



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 15 de Abril de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad, Neiva

El (Los) suscrito(s):

CLARA SILENA RIVERA CHARRY, con C.C. No. 1084259878,

ÁLVARO ANDRÉS RIVERA OLARTE, con C.C. No. 1079181735,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DETALLADO DE LA FORMACIÓN CABALLOS
EN LA SECCIÓN EL JUNCAL DE LA SUBCUENCA DE NEIVA

presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de

Ingeniero De Petróleos _____;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Levantamiento Estratigráfico detallado de la Formación Caballos en la sección el Juncal de la Subcuenca de Neiva

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
RIVERA CHARRY RIVERA OLARTE	CLARA SILENA ÁLVARO ANDRÉS

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CUERVO	ROBERTO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero De Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Programa De Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 120

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general ___ Grabados ___
Láminas ___ Litografías ___ Mapas Música impresa ___ Planos Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas
o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Upper Magdalena Valley</u>	<u>Valle Superior del Magdalena</u>	6. <u>Facies</u>	<u>Facies</u>
2. <u>System track</u>	<u>Sistema encadenado</u>	7. <u>Sedimentary structures</u>	<u>Estructuras sedimentaria</u>
3. <u>Petrographic analysis</u>	<u>Análisis petrográficos</u>	8. <u>Poligonal</u>	<u>Poligonal</u>
4. <u>Sequential stratigraphy</u>	<u>Estratigrafía secuencial</u>	9. _____	_____
5. <u>Eustatic changes</u>	<u>Cambios eustáticos</u>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Dada la importancia socio-económica de la actividad hidrocarburífera es fundamental el estudio de la estratigrafía secuencial ya que nos permite la comprensión de la evolución de las cuencas y nos aporta el conocimiento para del análisis de facies para reconstrucciones de ambientes de sedimentación permitiendo la interpretación de los cambios eustáticos (entrada y salida del mar).

En este documento se encuentra el análisis de estratigrafía secuencial realizada para Formación Caballos sección el Juncal del municipio de Palermo, donde se levantó la columna estratigráfica detallada con un espesor real de 220 metros.



Con las características litológicas y las estructuras sedimentarias presentes se dividió en 17 segmentos, y 9 parasecuencias en la que se determinó un ambiente de llanura costera en la base y tope de la formación (Caballos Inferior y Caballos Superior), hasta plataforma interna en la parte intermedia de la formación (Caballos Medio) y con un ambiente de sedimentación de Transgressive System track a Highstand system track.

Por último, se realizaron pruebas de laboratorio a 3 muestras tomadas en superficie de la Formación Caballos para determinar las propiedades petrofísicas mediante los análisis básicos; permeabilidad y porosidad.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Given the socio-economic importance of the hydrocarbon activity, the study of sequential stratigraphy is fundamental since it allows us to understand the evolution of the basins and provides us with the knowledge for the analysis of facies for reconstruction of sedimentation environments, allowing the interpretation of eustatic changes (entry and exit from the sea).

This document contains the sequential stratigraphy analysis carried out for the Caballos Formation in the El Juncal section of the municipality of Palermo, where the detailed stratigraphic column was raised with a real thickness of 220 meters.

With the lithological characteristics and sedimentary structures present, it was divided into 17 segments, and 9 parasequences in which a coastal plain environment was determined at the base and top of the formation (Caballos Inferior and Caballos Superior), up to the internal platform in the part intermediate formation (Caballos Medio) and with a sedimentation environment from Transgressive System track to Highstand system track.

Finally, laboratory tests were carried out on 3 samples taken on the surface of the Caballos Formation to determine the petrophysical properties through basic analyzes; permeability and porosity.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Vigilada Mineducación



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Firma:

Nombre Jurado:
ISAURO TRUJILLO

Firma:

Nombre Jurado:
NATALIA MUÑOZ

Firma:

“LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DETALLADO DE LA FORMACIÓN
CABALLOS EN LA SECCION EL JUNCAL DE LA SUBCUENCA DE NEIVA”

CLARA SILENA RIVERA CHARRY
ÁLVARO ANDRÉS RIVERA OLARTE

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA, HUILA
2021

“LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DETALLADO DE LA FORMACIÓN
CABALLOS EN LA SECCION EL JUNCAL DE LA SUBCUENCA DE NEIVA”

CLARA SILENA RIVERA CHARRY
ÁLVARO ANDRÉS RIVERA OLARTE

Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al título de ingeniero de
petróleos.

Director

Geólogo ROBERTO VARGAS CUERVO
Profesor titular
Docente de la Facultad de Ingeniería de Petróleos
Universidad Surcolombiana

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA, HUILA
2021

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del evaluador

Firma del evaluador

AGRADECIMIENTOS

Le brindamos nuestro más sincero agradecimiento al profesor Roberto Vargas Cuervo. Geólogo y Director. Gracias por el tiempo que nos dedicó en este proyecto y por colaborarnos en todo.

DEDICATORIA

Le dedicamos este trabajo a nuestros padres, hermanos y a Dios.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. LOCALIZACIÓN GEOGRAFICA, ACCESOS E INFRAESTRUCTURA.....	3
2. MARCO TEORICO.....	8
2.1. AMBIENTES SEDIMENTARIOS.....	9
2.2. AMBIENTES SEDIMENTARIOS MARINOS.....	10
2.2.1. PLATAFORMA CONTINENTAL.....	10
2.2.2. TALUD Y ASCENSO CONTINENTAL.....	11
2.2.3. CUENCAS OCEANICAS.....	12
2.3. ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL. MARGENES CONTINENTALES Y CUENCA.....	14
2.3.1. CAUSAS DE LOS CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR.....	16
2.3.2. ORDENES CICLICOS Y CORRELACIÓN GLOBAL.....	16
2.3.2.1. CICLO DE PRIMER ORDEN O DE INUNDACION CONTINENTAL.....	17
2.3.2.2. CLICLO DE SEGUNDO ORDEN DE DURACION.....	17
2.3.2.3. CICLO DE SECUENCIA DE TERCER ORDEN.....	18
2.3.2.4. CICLOS DE CUARTO ORDEN.....	19

2.4. SISTEMA DEPOSITACIONAL.....	19
2.4.1. LOWSTAND SYSTEM TRACT (LST).....	20
2.4.2. TRANSGRESSIVE SYSTEM TRACT (TST).....	21
2.4.3. HIGHSTAND SYSTEM TRACT (TST).....	22
3. ESTUDIOS PREVIOS.....	23
4. GEOLOGIA REGIONAL.....	35
4.1. BASAMENTO ECONOMICO.....	35
4.2. COBERTURA PRODUCTIVA	36
4.2.1. FORMACIÓN CABALLOS (KC).....	38
5. GEOLOGIA ESTRUCTAL.....	40
5.1. GEOLOGIA ESTRUCTAL LOCAL DE LA ZONA	43
5.1.1. PLIEGUES.....	43
5.1.2. FALLAS.....	43
6. GEOLOGIA LOCAL DE LA ZONA.....	46
6.1. ESTRATIGRAFIA PARA LA ZONA DE ESTUDIO.....	49
6.1.1. MIEMBRO CABALLO INFERIOR.....	51
6.1.2. MIEMBRO CABALLO MEDIO.....	60
6.1.3. MIEMBRO CABALLO SUPERIOR.....	66

