0,00	8,40	91,60	238
CEU-06-SD	181	0	9	0	0	0	7	0	0	0	5	0	0	0,00	5,94	94,06	202
ACC-01-SD	147	0	31	0	0	0	12	8	0	0	14	0	0	0,00	16,04	83,96	212
MST-01-SD	170	0	17	0	0	0	5	0	0	0	8	0	3	0,00	6,50	93,50	200
MEM-03-SD	168	0	16	0	0	0	0	2	0	0	16	0	1	0,00	8,91	91,09	202
QH-10-SD	112	0	12	4	0	0	15	4	0	0	25	0	2	2,33	25,58	72,09	172
CEU-07-SD	163	0	21	0	0	0	6	0	0	0	4	0	0	0,00	5,15	94,85	194
MST-03-SD	148	0	20	0	0	0	13	2	0	0	26	0	2	0,00	19,62	80,38	209
CEU-05-SD	165	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0,00	2,86	97,14	175
COS-02-SD	155	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	100,00	164

Tabla 7. Rasgos texturales de las muestras de las secciones delgadas tomadas a lo largo de la de la Formación Picacho.

sub= subredondeado

suban=subangular

	Rasgos Texturales						
Muestras	Tamaño de grano	Selección	Esfericidad	Redondez	Contactos	Cemento	Idiomorfismo
MEU-01-SD	Arena Media	Moderado	Esférica	Sub.	Puntual>Longitudinal	Caolinita>Silice	Subhedral
MEU-02-SD	Arena Media	Bien	Esférica	Sub.	Longitudinal>convexo	Caolinita>Silice	Subhedral
PC-02-SD	Arena Fina	Bien	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
PC-03-SD	Arena Fina	Bien	Esférica	Suban.	Puntual>Longitudinal	Caolinita	Subhedral
CCH-03-SD	Arena Fina	Moderado a bien	Esférica	Sub.	Puntual>Longitudinal	Caolinita	Subhedral
COS-09-SD	Arena Fina	Moderado a bien	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
COS-07-SD	Arena Fina	Bien	Esférica	Sub.	Concavo	Caolinita	Subhedral
CCH-02-SD	Arena Fina	Bueno	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
COS-05-SD	Arena Media	Moderado	Esférica	Sub.	Concavo	Caolinita	Subhedral
PC-01-SD	Arena Media	Bien	Esférica	Sub.	Concavo	Caolinita	Subhedral
MST-04-SD	Arena Fina	Malo	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
COS-06-SD	Arena Gruesa	Moderado	Esférica	Suban.	Concavo	Caolinita	Subhedral
CEU-06-SD	Arena Media	Moderado	Esférica	Sub.	Concavo	Caolinita	Subhedral
ACC-01-SD	Arena Fina	Moderado	Esférica	Suban.	Concavo>Suturado	Caolinita>Silice	Subhedral
MST-01-SD	Arena Media	Moderado	Esférica	Sub.	Puntual>Longitudinal	Caolinita	Subhedral

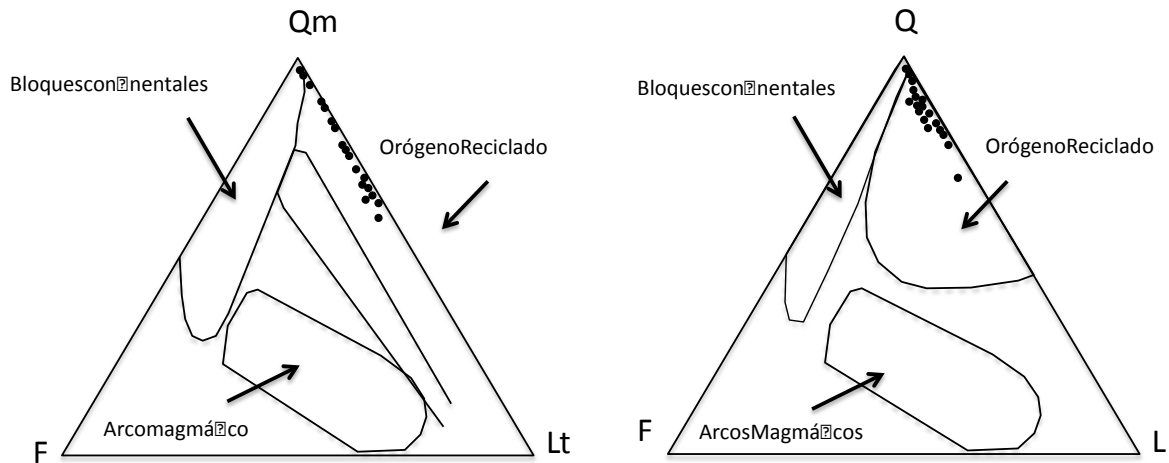
Tabla 7. (Continuación)

Muestras	Rasgos Texturales						
	Tamaño de grano	Selección	Esfericidad	Redondez	Contactos	Cemento	Idiomorfismo
MST-01-SD	Arena Media	Moderado	Esférica	Sub.	Puntual>Longitudinal	Caolinita	Subhedral
MEM-03-SD	Arena Media	Malo	Esférica	Suban.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
QH-10-SD	Arena Fina	Bueno	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
CEU-07-SD	Arena muy Fina	Malo	Esférica	Sub.	Concavo	Caolinita	Subhedral
MST-03-SD	Arena Fina	Malo	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
CEU-05-SD	Arena Media	Malo	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral
COS-02-SD	Arena Media	Bueno	Esférica	Sub.	Concavo>Suturado	Caolinita	Subhedral

Con el objetivo de caracterizar la posible fuente de aporte de sedimentos de la Formación Picacho, se graficó los porcentajes de Cuarzo Total (Qt); Cuarzo monocristalino (Qm); Fragmentos líticos totales+cuarzo policristalino (L); Fragmentos líticos policristalinos totales (Lt) y Feldespatos monocristalinos totales (F), en dos diagramas triangulares propuestos por Dickinson⁸⁷ en los cuales es posible diferenciar los diferentes ambientes de procedencia (Figura 18).

⁸⁷ DICKINSON, W. R. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In New perspectives in basin analysis . 25 p. 1988

Figura 17. Diagrama triangular de Dickinson, clasificación fuente de aporte de sedimentos de la Formación Picacho



Fuente: DICKINSON, W. R. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In New perspectives in basin analysis . 25 p. 1988

5.6 PALINOLOGÍA

La mayoría de las muestras presentaron un recobro muy pobre de palinomorfos. En las muestras pertenecientes a la localidad de Playa Blanca (PLB) se recuperaron algunos palinomorfos tales como *Monoporopollenites annulatus*, *Psilatricolporites* sp., *Psilatriletes* sp. y *Retitriporites* sp., los cuales presentan un amplio rango estratigráfico, abarcando desde el Paleoceno hasta el Plioceno. Esto impide asignar una edad específica para estas muestras.

Por su parte, las muestras analizadas en las localidades Quebrada Honda (QH) y Curva de Cosgua (COS) presentaron un mayor recobro de palinomorfos. En la localidad Quebrada Honda (QH), en la muestra marcada como QH-12-P se recuperaron aproximadamente 35 especies de palinomorfos, la mayoría de los cuales están representadas por 1-2 individuos y tan solo 5 especies están representadas por abundancias mayores a los 10 individuos (Fungi spp.,

Laevigatosporites tibuensis, *Psilatriletes* 25-50, *Retibrevitricolporites* spp. y *Spirosyncolpites spiralis* (Tabla 8).

Tabla 8. Conteo palinoestratigráfico de las muestras tomadas en las localidades Quebrada Honda (QH) y Curva de Cosgua (COS).