7. PETROFISICA.....	71
7.1. ANALISIS PETROGRAFICO MACROSCOPICO PARA LA DETERMINACIÓN TEXTURAL Y MINERALOGICA DE LA FORMACIÓN CABALLOS.....	71
7.1.1. MUESTRA SM – 001 PUNTO 1.....	72
7.1.1.1. LOCALIZACIÓN.....	72
7.1.1.2. CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS Y RELACIONES DE CAMPO.....	73
7.1.2. MUESTRA SM – 002 PUNTO 45.....	75
7.1.2.1. LOCALIZACIÓN.....	75
7.1.2.2. CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS Y RELACIONES DE CAMPO.....	75
7.1.3. MUESTRA SM – 003 PUNTO 10.....	77
7.1.3.1. LOCALIZACIÓN.....	77
7.1.3.2. CARACTERISTICAS MACROSCOPICAS Y RELACIONES DE CAMPO.....	77
7.2. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DE 3 MUESTRAS POR MEDIO DEL POROSIMETRO RUSKA DE EXPANSIÓN DE HELIO.....	79
7.2.1. MATERIALES Y EQUIPOS.....	79
7.2.2. CÁLCULOS.....	80
7.3. DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE TRES MUESTRAS POR MEDIO DEL PERMEÁMETRO RUSKA PARA GASES.....	84
7.3.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	84

7.3.2. CÁLCULOS.....	85
7.4. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS.....	89
7.4.1. ANALISIS POROSIDAD FORMACIÓN CABALLOS.....	89
7.4.2. ANALISIS PERMEABILIDAD FORMACIÓN CABALLOS.....	89
8. DISCUSION DE RESULTADOS.....	90
9. CONCLUSIONES.....	95
10. RECOMENDACIONES.....	97
11. BIBLIOGRAFIA.....	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la zona de estudio	4
Tabla 2. Coordenadas de la poligonal abierta, Formación Caballos, sección el Juncal.....	46
Tabla 3. Localización geográfica de las muestras descritas	53
Tabla 4. Coordenadas de las muestras analizadas, Formación Caballos.....	72
Tabla 5. Coordenadas de la muestra SM-001.....	72
Tabla 6. Composición mineralógica presente en la muestra SM-001.....	73
Tabla 7. Coordenadas de la muestra SM-002.....	75
Tabla 8. Composición mineralógica presente en la muestra SM-002.....	75
Tabla 9. Coordenadas de la muestra SM-003.....	77
Tabla 10. Composición mineralógica presente en la muestra SM-003.....	77
Tabla 11. Datos del núcleo	80
Tabla 12. Datos de la muestra SM – 001.....	80
Tabla 13. Datos del núcleo.....	82
Tabla 14. Datos de la muestra SM – 002.....	82
Tabla 15. Datos del núcleo	83
Tabla 16. Datos de la muestra SM – 003.....	83

Tabla 17: Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM–001.....	85
Tabla 18. Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM – 002.....	87
Tabla 19. Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM – 003.....	88
Tabla 20. Tabla de resultados.....	89

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización general de la cuenca del Valle Superior del Magdalena, donde se muestra la subcuenca de Neiva trabajada para este proyecto. Modificada por Carrera. 2015). Vargas, 2021).....5
- Figura 2.** Ubicación geográfica de la zona de estudio. Espaciomapa de la plancha 323 del Servicio Geológico Colombiano (SGC), (1998).....6
- Figura 3.** Imagen satelital de la zona de estudio de la sección el Juncal donde se muestra la poligonal abierta trabajada. Modificado de vista satelital. (Earth, 2020).....6
- Figura 4.** Localización topográfica de la zona de estudio de la sección el Juncal, ubicado con su respectivo track. Tomado y restituido de la plancha 323 IV C (IGAC, 2002). Modificado por (Vargas, 2021).....7
- Figura 5.** Ambientes sedimentarios y curvas eustáticas, relación con los ambientes deposicionales. Tomado de C. Kendall en: “Clastic herarchies and Eustasy”, 2005. Modificada por (Vargas, 2021).....13
- Figura 6.** Cuatro órdenes de los ciclos estratigráficos. Tomado de Duvel et al (1992)19
- Figura 7.** Modelo de Elevación Digital (MED) sector el Juncal. Se muestra el área del proyecto donde se observa la morfología del piedemonte de la cordillera central diferenciando el basamento de la cobertura productiva. (Fuente: Imagen satélite Landsat)35
- Figura 8.** Secuencia estratigráfica del cretácico.....36

Figura 9. Columna estratigráfica para el Valle Superior del Magdalena. Ecopetrol ICP-2000. Modificado por R. Vargas.2010.....	37
Figura 10. Areniscas de la Formación Caballos.....	38
Figura 11. Capas de arcillolitas intercaladas con areniscas cuarzosas y limolitas ferruginosas.....	39
Figura 12. Rasgos estructurales esenciales del Valle Superior del Magdalena. Modificado y complementado de ESRI TR 86-0014, citado por (Mojica & Franco, 1990).....	42
Figura 13. Mapa geológico donde se muestra las estructuras que afectan el área de estudio. Tomado de la plancha 323 del Servicio Geológico Colombiano (SGC), (1998).....	45
Figura 14. Perfil estructural Formación Caballos, sección el Juncal.....	45
Figura 15. Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Inferior.....	48
Figura 16. Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Medio.....	48
Figura 17. Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Superior.....	49
Figura 18. Plano geológico de la zona de estudio. Se muestra la cartografía geológica de realizada en la sección estudiada. Tomada y restituido de la plancha 323 IV C del IGAC.	50
Figura 19. Columna estratigráfica levantada de la Formación Caballos en el sector el Juncal.....	51
Figura 20. Simbología para rocas presentes en la columna estratigrafica.....	52
Figura 21. Areniscas conglomeraticas de color gris claro amarillentas Tomada por autores.....	54
Figura 22. Lodolitas de color violáceo a gris claro con laminación ondulosa paralela. Tomada por autores.....	55

Figura 23. Arcosas de color rojizo en capas de estratificación fina a media. Tomada por autores.....	56
Figura 24. Areniscas líticas con intercalaciones de lodolitas de color gris amarillento a violáceo en capas de estratificación fina a media. Tomada por autores.....	57
Figura 25. Arcosas grises claro a rosadas localmente oxidadas. Tomada por autores.....	58
Figura 26. Cuarzoarenitas de color gris claro amarillento con presencia de madriguera y restos leñosos. Tomada por autores.....	59
Figura 27. Secuencia de Cuarzoarenitas amarillentas en capa de estratificación media a gruesa. Tomada por autores.....	60
Figura 28. Lodolitas gris verdosa con niveles de oxidación. Tomada por autores.....	61
Figura 29. Lodolitas calcáreas de color gris oscuro, fisiles, duras en capas de estratificación fina. Tomada por autores.....	62
Figura 30. Biomicrita oscuras con niveles de lodolitas fisiles y con capas finas de sideritas. Tomada por autores.....	63
Figura 31. Lodolitas negras fisiles con intercalación de carbón. Tomada por autores.....	64
Figura 32. Biomicritas con fragmentos de fósiles de bivalvos. Tomada por autores.....	65
Figura 33. Arcillolitas de color violáceas semiplásticas. Tomada por autores.....	66
Figura 34. Cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas en capas de estratificación media. Tomada por autores.....	67

Figura 35. Cuarzoarenitas de color gris claro en capas de estratificación media a gruesa. Tomada por autores.....	68
Figura 36. Cuarzoarenitas blanco amarillenta en capas de estratificación gruesa. Tomada por autores.....	69
Figura 37. Cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas con delgados niveles de lodolitas y con presencia de glauconita. Tomada por autores.....	70
Figura 38. Muestra SM – 001.....	74
Figura 39. Muestra SM – 002.....	76
Figura 40. Muestra SM – 003.....	78
Figura 41. Porosímetro Ruzka de expansión de helio.....	80
Figura 42. Permeámetro Ruska para gases.....	84
Figura 43. Grafica de permeabilidad en función del inverso de la presión promedio. Muestra SM001.....	85
Figura 44. Grafica de permeabilidad en función del inverso de la presión promedio. Muestra SM002.....	87
Figura 45. Grafica de permeabilidad en función del inverso de la presión promedio. Muestra SM003.....	88
Figura 46. Ambiente deposicional de la Formación Caballos en la subcuenca de Neiva. Modificada de ambientes de depositación, (Pérez & Días, 2014). (Vargas, 2021)	90

Figura 47. Crevasse - splay deposit en Caballos Inferior. Tomado de diagrama de bloques de depósitos de canales y llanuras de inundación de ríos repertantes, (McBride & Caffey, 1979)...92

Figura 48. Ambientes de depositación de los tres miembros de la Formación Caballos. Modificada de ambiente marino (Melo & Gómez, 2015). (Vargas, 2021).....93

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Plano 1/4. “localización restituida sección el Juncal” E. 1:15000

Anexo B. Plano 2/4. “topográfico restituida sección el Juncal” E. 1:7000

Anexo C. Plano 3/4. “geológico restituida sección el Juncal” E. 1:5000

Anexo D. Plano 4/4. Columna estratigráfica detallada de la Formación Caballos en el sector el Juncal E. 1:300

RESUMEN

Dada la importancia socio-económica de la actividad hidrocarburífera es fundamental el estudio de la estratigrafía secuencial ya que nos permite la comprensión de la evolución de las cuencas y nos aporta el conocimiento para del análisis de facies para reconstrucciones de ambientes de sedimentación permitiendo la interpretación de los cambios eustáticos (entrada y salida del mar).

En este documento se encuentra el análisis de estratigrafía secuencial realizada para Formación Caballos sección el Juncal del municipio de Palermo, donde se levantó la columna estratigráfica detallada con un espesor real de 220 metros. Con las características litológicas y las estructuras sedimentarias presentes se dividió en 17 segmentos, y 9 parasecuencias en la que se determinó un ambiente de llanura costera en la base y tope de la formación (Caballos Inferior y Caballos Superior), hasta plataforma interna en la parte intermedia de la formación (Caballos Medio) y con un ambiente de sedimentación de Transgressive System track a Highstans system track.

Por último, se realizaron pruebas de laboratorio a 3 muestras tomadas en superficie de la Formación Caballos para determinar las propiedades petrofísicas mediante los análisis básicos; permeabilidad y porosidad.

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION

Continuando con el desarrollo de las investigaciones y los aportes obtenidos para el Valle Superior del Magdalena (VSM), liderados por el Museo Geológico y del Petróleo con el apoyo del grupo de investigación Geociencias, Infraestructura, Productividad y Medio Ambiente (GIPE) de la Universidad Surcolombiana, se desarrolló el trabajo de grado “LEVANTAMIENTO ESTRATIGRÁFICO DETALLADO DE LA FORMACIÓN CABALLOS EN LA SECCION EL JUNCAL DE LA SUBCUENCA DE NEIVA”

Vargas (2016) la Subcuenca de Neiva que hace parte de la cuenca del Valle Superior del Magdalena es un área con altos índices de exploración y producción de hidrocarburos en el país, siendo esta de gran interés para la industria petrolera por su capacidad como rocas generadoras, almacenadoras y por su extensión geológica sobresalen las arenas, areniscas, calizas y dolomitas.

Las areniscas son de gran importancia en la industria petrolera catalogadas como roca almacén, ya que poseen alta porosidad y permeabilidad, que permiten almacenar el fluido y el paso a través de ellas.

Corrigan (1967) dice que “El Valle Superior del Magdalena la Formación Caballos está constituida por unas areniscas basales de edad Aptiano-Albiano” (Pag. 1). La Formación Caballos a escala regional se determina como el tope de las primeras arenas por debajo de las margas, lodolitas y calizas de la Formación Villeta.

El presente proyecto de grado se ejecutó en la Subcuenca de Neiva, que cubre la parte Oriental del Valle Superior del Magdalena, seleccionando una zona que no se ha realizado estudios previos sobre levantamiento estratigráfico secuencial de la Formación Caballos sector el Juncal y que se consideran importante para poder tener una secuencia ordenada.

Este trabajo se basa en el estudio de las rocas reservorio de la Formación Caballos que cubre la sección geológica que se encuentra entre la carretera de la Hacienda Buenavista y la Finca el Cucharo del Juncal perteneciente al municipio de Palermo Huila, y consistió en el levantamiento estratigráfico de la unidad arenosa de la Formación Caballos, reconociendo sus ambientes de sedimentación, los diferentes tipos de litología, las unidades litoestratigráficas y un análisis de la estratigrafía secuencial basado principalmente en las estructuras sedimentarias presentes. Con esto se elaboró la columna estratigráfica detallada a escala 1:300 de base a tope como objetivo general de este trabajo y se obtuvo la curva eustática la cual es representativa de las variaciones del nivel del mar y el ambiente sedimentario de depósito.

Para la realización se inicia localizando la zona de estudio en la plancha geológica 323 específicamente en la Formación Caballos, observando los sectores donde afloran para poder realizar el levantamiento estratigráfico; luego se procede a visitar estas zonas y hacer reconocimiento de campo, en el cual se determinó que la zona del Juncal fue viable.

Se realizaron cuatro salidas de campo al sector el Juncal donde se efectuó el reconocimiento de los afloramientos de cuarzoarenitas, lodolitas, arcillolitas, areniscas, calizas, biomicritas, arcosas y sideritas en este sector, con el objetivo de realizar la poligonal abierta utilizando brújula, GPS y hip-chain en la cual se tomaron 48 puntos de control geológico y se recolectaron las muestras para sus respectivas descripciones.

El resultado final se encuentra representado en una columna estratigráfica detallada alcanzando un espesor real de 220 metros. De acuerdo con las características litológicas y las estructuras sedimentarias presentes se dividió en 17 segmentos, y 9 parasecuencias con base en la interpretación de esta información se construyó la curva eustática la cual muestra para la Formación Caballos un ambiente de llanura costera hasta plataforma interna y asociándolo a un ambiente de sedimentación de Transgressive System Track a Highstands System Track.

Como objetivos específicos se realizó la cartografía geológica de la sección Hacienda Buenavista y Finca el Cucharó a escala 1:5000, la construcción de la curva eustática y la elaboración de las pruebas de laboratorio a 3 muestras tomadas en superficie para determinar las propiedades petrofísicas mediante los análisis básicos; permeabilidad y porosidad.