PROFUNDIDAD	QH- 12-P	COS- 03-P	COS- 04-P	PROFUNDIDAD	QH- 12-P	COS- 03-P	COS- 04-P
<i>Annutriporites iversenii</i>	1	0	0	<i>Proxapertites psilatus</i>	0	1	0
<i>Bombacacidites brevis</i>	3	3	2	<i>Psilabrevitricolporites</i> sp.	2	0	1
<i>Bombacacidites gonzalezii</i>	0	1	0	<i>Psilamonocolpites medius</i>	0	3	4
<i>Bombacacidites</i> sp.	0	3	0	<i>Psilamonocolpites</i> sp.	0	1	1
<i>Brevitricolpites</i> sp.	0	1	0	<i>Psilaperiporites</i> sp.	0	1	0
<i>Chomotriletes minor</i>	3	0	0	<i>Psilatricolpites</i> sp.	2	0	0
<i>Cicatricosisporites dorogensis</i>	0	0	0	<i>Psilatricolporites</i> sp.	0	2	3
<i>Clavinaapertura</i> sp.	0	1	0	<i>Psilatriletes</i> < 25	4	0	0
<i>Clavapollenites</i> sp.	0	1	0	<i>Psilatriletes</i> sp. 25-50	14	1	4
<i>Clavatricolpites densiclavatus</i>	0	1	1	<i>Psilatriporites</i> sp.	0	3	0
<i>Corsinipollenites</i> sp.	5	0	0	<i>Racemonocolpites</i> spp.	0	1	0
<i>Cyclusphaera scabrata</i>	4	4	6	<i>Retibrevitricolporites grandis</i>	1	1	0
<i>Dinocysts</i> indet.	0	1	1	<i>Retibrevitricolporites</i> sp.	10	2	2
<i>Echiperiporites akanthos</i>	0	0	2	<i>Retimonocolpites</i> sp.	0	3	4
<i>Echiperiporites</i> sp.	2	0	1	<i>Retipollenites</i> sp.	0	1	0
<i>Echitriletes</i> sp.	3	0	0	<i>Retistephanoporites minutiporus</i>	0	1	0
<i>Echitriporites</i> sp.	0	0	0	<i>Retistephanoporites</i> sp.	1	0	0
<i>Foveotriporites</i> sp.	1	0	0	<i>Retitrescolpites magnus</i>	0	1	0
<i>Foram lining</i>	0	1	0	<i>Retitrescolpites</i> sp.	2	2	1
<i>Foveotricolporites rugulatus</i>	0	0	1	<i>Retitricolpites simplex</i>	9	6	4
<i>Foveotricolporites</i> sp.	0	3	0	<i>Retitricolpites</i> sp.	3	1	2
<i>Foveotriporites hammenii</i>	1	0	1	<i>Retitricolporites</i> sp.	4	6	3
<i>Fungi</i>	16	9	30	<i>Retitriporites</i> sp.	1	2	0
<i>Gemmamonocolpites</i> sp.	1	0	0	<i>Rhoipites guianensis</i>	0	0	1
<i>Gemmapollenites</i> sp.	0	0	1	<i>Rhoipites planipolaris</i>	1	0	0
<i>Laevigatosporites tibuensis</i>	10	0	5	<i>Scabratricolporites</i> sp.	1	0	0
<i>Lanagiopollis crassa</i>	0	1	0	<i>Scabratriletes</i> sp.	0	1	1
<i>Longapertites</i> sp.	1	0	4	<i>Sphagnumsporites</i> sp.	0	1	1

Tabla 8. (Continuación)

PROFUNDIDAD	QH- 12-P	COS- 03-P	COS- 04-P	PROFUNDIDAD	QH- 12-P	COS- 03-P	COS- 04-P
<i>M. franciscoi pachyexinatus</i>	0	0	1	<i>Spinizonocolpites grandis</i>	0	8	3
<i>Margocolporites</i> sp.	0	1	0	<i>Spinizonocolpites</i> sp.	1	1	2
<i>Mauritiidites franciscoi franciscoi</i>	2	7	5	<i>Spirosyncolpites spiralis</i>	12	15	4
<i>Mauritiidites franciscoi minutus</i>	1	4	2	<i>Striatopollis catatumbus</i>	0	5	1
<i>Monocolpopollenites ovatus</i>	0	0	1	<i>Striatopollis</i> sp.	1	0	2
<i>Monocolpopollenites</i> sp.	0	1	0	<i>Striatopollis? tenuistriatus</i>	0	7	0
<i>Nothofagidites huertasii</i>	0	0	1	<i>Striatricolpites</i> sp.	1	0	0
<i>Pediastrum</i> sp.	0	60	0	<i>Syncolporites</i> sp.	0	1	2
<i>Perinomonoletes</i> sp.	0	0	1	<i>Tricolpites</i> sp. 1	0	1	0
<i>Podocarpidites</i> sp.	0	1	0	<i>Ulmoideipites krempii</i>	0	3	7
<i>Polypodiaceoisporites</i> sp.	5	1	1	<i>Venezuelites? distinctus</i>	0	1	0
<i>Polypodiisporites</i> sp.	0	6	7	<i>Verrucatotriletes</i> sp.	0	1	0
<i>Proteacidites</i> spp.	0	1	0	<i>Verrutricolporites reticulatus</i>	0	3	0
				<i>Verrutricolporites</i> sp.	0	1	0
				<i>Verrutriletes</i> sp.	2	2	5

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 DEFINICIÓN DE EDAD DE LA FORMACIÓN PICACHO.

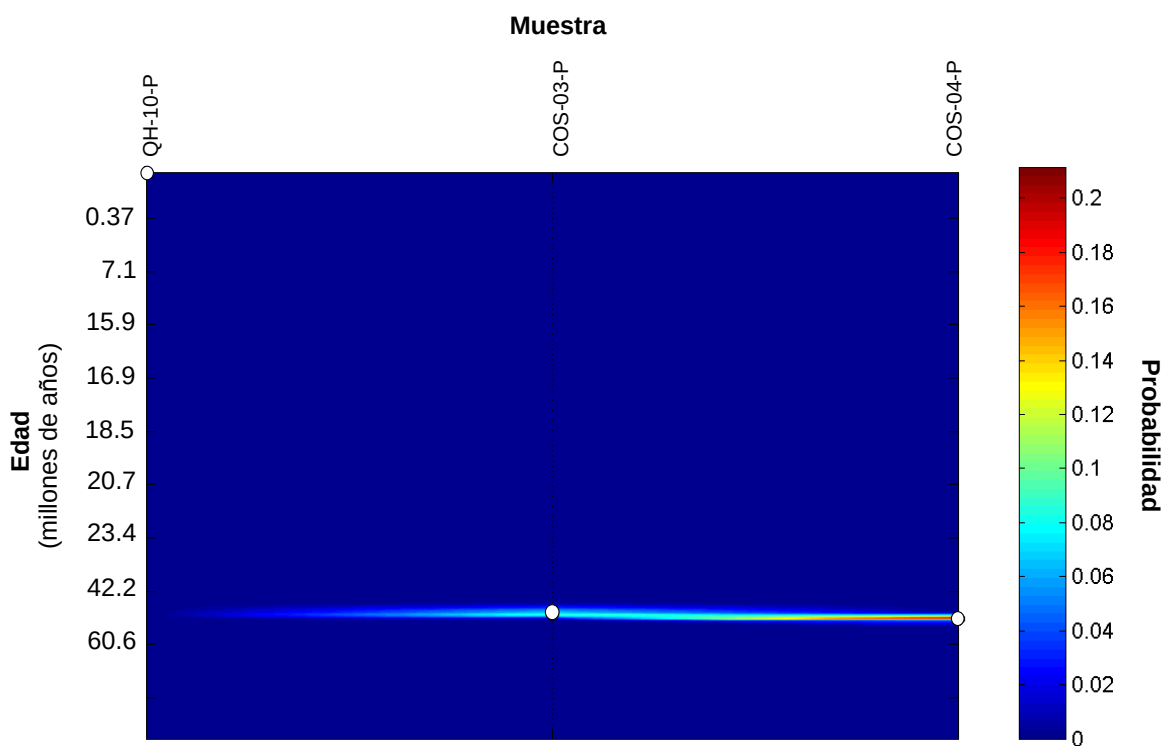
Al comparar la asociación palinológica obtenidas en las muestras de la Quebrada Honda con el esquema de zonación propuesto Jaramillo⁸⁸ se observa que no existe una probabilidad significativa con alguna edad específica (Figura 19). La asociación palinológica obtenida en estas muestras presenta principalmente palinomorfos con rangos estratigráficos muy amplios dentro del Cenozoico.