Corrigan (1967), Beltran y Gallo (1968) establecen que “tradicionalmente la Formación Caballos ha sido dividida en tres miembros de carácter litológico” (Pag. 2).

Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo a esta unidad han permitido complementar y mejorar la descripción de esta misma. Flórez & Carrillo (1994) reestablecieron la formación caballos, ahora, estando “redefinida y dividida en tres unidades llamadas; formación Alpujarra (caballo inferior), el Ocal (caballos medio) y Caballos (caballos superior)” (Pag. 3). En el subsuelo se ha usado esta división desde al área de Neiva (Campos San Francisco y Santa Clara), Yaguará (Los Mangos) y Aipe (Balcón) hasta las áreas de Ortega (campos Ortega, Quimbaya, etc.) y Alpujarra. En este trabajo se utiliza la terminología tradicional dicha por Vergara et al. (1995) para denominar los tres miembros informales como “Caballos Inferior, Medio y Superior dado que en la industria petrolera es más ampliamente usada la nomenclatura sensu” (Pag. 1).

1.2. LOCALIZACIÓN GEOGRAFICA, ACCESOS E INFRAESTRUCTURA

El trabajo de grado se realizó en el sector noroccidental del distrito el Juncal, localizado en el sector centro del departamento del Huila municipio de Palermo corregimiento el Juncal, y más específicamente sobre el carreteable y drenajes asociados al carreteable Hacienda Buenavista y Finca el Cucharó, delimitada por un polígono cartografiado en la plancha 323 IV C del IGAC y corresponde a las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 1
Coordenadas geográficas de la zona de estudio

Punto	Norte	Este
X1	808600	852000
X2	808600	857000
X3	806600	857000
X4	806600	852000

A la zona se accede por la vía pavimentada que de Neiva conduce al municipio de Yaguara hasta el Km 13 y de ahí se gira al costado derecho para tomar el carreteable destapado con el corregimiento el Juncal (Vereda la Sardinata), el cual va paralelo a los canales de distrito de riego de este corregimiento, este carreteable conduce hasta los predios de la Hacienda Buenavista. De este punto se continua por un carreteable de tercer orden y con una longitud de 3.4 km, la cual fue la sección estratigráfica central para el desarrollo de este proyecto. (Véase figura 3)

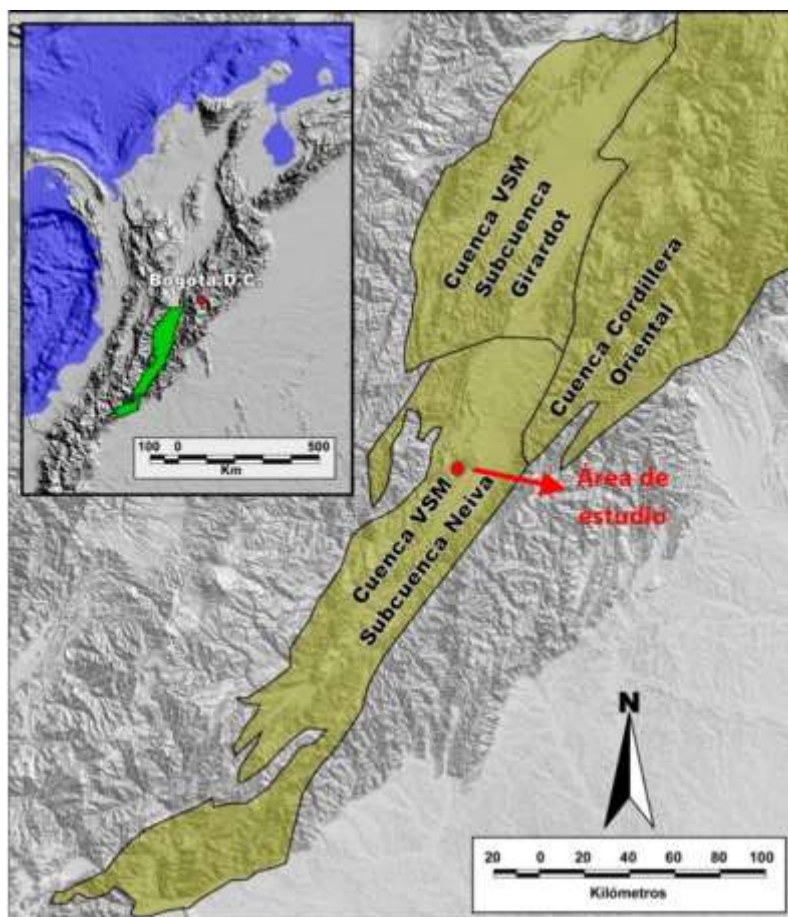


Figura 1. Localización general de la cuenca del Valle Superior del Magdalena, donde se muestra la subcuenca de Neiva trabajada para este proyecto. Tomada de (Carrera, 2015). Modificada por (Vargas, 2021).

La base cartográfica utilizada para este proyecto fue consultada y adquirida al servicio Geológico Colombiano (SGC) utilizando la plancha geológica 323 a escala 1:1000 y el mapa topográfico 323-IVC del Instituto Geológico Agustín Codazzi (IGAC); así también se realizó la restitución topográfica por intermedio del sistema de información geográfica para sacar un plano base topográfico a escala 1:7000, así mismo, la información geológica de estas planchas fue unificada en un solo plano geológico a escala 1:5000 para obtener más fácilmente la información geológica.

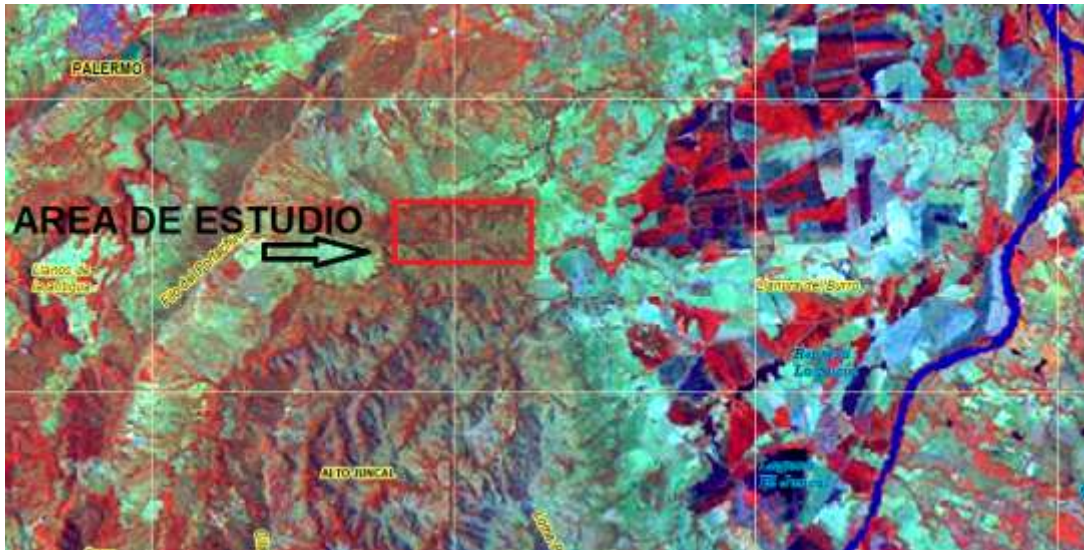


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Espaciomapa de la plancha 323 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (1998)



Figura 3. Imagen satelital de la zona de estudio de la sección el Juncal donde se muestra la poligonal abierta trabajada. Modificado de vista satelital (Earth, 2020).