Por otra parte las dos muestras analizadas en la sección de la curva de Cosgua (COS-03-P y COS-04-P) presentaron asociaciones diversas de palinomorfos, encontrándose 46 y 56 especies de palinomorfos respectivamente. Al igual que en la muestra analizada en la localidad Quebrada Honda, la mayoría de las especies están representadas por 1-2 individuos y únicamente en la muestra marcada como COS-03-P dos especies presentan abundancias relativamente elevadas (*Pediastrum* sp. con 60 individuos y *Spirosyncolpites spiralis* con 15 individuos) (Tabla 8). Al comparar mediante el método de máxima verosimilitud las asociaciones de estas dos muestras contra la zonación de Jaramillo⁸⁹, se obtienen probabilidades relativamente altas de que las dos muestras presenten edades comprendidas entre los 40 y 45 millones de años aproximadamente (Eoceno medio- Lutetiano tardío – Bartoniano temprano) (Figura 18) que correspondería a la zona palinológica T-06. Estos resultados están en concordancia con la edad reportada por Pardo para esta sección.

⁸⁸ JARAMILLO, RUEDA, TORRES, Op. Cit.

⁸⁹ Ibid

Figura 18. Gráfico de probabilidad de edades para las muestras COS-03-P, COS-04-P y QH-10-P, donde 0 es la menor probabilidad y 0.2 es la máxima probabilidad de la edad de la muestra



Es interesante resaltar que en la muestra COS-03-P, la asociación palinológica está dominada el alga *Pediastrum* spp. Este mismo tipo de alga es reportado para las muestras CCS-36, CCS-38, CSS-40, CCS-42 y Picacho-2 también tomadas en la curva de Cosgua. Aunque no se reporta la abundancia total de individuos de *Pediastrum* spp encontrados en cada muestra, las referencias encontradas en el texto sugiere que es muy abundante y dominan la asociación palinológica. *Pediastrum* spp., es un género colonial de alga verde que hace parte del plancton de agua dulce. De acuerdo a Fleming⁹⁰ la abundancia de esta alga en sedimentos

⁹⁰ FLEMING, R. F. Fossil Scenedesmus (Chlorococcales) from the Raton Formation, Colorado and New Mexico, USA. Review of palaeobotany and palynology, 59(1), 6p. 1989

es indicadora de desarrollo de lagos de agua dulce efímeros que pueden ser interrumpidos por migración de canales fluviales.

6.2 DISTRIBUCIÓN DE FACIES E IMPREGNACIÓN

En las cuatro localidades donde se levantó estratigráficamente la Formación Picacho y con base en la descripción se identificaron un total de once (11) litofacies sedimentarias con base en la descripción textural, composicional, estructuras sedimentarias y el contenido orgánico (ANEXO I). A su vez, esta identificación permitió establecer cinco (5) asociaciones de facies (Tabla 9), las cuales se presentan unas sobre las otras conformando sucesiones de facies (Tabla 10), que fueron definidas para la interpretación de los sistemas depositacionales para cada sección levantada (Tabla 11).

Tabla 9. Identificación y descripción de litofacies y asociaciones de facies de la Formación Picacho (Nomenclatura de litofacies de acuerdo a Farrel, 2012).

Litofacies	Asociación	Proceso de depositación
G m: Conglomerados macizos	F1	Flujo de transporte en masa, rápida sedimentación
S m: Areniscas masivas con gradación normal	F2	Flujo con alta carga de sedimento, acumulados de forma rápida por asentamiento en masa de flujo, impidiendo el desarrollo de estructuras de corriente
S lam: Areniscas con laminación plana paralela		Régimen de flujo superior en lechos planos, desarrollada bajo flujos de altas velocidades (Reading., 2009)
sG lam: Arenisca conglomerática con laminación plana paralela		Depositación rápida por acción de flujos depositacionales
S x: Areniscas con estratificación cruzada	F3	Resultado migración de dunas bidimensionales de crestas rectilíneas (forma de fondo transversales, longitudinales) transportadas por tracción en el fondo de una corriente en condiciones de régimen de flujo inferior (Miall, 2006)
SG x: Areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada		Régimen de flujo inferior por acción de flujos gravitacionales

Tabla 9. (Continuación)

Litofacies	Asociación	Proceso de depositación
C lam: Arcillolita con laminación plano paralela	F4	Depositación por suspensión, régimen de flujo bajo
C: Arcillolita		Sedimentos acumulados por suspensión
C biot: Arcillolita con presencia de bioturbación	F5	Depositación por suspensión, eventual flujo de materiales clásticos finos y material orgánico (Boggs, 1987)
C r lam: Arcillolita con relictos de laminación plano paralela		Deposito por suspensión, con eventual flujo de materiales clásticos finos (Boggs, 1987)

Aunque interpretan la Formación Picacho como depositada en ambientes fluviales trezados y hacia el municipio de Paz de rio la interpretan como depositada en ambientes de anteplaya, que el ambiente donde se depositó la Formación Picacho, corresponde principalmente a depósitos fluviales dominados por grava. Por su parte, Osorno⁹¹ establece que en la zona de Paz de Rio el ambiente de depósito de esta Formación corresponde a ríos trezados, mientras que Bayona lo interpreta como una planicie fluvial.

Tabla 10. Sucesión de facies e interpretación de ambientes de la Formación Picacho en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.

Sucesión de Facies	Deposito	Ambiente
F1	Depósito de tracción de fondo de canal	Sistema fluvial trezado con facies proximales y distales
F2+F3	Depósito de barra de canal (Cant, 1982)	
F4+F5	Depósito de planicie de inundación cuando se desarrolla una planicie estable (Catuneanu, 2006)	
F1+F2+F3+F4+F5	Depósito de barra puntual completa, desde el canal hasta el depósito de planicie de inundación	

⁹¹ OSORNO, J. Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia regresiva localizada al noreste de Sogamoso. Tesis de grado, U. Caldas. 102p. 1994

Tabla 11. Asociación de facies para las localidades levantadas.

LOCALIDAD	ASOCIACIÓN
Localidad Cerro el Uvo	F3+F2+F4
Localidad Curva de Cosgua	F1+F2+F3+F4+F5
Localidad Quebrada Honda	F1+F3+F2+F4
Localidad playa Blanca	F1+F3+F2+F4+F5

De acuerdo a la interpretación de facies realizada en este trabajo, es posible sugerir que la Formación Picacho en el área de estudio es el producto de depósitos de un sistema fluvial trenzado con facies proximales a distales. Las facies proximales de este sistema depositacionales se encuentran ubicadas hacia el suroccidente (SW) del área de estudio, mientras que las facies distales se presenta hacia el nororiente (NE). Esta interpretación es adicionalmente soportada por la distribución geográfica de tamaño de grano que será discutida más adelante.

6.2.1 Impregnación. En las cuatro secciones levantadas de la Formación Picacho se encontraron evidencias de impregnación por hidrocarburos. El grado de impregnación varía entre las localidades. En la localidad Cerro el Uvo la impregnación de hidrocarburos corresponde a aproximadamente 16 metros (Figura 18) y se presenta en la parte inferior de la sección levantada. La impregnación es baja y media (nivel 1 y 2) y se concentra en la facies de arenisca con laminación plana paralela (S lam), asociada a canales fluviales en un ambiente de río trenzado (anexo A).