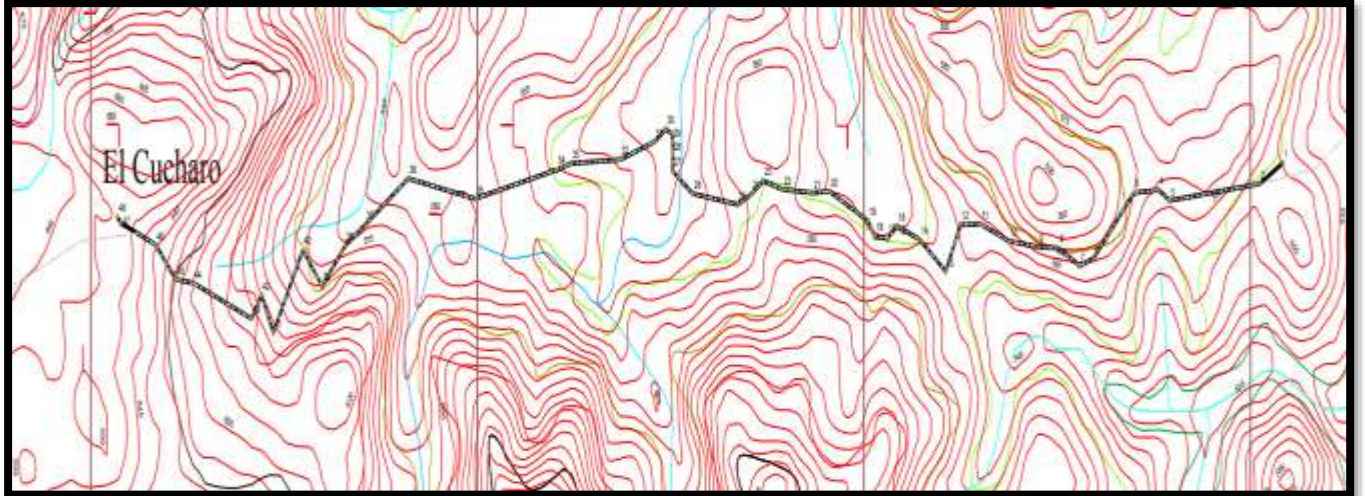


Figura 4. Localización topográfica de la zona de estudio de la sección el Juncal, ubicado con su respectivo track. Tomado de la plancha 323 IV C (IGAC, 2002). Modificado por (Vargas, 2021).

2. MARCO TEORICO

La estratigrafía secuencial descrita por Schlumberger (2008) como aquella que se ocupa del estudio de los depósitos sedimentarios que actúan como relleno de cuencas, denominados secuencias, son interpretados en un marco de eustatismo, sedimentación y subsidencia, a través del tiempo para correlacionar los estratos y predecir la estratigrafía de las zonas relativamente desconocidas. Las secuencias tienden a mostrar la ciclicidad de las variaciones del nivel relativo de los mares y discordancias generalizadas, procesos de sedimentación y fuentes de sedimentos, el clima y la actividad tectónica con el tiempo. El estudio de la estratigrafía secuencial contribuye a la comprensión exhaustiva de la evolución de las cuencas, pero además permite las interpretaciones de las rocas generadoras y las rocas yacimiento potenciales, tanto en las áreas de frontera (que cuentan con datos sísmicos pero pocos datos de pozos) como en las provincias hidrocarburíferas más maduras. La predicción de la continuidad de los yacimientos es actualmente uno de los temas clave en las provincias hidrocarburíferas maduras, en las que se está aplicando la estratigrafía secuencial. Este campo se originó en la década de 1960, con el estudio de la estratigrafía de los Estados Unidos continentales donde fue posible correlacionar numerosas discordancias a lo largo de una gran extensión, y condujo a establecer que la presencia de discordancias importantes podría señalar la existencia de eventos contemporáneos de escala global. Asimismo, Schlumberger (2008) describe que, a través de la estratigrafía secuencial, fue posible comparar entre sí los sedimentos ampliamente separados presentes entre las discordancias correlacionables. Los estudios de afloramientos y líneas sísmicas corroboraron estos conceptos, que un principio recibieron el nombre de "estratigrafía sísmica" y que fueron publicados en forma generalizada en 1977. El estudio posterior de las líneas sísmicas condujo a la interpretación de la geometría o la arquitectura de los eventos sísmicos, como representantes de estilos particulares de

sedimentación y ambientes depositacionales, y a la integración de dichas interpretaciones con los datos derivados de los registros de pozos y los núcleos. Debido a la naturaleza simultánea y competitiva de las actividades de investigación, numerosas compañías petroleras y grupos académicos utilizan la terminología de la estratigrafía secuencial de manera diferente y continuamente se incorporan nuevos términos.

Para el desarrollo de este trabajo se consultó ampliamente el concepto de estratigrafía secuencial, los ambientes sedimentarios y facies que involucran las rocas objeto de este estudio. A continuación, se emiten algunos conceptos tenidos en cuenta.

2.1.AMBIENTES SEDIMENTARIOS

Vargas, Pérez y Díaz (2014) mencionan que los estudios de los ambientes de sedimentación proporcionan a la industria del petróleo el conocimiento sobre los sucesos sedimentarios ocurridos y que llevaron a cabo la existencia de las formaciones productoras, generadoras y sello; en este documento son estudiadas las rocas productoras de la Formación Caballos sección el Juncal, perteneciente a la Subcuenca de Neiva. Los ambientes sedimentarios para Arche (2010) son zonas de depositación en la geografía con características uniformes en donde a través de procesos geológicos y condiciones ambientales como el transporte y depositación contribuyen a la creación del sedimentos, también son la herramienta que permite la interpretación de la historia de las rocas sedimentarias cuya información proporciona la construcción de la curva eustática que mediante características litológicas nos muestra la formación de una secuencia estratigráfica, es por tal motivo que estos conceptos son considerablemente importantes para el presente proyecto de grado y se explicaran a continuación:

2.2.AMBIENTES SEDIMENTARIOS MARINOS

La zona de estudio fue depositada en ambientes marinos específicamente en la zona de plataforma interna cuya pendiente alcanza los 0.03° - 0.1° con profundidades de decenas de metros con acción de marea baja.

Para Pérez y Díaz (2014) los procesos sedimentarios presentan siempre una influencia geográfica, ya que están definidos por una serie de factores físicos, biológicos y químicos, formando lo que se denomina ambiente sedimentario. El conjunto de estas características imprime al sedimento o facies sedimentaria, unas propiedades que les hacen diferenciables al resto de los sedimentos depositados en otros ambientes.