Por su parte, en la Localidad Curva de Cosgua la impregnación de hidrocarburos se concentra en parte inferior y media de la secuencia levantada (Figura 19), el espesor es de aproximadamente 14 metros, con un nivel de impregnación medio (nivel 2). La facies impregnada corresponde a areniscas con estratificación cruzada y conglomerados macizos (Sx y Gm). Hacia la parte media de la sección

la impregnación está restringida a aproximadamente 17 metros estratigráficos y es posible encontrar los tres niveles de impregnación, bajo medio y alto (niveles 1, 2,3) (Figura 21). La facies con impregnación corresponden principalmente a areniscas y conglomerados macizos (G m y Sm) asociadas a canales fluviales en un ambiente de río trenzado (anexo B).

Para la Localidad Quebrada Honda, se encontró que la impregnación está restringida a la parte media de la secuencia (Figura 22). Se distinguen principalmente dos niveles de impregnación, bajo y alto (1 y 3), en un espesor estratigráfico de aproximadamente 3 metros. La facies donde se presenta la impregnación corresponden a conglomerados masivos, areniscas macizas con gradación normal, areniscas con laminación plana paralela y areniscas con estratificación cruzada (G m, Slam, Sm y S x), asociadas a canales fluviales en un ambiente de río trenzado (anexo C).

Finalmente en la localidad de Playa Blanca, hacia la base de la sección se presenta con impregnación baja en un espesor de aproximadamente 2 metros (Figura 23). La facies donde se presenta dicha impregnación corresponde a areniscas con laminación plano paralela (S lam), asociadas a canales fluviales en un ambiente de río trenzado (anexo D).

En términos generales (Figura 23), hacia el sur de la zona de estudio (Localidad Playa Blanca y Localidad Quebrada Honda) los espesores impregnados alcanzan entre 1.5m y 3 m de espesor y están relacionados a la facies Slam, Sx y Gm, Sm, mientras que hacia la parte norte (Localidad Curva de Cosgua y Localidad Paz de Río) el espesor impregnado alcanza entre 14 y 16 metros de espesor y se relaciona con la facies Slam, Sx Gm y Sm. Las facies están amalgamadas y lavadas de lodos porque son de régimen de flujo medio o alto, en esta impregnaciones no hay facies lodosas intercaladas en ellas. Algunos sectores con

facies macizas ocultan la estructura sedimentaria debido a la impregnación de hidrocarburos.

La diferencia de la cantidad de hidrocarburo es que hacia la zona norte (Localidad de Curva de Cosgua y Localidad Cerro el Uvo) la migración es corta debido a que los reservorios están inmediatamente sobre la roca generadora (Fm Chipaque), haciendo que la impregnación sea mayor. En la Localidad Quebrada Honda no se preservan grandes acumulaciones porque las rocas reservorio (Fm Picacho) y sello (Fm Concentración) se encuentran parcialmente erodadas, impidiendo la preservación de la trampa. Hacia la parte sur (Localidad Playa Blanca) la distancia de migración es mayor lo que limita la acumulación de hidrocarburo en este sector.⁹².

⁹² PACHECO, J. Caracterización del sistema petrolífero de las arenas bituminosas en el área de Sogamoso (C.O. de los andes colombianos) mediante correlaciones crudo-roca y modelamiento de sistemas petrolíferos, Universidad Industrial de Santander, 150p. 2015

Figura 19. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Cerro el Uvo para la Formación Picacho donde se detallan las estructuras sedimentarias, intervalos con impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub-ambientes de depósito.

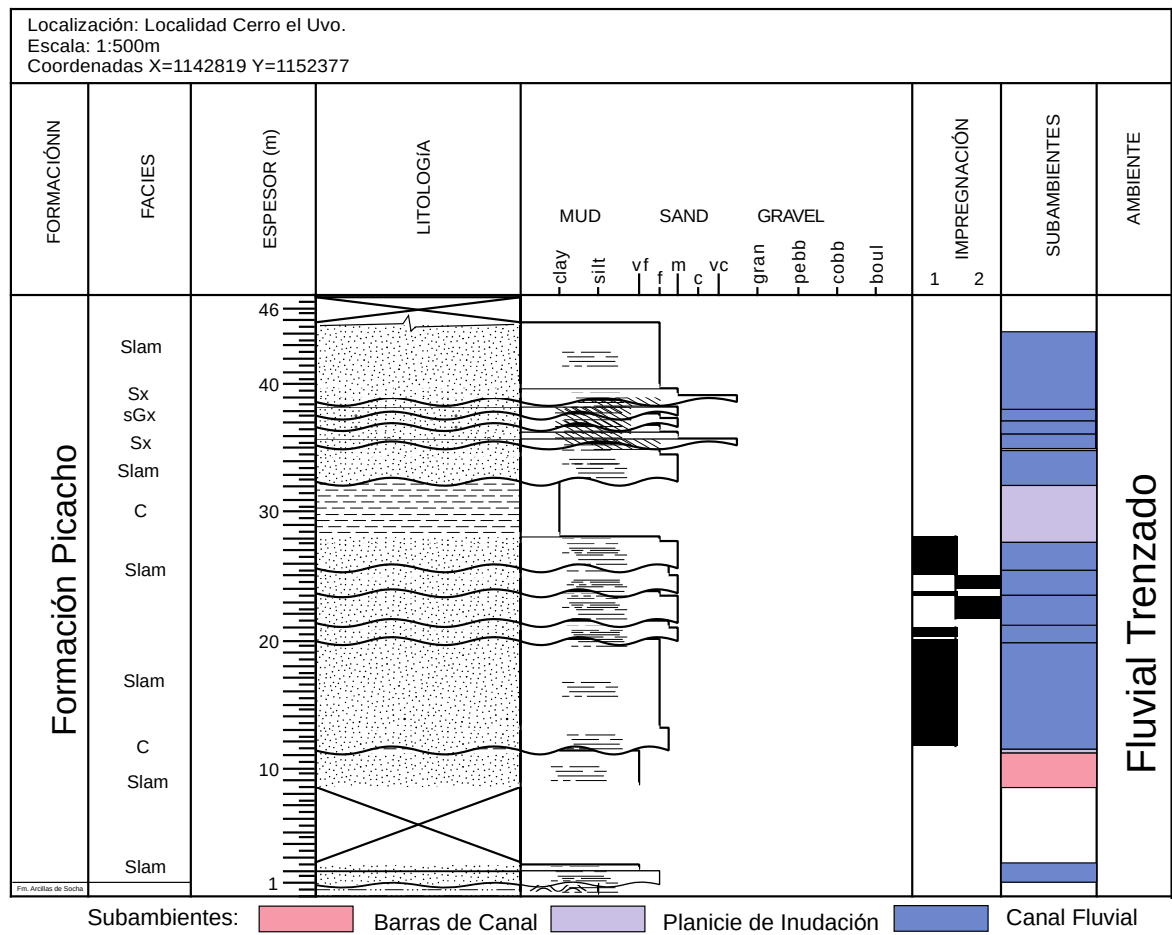
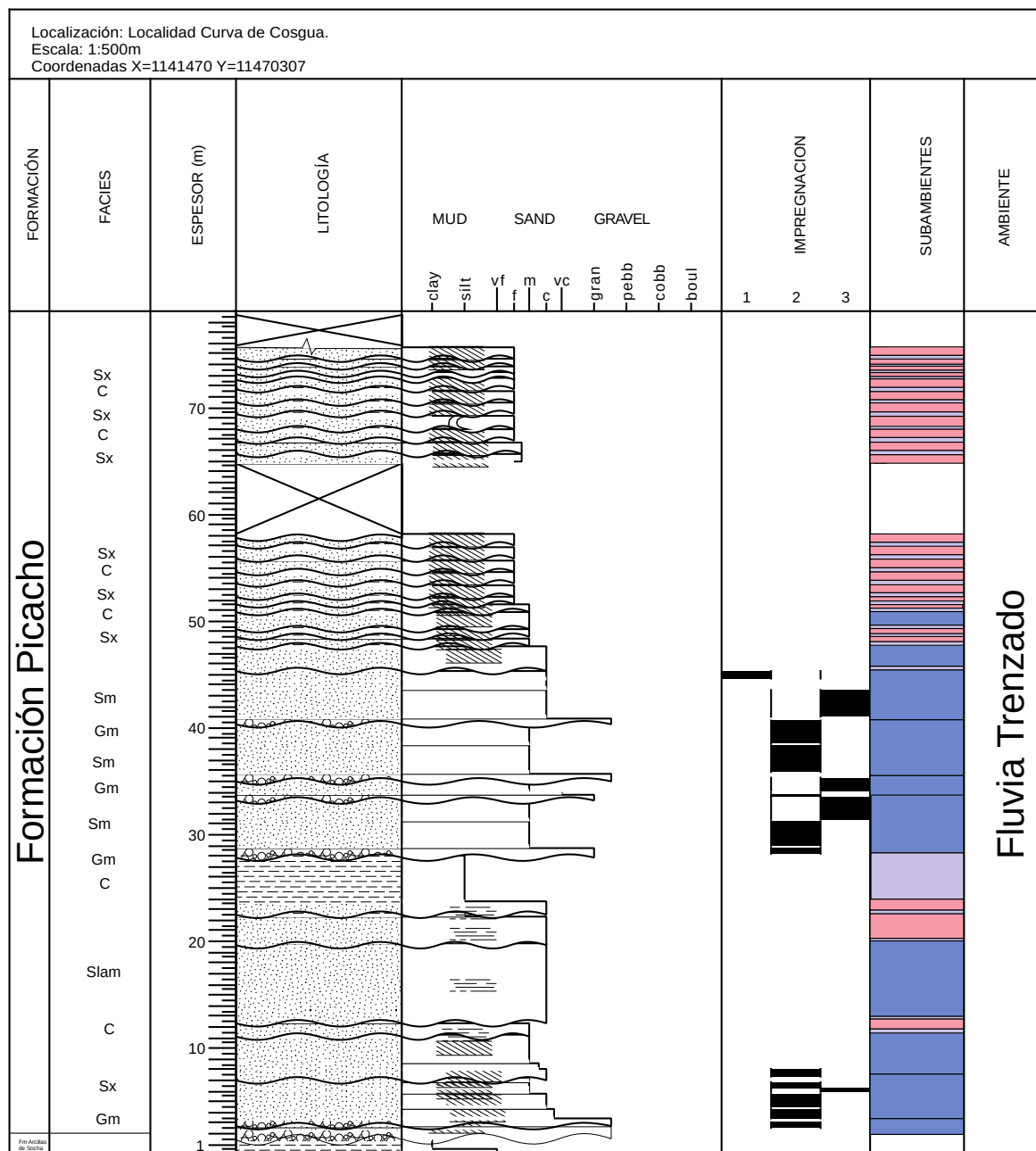