Los elementos más importantes que definen los ambientes sedimentarios marinos denominados así por Pérez y Díaz (2014) son: fisiografía del medio, energía, clima, aporte de sedimento y cambios del nivel del mar. La fisiografía del medio define y limita las dimensiones del medio, geometría y profundidad. La energía comprende factores como la oceanografía (corrientes geostroficadas, olas, mareas, tormentas) hasta otros como la tectónica. El clima, que a su vez puede condicionar algunos aspectos de la oceanografía, así como la naturaleza del aporte de sedimento y el volumen de material aportado. El aporte de sedimento afecta a la composición de los materiales procedentes de ella, y al volumen de sedimento. Las áreas fuentes pueden ser externa (terrestre o atmosférica) e internas (p.e producción biológica marina).

2.2.1. PLATAFORMA CONTINENTAL

Las plataformas continentales como dice GMA (2013) se desarrollan alrededor de las áreas continentales, y se extienden desde el ambiente de litoral hasta el talud continental. Es aquella zona formada por aguas someras que desciende suavemente hasta su interrupción brusca. La anchura de la plataforma varía considerablemente, desde unos pocos hasta más de 1000 km y

aunque el fin de la plataforma está a más o menos 200 m de profundidad, puede variar de unos pocos metros a más de 300 m. Presenta gradientes suaves (0.11 a 1.1 grados), salinidades normales y está afectada por un amplio rango de procesos físicos (corrientes de mareas, oleaje,...). Las plataformas continentales presentan un perfil que es una superficie de equilibrio entre la erosión y la sedimentación. GMA (2013), uno de los factores principales que controlan la formación de facies sedimentarias en este ambiente sedimentario es el régimen hidráulico. Desde este punto de vista se diferencian tres tipos de plataformas: dominadas por mareas, por el oleaje y tormentas, y por corrientes oceánicas.

Las plataformas continentales se subdividen en cinco ambientes: llanura costera, shoreface, interna, media y externa.

2.2.2. TALUD Y ASCENSO CONTINENTAL

De acuerdo con el GMA (2013) el talud continental corresponde a la provincia fisiográfica definida entre el borde de plataforma (aproximadamente 100-200 m) y la cuenca (1.400 a 3.200 m) y se caracteriza por presentar los gradientes más altos en los márgenes continentales. Es la parte central del margen continental y generalmente se localiza allí donde tiene lugar la transición entre la corteza continental y la corteza oceánica. El ascenso continental representa la provincia fisiográfica de transición entre margen continental y los ambientes marinos profundos.

Generalmente sus pendientes son más suaves que las del talud continental y su límite externo es variable (1.400 a 4.000 m). Los elementos morfo sedimentarios más característicos de los ambientes de talud y ascenso continental son los valles submarinos (cañones, canales, cárcavas...) los cuales representan las principales vías de transferencia de sedimento hacia los ambientes marinos profundos. Estos valles presentan una morfología abrupta, son estrechos con paredes de

gran pendiente, con un corte transversal en forma de "V" y "U" y generalmente están desarrollados perpendicularmente al margen continental.

GMA (2013), La mayoría del material que se acumula en el talud superior es generalmente inestable y tiende a moverse mar adentro. Tales movimientos pueden clasificarse de acuerdo al grado de deformación interna de la masa de sedimento que es movida. Estos varían entre deslizamientos, en los cuales la deformación es mínima y las corrientes de turbidez, en los que el sedimento se desplaza como una suspensión turbulenta. Los depósitos acumulados en las zonas de talud y ascenso continental pueden cubrir toda una gama de sedimentos que va desde turbiditas (grava, arena, limo y fango), masas deslizadas, arenas de canal, arenas de desbordamiento de borde de plataforma, conglomerados organizados, sedimentos de corrientes de fondo, fangos de talud, hemipelagitas. Estos conjuntos de sedimentos pueden ser agrupados en tres grupos en función del tipo de proceso que los origina: resedimentados (flujos en masa, flujo de cantos, flujos granulares, flujos turbidíticos...), deposición hemipelágica (o sedimentación diferencial que consiste en la sedimentación lenta y continua de partículas a través de la columna de agua) y corrientes de fondo.

2.2.3. CUENCAS OCEÁNICAS

El término de cuenca, por parte de Pérez y Díaz (2014) es un área deprimida sin salidas en superficie. Este término presenta una aplicación muy amplia, pero desde el punto de vista morfosedimentario, la cuenca representa el ambiente marino profundo que se desarrolla a continuación del margen continental. Si la cuenca se desarrolla sobre corteza oceánica entonces este ambiente marino también recibe el nombre de "llanura abisal". Morfológicamente, son áreas relativamente planas, donde pueden llegar a prolongarse los valles submarinos desarrollados inicialmente en los márgenes continentales. Así mismo, en estos ambientes se identifican los

denominados canales medio-oceánicos que son valles paralelos o subparalelos al margen continental que presentan recorridos longitudinales de cientos a miles de kilómetros, pudiendo actuar de vías de transferencia de sedimento de una cuenca a otra.

Desde el punto de vista sedimentológico Pérez y Díaz (2014) representan las áreas donde tiene lugar la deposición final de aquellos sedimentos que son transportados desde el continente y desde el propio margen continental. La revisión del estado actual de los conocimientos sobre la sedimentación en las cuencas oceánicas del Mediterráneo, Caribe, Atlántico noroccidental, y Pacífico indican que en estos ambientes sedimentarios se depositan principalmente depósitos turbidíticos, de flujos de derrubios, hemipelágicos y pelágicos.

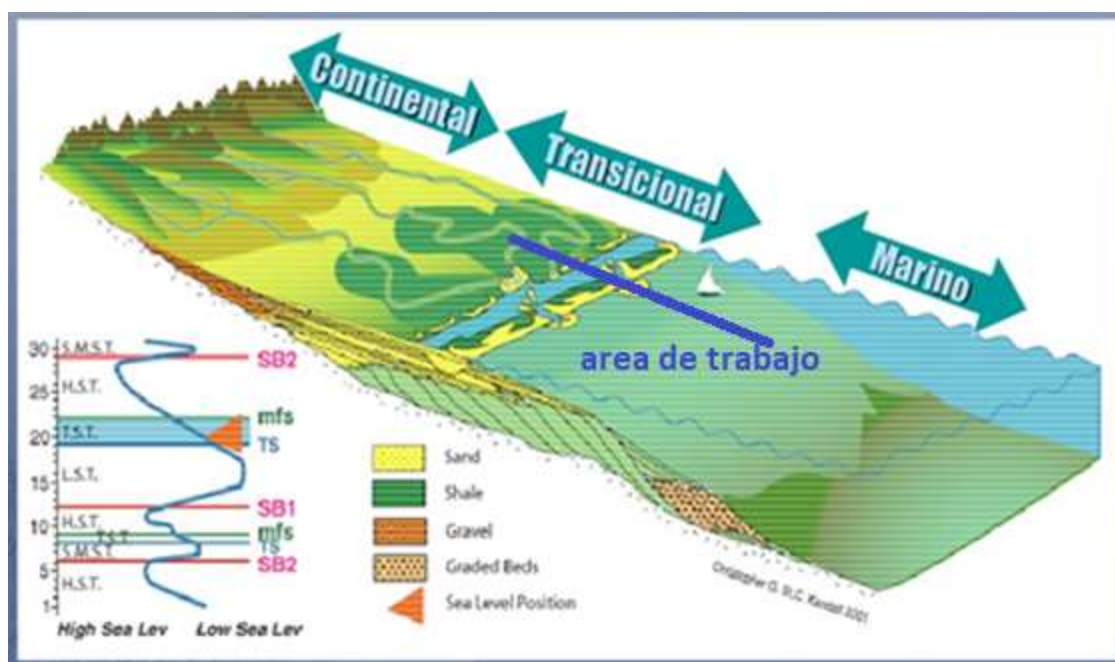


Figura 5. Ambientes sedimentarios y curvas eustáticas, relación con los ambientes deposicionales. Tomado de C. Kendall en: "Clastic hierarchies and Eustasy", 2005. Modificada por (Vargas, 2021)