Figura 20. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Curva de Cosgua para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub -ambientes de depósito.



Subambientes:  Barras de Canal  Planicie de Inundación  Canal Fluvial

Figura 21. Columna estratigráfica tipo de la Localidad Quebrada Honda para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies ambientes y sub -ambientes de depósito.

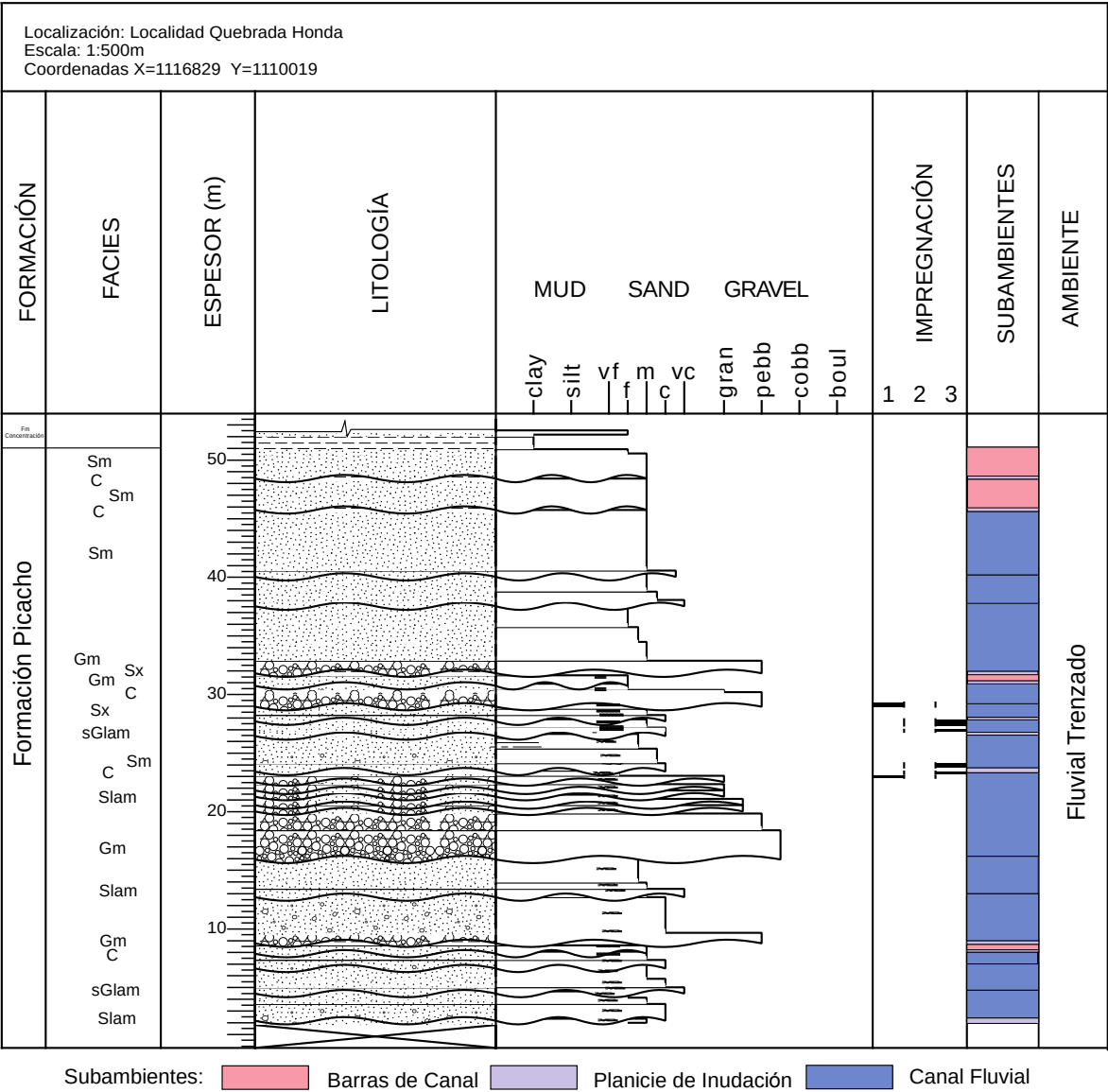
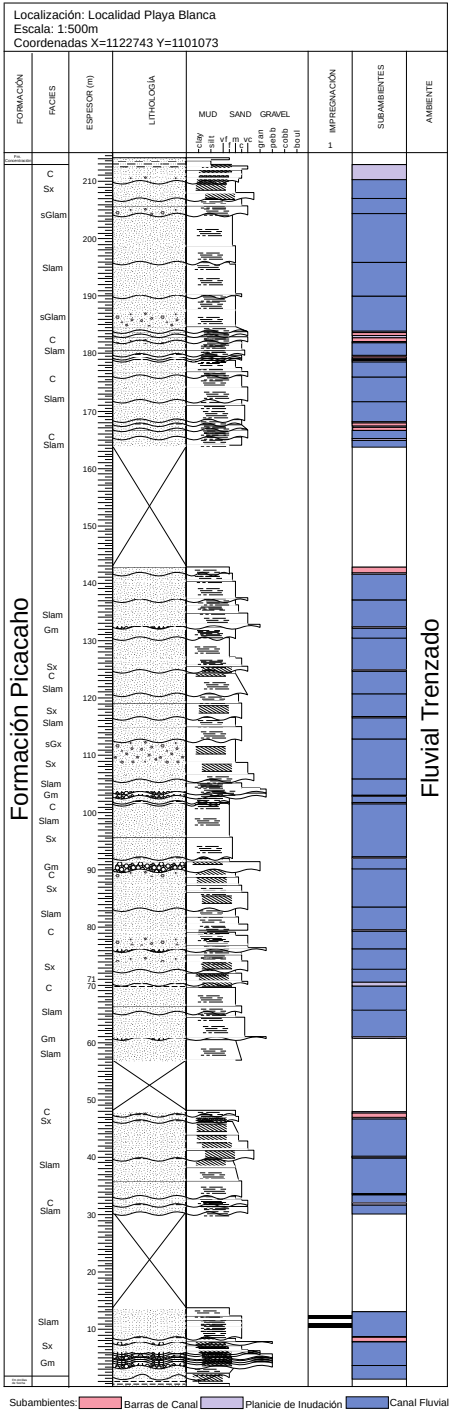


Figura 22. Columna estratigráfica tipo de la localidad Playa Blanca para la Formación Picacho donde se detallan estructuras sedimentarias, impregnación de hidrocarburos, facies, ambientes y sub -ambientes de depósito.



6.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE FACIES Y PROCEDENCIA

Con los datos de distribución granulométrica, paleocorrientes, petrografía y la interpretación de facies se construyó un mapa (Figura 23) que permite interpretar las condiciones de depósito de la Formación Picacho aflorante en el bloque yacente de la Falla de Soapaga.

El análisis de la distribución granulométrica de la Formación Picacho, indica que el tamaño de grano predominante a lo largo de la zona estudio es tamaño arena media. Sin embargo, hacia la parte sur (municipio de Pesca), aproximadamente el 7% está representado por gravas. Hacia la parte media (población de Sogamoso) este porcentaje disminuye alcanzando valores del 2% y hacia la parte norte (Localidad Cerro el Uvo) alcanza únicamente un nivel del 0.2% (Figuras 13 y 23).

En cuanto a la distribución de paleocorrientes de la Formación Picacho, las medidas tomadas a lo largo de la zona de estudio presentan una tendencia de dirección de flujo preferencial hacia nororiente (NE) (Figura 23) con algunas medidas indicando direcciones este-oeste (EW) que podrían ser explicadas como cambios locales en la dirección de flujo los cuales son característicos y muy comunes en ambientes fluviales y específicamente en sistema de ríos trenzados.

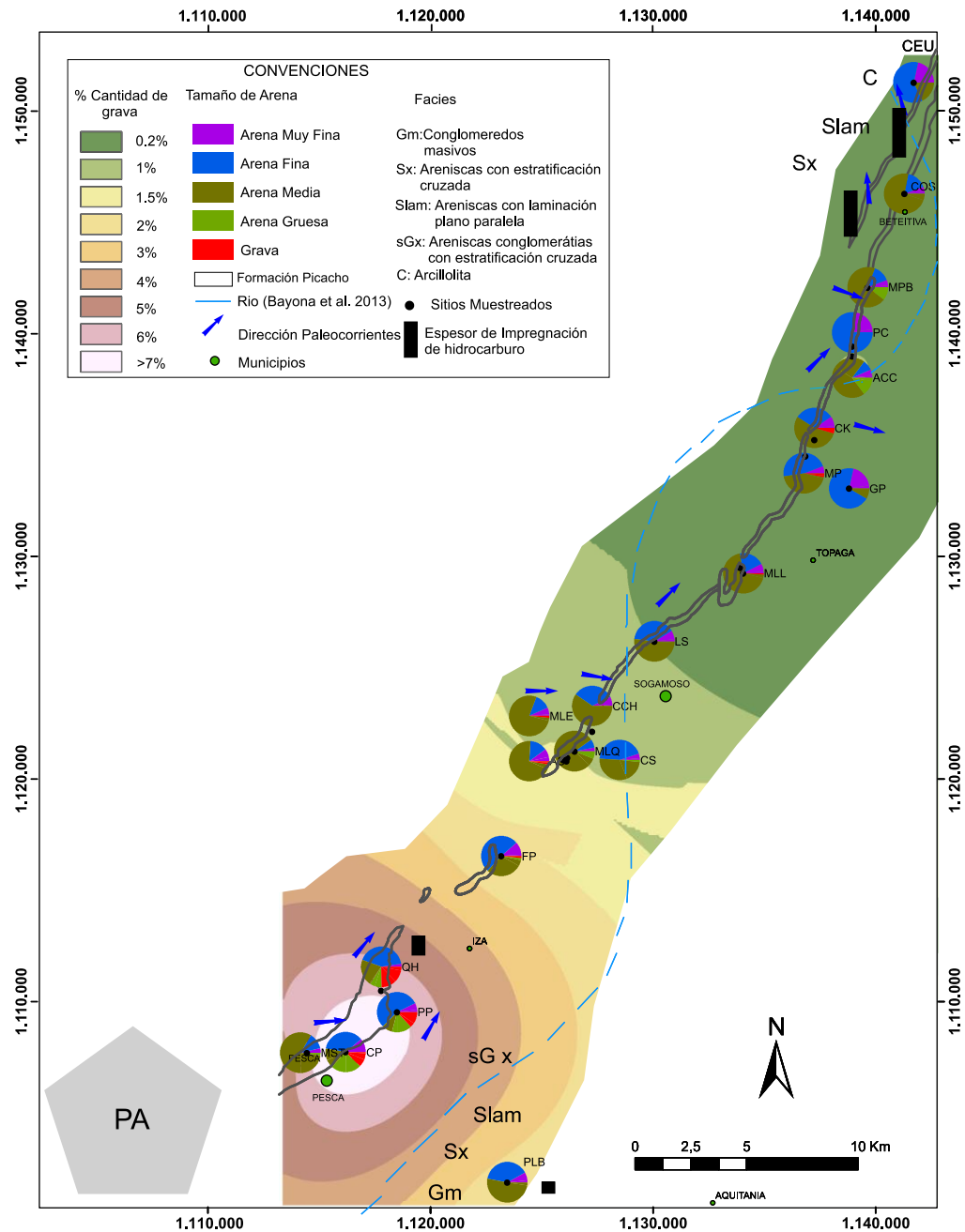
La interpretación de la facies al igual que la distribución del tamaño de grano indican que hacia el sur de la zona de estudio (Figura 24) se presentan facies conglomeráticas (Gm), facies de areniscas con estratificación cruzada (Sx) y areniscas con laminación plano paralela (Slam), también es común la presencia de areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada. Para la parte norte de la zona de estudio la facies está representada por areniscas con estratificación cruzada (Sx), areniscas con laminación plano paralela (Slam) y arcillas (C).