2.3. ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL. MARGENES CONTINENTALES Y CUENCAS

Los márgenes continentales y las cuencas oceánicas como afirma GMA (2013) contienen en su registro sedimentario información sobre la evolución y dinámica geológica de los mismos, y concretamente acerca de las variaciones nivel del mar, climático, tectónico, etc, permitiendo identificar oscilaciones tanto globales como locales. El análisis del registro sedimentario se aborda a través de la estratigrafía, que GMA (2013) da a conocer como la ciencia que consiste en el reconocimiento y correlación de paquetes de estratos relacionados genéticamente, y que permite delimitar tridimensional la paleogeografía, establecer los modelos de dispersión y reconstruir la historia geológica de los sistemas deposicionales en los márgenes continentales y cuencas.

A finales de los años ochenta nace un nuevo cuerpo de la Estratigrafía, denominado Estratigrafía Secuencial, que versa sobre la redistribución continua de los sedimentos mediante los cambios relativos o globales del nivel mar, y representa hoy en día uno de las teorías fundamentales en Geología. Parte de este trabajo deriva directamente del establecimiento del concepto de secuencia y el reconocimiento de unidades limitadas por discontinuidades. Gracias a esta teoría los geólogos tienen una herramienta para explicar y predecir la distribución espacial, temporal y composicional de los sedimentos.

La estratigrafía secuencial es a menudo considerada como una extensión de la estratigrafía sísmica de los años 70. Sin embargo, ya a principios del Siglo XX, ciertos autores como Grabau (1913), Barrell (1917), Sloss et al (1949) y Sloss (1962) mencionados por Marocco (2009), escribieron sobre las relaciones existentes entre sedimentación, discontinuidades y

variación del nivel de base – que son la base de la estratigrafía secuencial (Grabau, 1913; Barrel, 1917; Sloss et al., 1949; Sloss, 1962; etc.).

El término de “secuencia”, también básico en estratigrafía secuencial, fue introducido por Sloss et al. (1949) citado por Marocco (2009), para definir una unidad estratigráfica limitada por dos discontinuidades subaéreas. Sloss subrayó la importancia de estas discontinuidades y subrayó también la importancia de la tectónica en su génesis, ignorada por los partidarios de la estratigrafía sísmica.

La estratigrafía sísmica, cuando apareció en los años 1970 (Vail, 1975; Vail et al, 1977), provocó una revolución en la estratigrafía. Conjuntamente con el concepto de estratigrafía sísmica se publicó la carta de los ciclos globales (Vail et al., 1977), basada sobre el postulado que el eustatismo es el motor principal de la formación de las secuencias y de la ciclicidad estratigráfica.

Cuando se incorporaron a la estratigrafía sísmica los datos de campo y de perforaciones, se pasó a la estratigrafía secuencial; esto fue en los años 1980. Pero, en su comienzo, la estratigrafía secuencial presentaba el eustatismo global como el principal (y para muchos autores el único) motor de la génesis de las secuencias; la carta de los ciclos eustáticos globales (la carta de Vail) constituía con la estratigrafía secuencial un conjunto inseparable.

El paso, en los años 1990, de la noción de variación del nivel del mar (es decir de la noción de eustatismo global) a la de variación relativa del nivel del mar Marocco (2009) manifiesta que constituyó un avance mayor en la estratigrafía secuencial. Con esta nueva noción de variación relativa del nivel del mar (o del nivel de base), no intervienen las consideraciones relativas a las fluctuaciones del nivel eustático o de la tectónica en la determinación de las

secuencias o de los otros elementos (cortejos sedimentarios, superficies estratigráficas) de la estratigrafía secuencial. Por el contrario, la naturaleza de las superficies y la de la relación de las unidades estratigráficas entre ellas, teniendo en cuenta a Marocco (2009) son consideradas como elaboradas según una curva de los cambios relativos del nivel del mar que toma en cuenta tanto lo que corresponde al eustatismo, a la tectónica y a los otros controles alógenos de la sedimentación.

2.3.1. CAUSAS DE LOS CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR

Pérez y Díaz (2014) expresan que las causas de los cambios globales del nivel del mar pueden ser de origen climático (cambios glacio-eustáticos), que implica un cambio en el volumen del agua del océano, y de origen tectónico (cambios tecto-eustáticos), que conduce a un cambio en el volumen y tamaño de las cuencas oceánicas. Los cambios del nivel del mar glacio-eustáticos están relacionados con el crecimiento y retracción de los casquetes polares como consecuencia de los cambios climáticos. Por ejemplo, el total deshielo del hielo antártico representaría un ascenso generalizado del nivel del mar, de hasta 60 m. Como lo hace notar GMA (2013), los procesos relacionados con la dinámica de la tectónica de placas causan cambios en la forma y tamaño de las cuencas oceánicas. Las posibles causas de estos cambios son las variaciones en la tasa de expansión de las cuencas oceánicas, y las variaciones en la compensación isostática de los continentes. Estos cambios originan variaciones del nivel del mar de baja frecuencia.

2.3.2. ÓRDENES CÍCLICOS Y CORRELACIÓN GLOBAL.

Una secuencia depositacional representa un ciclo completo de depósito limitado arriba y debajo por discordancias erosionales. La secuencia tiene una duración máxima, la cual es medida entre las conformidades correlativas y las inconformidades que la limitan. Entonces, la duración

de la secuencia será determinada por el evento que controla la creación y destrucción del acomodamiento, por ejemplo, la subsidencia tectónica y/o eustacia. Pérez y Díaz (2014) revelan que los ciclos tectónicos de subsidencia y levantamiento y los ciclos eustáticos de incremento y decremento del nivel del mar (Véase Figura 6) pueden operar sobre diferentes periodos de tiempo, y es muy usual clasificar las secuencias en términos de su magnitud de duración, comúnmente llamados primer orden, segundo, tercero, cuarto, etc.

2.3.2.1 Ciclo de primer orden o de inundación continental: (Véase Figura 6).

GMA (2013) lo define por la mayor escala de ciclos sedimentarios con duración > 50 millones de años, el onlap y offlap son parte de los supercontinentes. Los ciclos de invasión continental de primer orden son considerados por ser controlados por la tectono-eustacia; por ejemplo, los cambios en el volumen de las cuencas oceánicas relacionados a ciclos de tectónica de placas. Por lo tanto, estos cambios son considerados como tectono-eustáticos y se interpretan según Pérez y Díaz (2014) como el efecto de cambios mayores en la posición de la línea de costa debida a la fragmentación de los supercontinentes, que ocasionan reajuste de las placas e inundaciones de continentes.