Los resultados de petrografía de las muestras tomadas en las areniscas de la Formación Picacho, indican que hacia la parte norte del área de estudio (localidades Cerro el Uvo y Curva de Cosgua) predominan las cuarzoarenitas, y para la parte sur predominan las sublitoarenitas aunque en la localidad Quebrada Honda (sur del área de estudio) se presenta una muestra de litoarenita. La ubicación de las muestras en los diagramas triangulares de Dickinson (Figura 16), ponen de manifiesto que la fuente de sedimentos para la Formación Picacho correspondería a orógeno reciclado, ya que la mayoría de las muestras están compuestas por cuarzo monocristalino y en muy baja proporción líticos, la mayoría de los cuales cuando están presentes, corresponden a líticos de origen metamórfico y muy eventualmente líticos sedimentarios (Tabla 6).

La integración de los resultados de petrografía, distribución granulométrica, medidas de paleocorrientes adicional a la interpretación de facies permiten sugerir que para el tiempo de depósito de la Formación Picacho, la principal fuente de aporte se encontraba localizada hacia el suroccidente (SW) del área de estudio en un posible paleoalto que ponía en exposición rocas sedimentarias mas madura que fueron retrabajadas por el sistema fluvial responsable del depósito de la Formación Picacho, también podría ser sedimentos provenientes de la Cordillera Central.

En un estudio de proveniencia a partir de circones detríticos realizados los sedimentos de la Formación Picacho presentan principalmente tres poblaciones de circones (175 ma, 200-300 ma y 500-650 ma) que de acuerdo a la interpretación de los autores sugieren una fuente de aporte con afinidad a la Cordillera Oriental, el Macizo de Santander o la margen occidental de la Cordillera Oriental. Sin embargo, los datos de paleocorrientes obtenidos en este estudio sugieren aportes de una fuente localizada al suroeste del área de depósito, lo cual pone en duda el aporte del Macizo de Santander como fuente de la Formación Picacho.

Figura 23. Modelo de distribución de facies, porcentaje de gravas, dirección de paleocorrientes, dirección del río (modificado de Bayona et al., 2013), espesores de impregnación, tamaño de arenas, ubicación del paleoalto en la Formación Picacho



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En la Formación Picacho aflorante en el bloque yacente de la Falla de Soapaga se identificaron cinco (5) asociaciones de facies y once (11) litofacies identificadas como: facies conglomerática (Gm), facies arenosas (Sm, Slam, sGlam, Sx y sGx) y facies arcillosas (Clam, C, Cbiot, Crlam).
- La distribución facial de la Formación Picacho indica acumulación de facies proximales (conglomeráticas) hacia el sur (municipio de Pesca) mientras que hacia el norte (Localidad Cerro el Uvo y Localidad Curva de Cosgua) se presentan facies distales (areniscas medias y finas). La interpretación sedimentológica sugiere que un sistema fluvial trenzado dio origen a los depósitos de esta Formación.
- Las medidas de paleocorrientes indican que la dirección del flujo que produjo los depósitos de la Formación Picacho tenían una orientación nororiente (NE), con ligeras variaciones locales que indican direcciones oeste-este (WE). Estos datos sugieren que la posible fuente de aporte a la unidad se encontraba localizada al suroeste del área de estudio y posiblemente correspondía a la cordillera central o a un paleoalto que ponía en exposición rocas sedimentarias más maduras que fueron re TRABAJADAS por el sistema fluvial responsable del depósito de la Formación Picacho. Esta conclusión está sustentada por el diagrama triangular de Dickinson, donde todas las muestras se localizaron en el campo de orógeno reciclado.
- La impregnación de hidrocarburo generalmente se concentra en la parte media baja de la Formación Picacho. Hacia el norte de la zona de estudio (Localidad Cerro el Uvo y Localidad Curva de Cosgua) se presenta en alto grado (nivel 3) y el espesor de las rocas impregnadas varía entre 14 a 16 metros, mientras que

al sur (Localidad Playa Blanca y Localidad Quebrada Honda) la impregnación es media y baja (nivel 2 y 1) y el espesor varía entre 1.5 a 3 metros.

- La impregnación está concentrada en las facies de areniscas con laminación plano paralela (Slam), arenisca con estratificación cruzada (Sx), conglomerados y areniscas macizas (Sm y Gm). Las cuales se depositan régimen de flujo de medio a alto. Estas facies se presentan generalmente amalgamadas y se asocian a depósito de canales fluviales pertenecientes a un sistema de ríos trenzados.
- Se recomienda complementar los resultados obtenidos en este estudio con el análisis de un mayor número de secciones que permita tener un completo cubrimiento del área donde aflora esta unidad. Es importante realizar más análisis bioestratigráficos con el objetivo de establecer correlaciones confiables, los análisis de procedencia se podría complementar con estudios de circones detríticos los cuales podrían definir con mayor certeza la señal de la áreas fuente y adicionalmente se podría realizar un estudio de geoelectrica para la exploración de hidrocarburo.

BIBLIOGRAFÍA

ANH & Geoestudios. Cartografía geológica cuenca cordillera oriental-sector Soapaga, contrato nº 085, Bogotá. 329p. 2006

ALVARADO, B. & SARMIENTO, R., Informe Geológico sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz del Río, Departamento de Boyacá. Serv. Geol. Nal., Informe 468. Bogotá. 132p. 1944

ALLEN, J. R. L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. *Sedimentary Geology*, 33(4), 237-293p. 1983

BAYONA, G.; CARDONA, A.; JARAMILLO, C.; MORA, A.; MONTES, C.; CABALLERO, V.; MAHECHA, H.; LAMUS, F.; MONTENEGRO, O.; JIMÉNEZ, G.; MESA, A.; VALENCIA, V. Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; response to Caribbean–South American convergence in early Palaeogene time. *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), 285-314p. 2013

BLATT, H., & MIDDLETON, G. M. R. *Origin of Sedimentary Rocks*. New Jersey, Prentice Hall. 782p. 1980

BOGGS, S. *Principles of sedimentology and stratigraphy*: Merrill. Columbus, Ohio, 784p 1987

BOUMA, A. H., KUENEN, P. H., & SHEPARD, F. P. *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation* Amsterdam: Elsevier. 168 p. 1962

CABALLERO, M., Evolución tectono – sedimentaria del sinclinal de nuevo mundo, cuenca sedimentaria valle medio del Magdalena, Colombia, Durante el Oligoceno – Mioceno, Universidad Industrial de Santander. 163p. 2010

CABALLERO, M., Modelo Sedimentológico de la Cuenca Llanos Sur, Ecopetrol S.A. ICP, Presentaciones internas Grupo del proyecto Nuevas Tecnologías para la evaluación del potencial de crudos pesados en la cuenca Llanos Sur. 2013

CANT, D Fluvial facies models and their application. In scholle, P.A, and Spearing, D. R., eds., Sandstone depositional environments. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 31: 115-137p. 1982

CATUNEANU, O. Principles of sequence stratigraphy. Developments in sedimentology: Amsterdam, the Netherlands, Elsevier. 375p. 2006

CHILINGRAIN, G. bitumens, aspahalts and tar sands, Developments in petroleum science 7. Essevier scientific publishing company. Primera edición. .315p. 1978

COLLINSON, J. D. The sedimentology of the Grindslow Shales and the Kinderscout Grit: a deltaic complex in the Namurian of northern England. Journal of Sedimentary Research, 39(1). 221p. 1969

DECELLES, P. G., LANGFORD, R. P., & SCHWARTZ, R. K. Two new methods of paleocurrent determination from trough cross-stratification. Journal of Sedimentary Research, 53(2). 642p. 1983

DE PORTA, N., TABORDA, B., TAYLOR, P., TÉLLEZ, N., & VALENCIA, D. Léxico Capítulo 7 124 Estratigráfico de Colombia: Tertiaire et Quaternaire. Union Internationale Des Sciences Géologiques, Amérique Latine, v.5 620p. 1974

DICKINSON, W. R., & SUCZEK, C. A. Plate tectonics and sandstone compositions. *Aapg Bulletin*, 63(12), 2164-2182. 12p. 1979

DICKINSON, W. R. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In *New perspectives in basin analysis* . 25 p. 1988

D'LITTLE, ARTUR., Evaluación del Potencial de recursos de energía no convencional en Colombia. Reporte interno, ANH. 73-79p. 2008

Ecopetrol. Cinemática de las cuencas subandinas, guía exploratoria de hidrocarburos Piedemontes Andinos y cuencas intramontañas., 165p. 2012

FARRELL, K. M., HARRIS, W. B., MALLINSON, D. J., CULVER, S. J., RIGGS, S. R., PIERSON, J., ... & LAUTIER, J. C. Standardizing texture and facies codes for a process-based classification of clastic sediment and rock. *Journal of Sedimentary Research*, 82(6), 364-378. 2012

FLEMING, R. F. Fossil Scenedesmus (Chlorococcales) from the Raton Formation, Colorado and New Mexico, USA. *Review of palaeobotany and palynology*, 59(1), 6p. 1989

FRIEDMAN, G. M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Research*, 37(2). Pp 327 – 234p. 1967

FOLK, R. L. Petrography of sedimentary rocks. Univ. Texas, Hemphill, Austin, Tex, 170p. 1974

FOLK, R. L., & WARD, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1). 3-26p. 1957

GUERRERO, J., & SARMIENTO, G. Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en exploración petrolera. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences*; Vol. 20 (1996); 3-66p. 1996

JARAMILLO, C.; RUEDA, M.; TORRES, V. A Palynological Zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 46 – 84 p. 2011

INGRAM, R. L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 65(9), 937-938p. 1954

INMAN, D. L. Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Journal of Sedimentary Research*, 19(2). 51- 70p. 1949

KAMMER, A. Estructuras y deformaciones del borde oriental del Macizo de Floresta. *Geología Colombiana-An International Journal on Geosciences*; Vol. 21 65 – 80p. 1996

KRUMBEIN, W. C., & SLOSS, L. L. *Stratigraphy and sedimentation*, San Francisco: Freeman. 660p. 1963

MEYER, M., ATTANASI, E., FREEMAN, A. Heavy oil and natural bitumen resources in geological basins of the world, U.S. geological Survey. 37p. 2007

MIALL, A. D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits: *Earth- science Reviews* v.22, 1-23p. 1985

MIALL, A. D. The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. 4th corrected printing. Springer. 599p. 2006

McKinney, T. F., & Friedman, G. M. Continental shelf sediments of Long Island, New York. Journal of Sedimentary Research, 40(1). 213-245p. 1970

MIDDLETON, G. V. Johannes Walther's law of the correlation of facies. Geological Society of America Bulletin, 84(3), 979-988p. 1973

MIOLA, R.J & WEISER, D. Textural parameters: An evaluation Jour. Sediment. Petrol., v.38(1), 45-53p. 1968

NICHOLS, G., Sedimentology and stratigraphy , Willey-balckwell, 432 p. 2009

ORTIZ, D., BRICEÑO, M. Caracterización de la cadena estratégica de valor para la explotación de arenas bituminosas en Colombia como fuente convencional de petróleo. Tesis pregrado Pontifica Universidad Javeriana. 135 p. 2009

OSORNO, J. Estratigrafía y ambientes de depósito de la secuencia regresiva localizada al noreste de Sogamoso. Tesis de grado, U. Caldas. 102p. 1994

PACHECO, J. Caracterización del sistema petrolífero de las arenas bituminosas en el área de Sogamoso (C.O. de los andes colombianos) mediante correlaciones crudo-roca y modelamiento de sistemas petrolíferos, Universidad Industrial de Santander, 150p. 2015

PARDO, A. & ROCHE, E. Stratigraphy, palinology and paleofacies of the lower Teratiary rocks from the Paz de rio region (Chicamocha river valley, Eastern codillera, Colombia. 34p. 2009

PASSEGA, R. Significance of C.M diagrams sediments deposited by suspensión. *Sedimentology*, V 24, 723-733p. 1997

PUNYASENA, S. W., JARAMILLO, C., DE LA PARRA, F., & DU, Y. Probabilistic correlation of single stratigraphic samples: A generalized approach for biostratigraphic data. *AAPG bulletin*, 96(2), 235-244p. 2012

RAMON, J. C., & CROSS, T. A Correlation strategies and methods in continental strata, Middle Magdalena Basin, Colombia. Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines, Golden. 1997

READING, H. G. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy. Willey-balckwell, 669p. 2009

READING, H. G., & LEVELL, B. K. Controls on the sedimentary rock record. *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*, 36p. 1996

RENZONI, G., ROSAS H., ETAYO F. Geología de la Plancha 191-Tunja. Escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá. 1967

RODRÍGUEZ, D. M., HERNÁNDEZ, O., & KAMMER, A. Modelo estructural de la Falla de Soapaga a partir de correlacion espectral de anomalías gravimétricas y magnéticas en la Cordillera Oriental, Colombia. *Boletín de Geología*, 31(2), 35-50p. 2009

SAYLOR, J. E., HORTON, B. K., NIE, J., CORREDOR, J., & MORA, A. Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Basin Research*, 23(4), 377-402p. 2011

SHEPARD, F. P., & MOORE, D. G. Central Texas Coast Sedimentation: Characteristics of Sedimentary Environment, Recent History, and Diagenesis: PART 2. AAPG Bulletin, 39(8), 1463-1593p. 1955

STOW, D. A. Sedimentary rocks in the field: a colour guide. CRC Press. 320p. 2005

TRAVERSE, A. Paleopalynology. New York, Academia Press, 600p. 1988

ULLOA, C. E., GUERRA, A., & Escobar, R. Geología de la plancha 172 Paz del Río, escala 1:100.000 Ingeominas, Bogotá. 1998

ULLOA, C.; RODRÍGUEZ, E.; FUQUEN, A.; Acosta, J. Geología de la plancha 192, laguna de tota, escala 1:100.000 Ingeominas, Bogotá, 50p 2001

VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico, 6 (1-3) 70p. 1957

VELANDIA, F. Interpretación de transurrencia de las fallas Soapaga y Boyacá, a partir de imágenes Landsat TM. Boletín de Geología, 27(44). 12p. 2005

WALKER, R. G., & JAMES, N. P. (Eds.). Facies models: response to sea level change. Ontario: Geological Association of Canada. 780p. 1992

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 377-392p. 1922

ALLMENDIGER, R., CARDOZO N. Stereonet 9. Disponible en: <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>. 2015

Corel Corporation CorelDraw X5. corelDRAW Graphics suite. Disponible en: <http://www.coreldraw.com/la>. 2010

D. ZERVAS, G.J. NICHOLS, R. HALL, H.R. SMYTH, C. LÜTHJE AND F. MURTAGH, Computers & Geosciences, SedLog, 35, 2151-2159, Disponible en: <http://www.sedlog.com>. 2009

ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. <http://www.arcgis.com/features/>

Google Maps. *Royal Roads University*. Disponible en: <https://www.google.com.co/maps/>. 2014

PUNYASENA, S. W., and DU. Y. Biostratigraphy Disponible en: www.life.illinois.edu/punyasena/download/. 2011

R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>. 2015

ANEXOS

ANEXO A. Columna estratigráfica Cerro el Uvo (LCEU) (Medio magnético)

ANEXO B. Columna estratigráfica Curva de Cosgua (LCC) (Medio magnético)

ANEXO C. Columna estratigráfica Quebrada Honda (LQH) (Medio magnético)

ANEXO D. Columna estratigráfica Playa Blanca (LPLB) (Medio magnético)

ANEXO E. Granulometria muestras (Medio magnético)

ANEXO F. Código en R y Percentiles (Medio magnético)

ANEXO G. Datos paleocorrientes (Medio magnético)

ANEXO. H. Petrografia (Medio magnético)

ANEXO I. Facies (Medio magnético)

ANEXO J. Descripción de facies (Medio magnético)

ANEXO K. Coordenadas (Medio magnético)