2.3.2.2 Ciclos de segundo orden de duración: (Véase Figura 6).

GMA (2013), Los ciclos de segundo orden de duración entre 3 y 50 millones de años son los pilares de las secuencias de primer orden y representan estadios particulares en la evolución de una cuenca. Estos pueden ser provocados por cambios en la tasa de subsidencia tectónica de la cuenca o la tasa de levantamiento en el terreno que es fuente de sedimentos. Pérez y Díaz (2014), al igual que los ciclos de primer orden son considerados tectono-eustáticos y se interpretan como relacionados con cambios mayores en la posición de la línea de costa, aunque,

en este caso, debido a cambios en la tasa de subsidencia tectónica que ocasiona grandes transgresiones y regresiones que pueden ser globales.

2.3.2.3 Ciclos de secuencia de tercer orden: (Véase Figura 6).

GMA (2013) señala que duran de entre 0.5 y 3 millones de años, son los que dieron origen a la estratigrafía de secuencias, debido a que son frecuentemente reconocibles en una escala de datos sísmicos convencionales. Éstos son identificados por la presencia de ciclos individuales de creación y destrucción del acomodamiento; estos ciclos fueron reconocidos y estudiados por Vail, Audemart, Bowman, Eisner y Perez-Cruz (1991). Cloetingh (1988) citado por Pérez y Díaz (2014) dice que Generalmente son originados por glacioeustacia, aunque otros mecanismos tectónicos también los pueden originar (Cloetingh, 1988). Estos ciclos originan las secuencias depositacionales y se limitan por superficies de discontinuidad que marcan etapas de interrupción sedimentaria (con o sin erosión) en las plataformas. Desde el punto de vista de GMA (2013) los ciclos de tercer orden pueden deberse a factores globales, regionales o locales, resultando muy complejo en la mayoría de los casos diferenciar un tipo de otro. Los factores globales son cambios eustáticos que pueden ser tectono-eustáticos, aunque no se descartan los glacio-eustáticos.

El término de secuencias compuestas (composite sequences), es algunas veces usado para describir secuencias de segundo y tercer orden (Mitchum and Van Wagoner, 1991).

2.3.2.4. Ciclos de cuarto orden: (Véase Figura 6).

GMA (2013), con una duración que varía entre 0.1 y 0.5 millones de años originan “parasecuencias”, que representan ciclos individuales de facies crecientes limitadas por

superficies de abruptos ahondamientos. Este tipo de ciclos pueden ser glacioeustáticos o deberse a factores tectónicos locales.

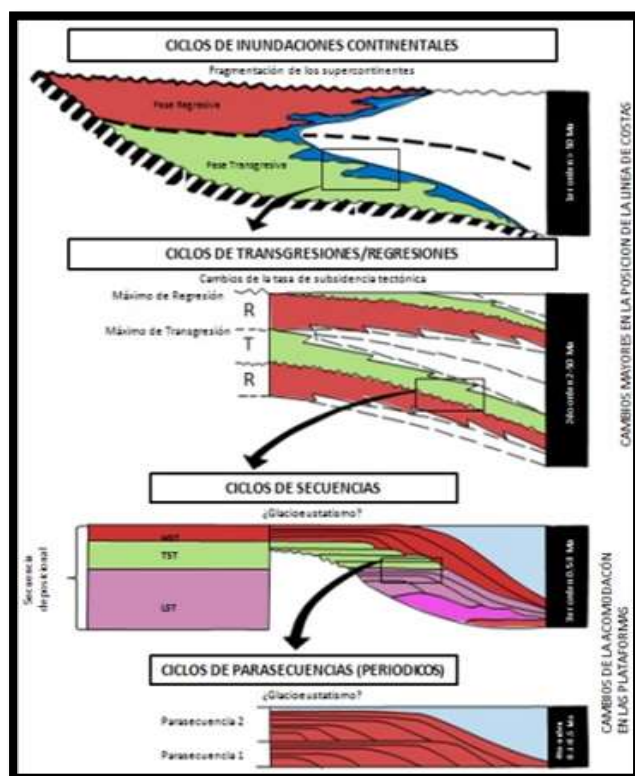


Figura 6. Cuatro órdenes de los ciclos estratigráficos. Tomado de Duvel et al (1992).

2.4. SISTEMA DEPOSITACIONAL

Pérez y Díaz (2014) lo definen como un arreglo tridimensional de litofacies provocado por un sistema encadenado; es un vínculo de sistemas depositacionales contemporáneos. Se usa aquí el término de sistema encadenado para designar tres subdivisiones dentro de cada secuencia: lowstand, transgressive y highstand en secuencias tipo 1 y margen de plataforma, transgresivo, y highstand en sistemas tipo 2.

Los sistemas encadenados se definen objetivamente en base a tipos de superficies límites, su posición dentro de la secuencia, y patrón de empaquetamiento en la parasecuencia. De acuerdo

con las teorías sobre estratigrafía secuencial desarrolladas por Van Wagoner et al. (1988), y Posamentier & Allen (1999), existen una serie de conceptos básicos que se muestran a continuación, entre los cuales es importante tener claros, para realizar una adecuada interpretación secuencial, aun cuando no todos fueron aplicados al modelo definitivo del estudio.

- **Límite de secuencia (SB):** Superficie generada por erosión durante un descenso relativo del nivel del mar. Base del sistema depositacional de bajo nivel del mar.
- **Superficie de inundación (FS):** Superficie de baja energía generada durante un ascenso relativo del nivel del mar.
- **Superficie transgresiva (TS):** Superficie de alta energía generada por erosión retrogradante del shoreface durante un ascenso relativo del nivel del mar. Tope de los cortejos depositacionales de bajo nivel o de cuña de bajo nivel.
- **Superficie de máxima inundación (MFS):** Superficie formada durante el momento de máxima transgresión de la plataforma. Límite entre el cortejo depositacional transgresivo y el sistema de alto nivel.

Una vez aclarado algunos términos importantes para la interpretación de secuencias depositacionales, también es necesario señalar los sistemas encadenados que pueden constituir una determinada secuencia estratigráfica, los cuales se encuentran limitados por superficies marcadores regionales descritas anteriormente.

2.4.1. Lowstand system tract (LST)

Es el system tract basal (estratigráficamente más antiguo). De acuerdo con Pérez y Díaz (2014) se deposita durante un intervalo de caída del nivel del mar en el offlap break y subsecuente suave aumento del nivel del mar. Antes de la caída relativa del nivel del mar, el río

habrá más o menos mantenido un perfil de río gradado con una porción superior erosional y una porción inferior depositacional. (Planicie aluvial y planicie costera). Cuando el nivel relativo cae en el offlap break el perfil debe ajustarse al nivel base bajo. El río incide dentro de los depósitos topsets bajos; la planicie aluvial, planicie costera y/o depósitos de cuenca de la secuencia previa.

La tasa de aumento del nivel relativo del mar es inicialmente bajo, esto resulta en una baja tasa de creación de la acomodación, el suministro de sedimentos será mayor y el sistema progradará. Sin embargo, la tasa de creación de acomodación eventualmente puede traspasar el suministro de sedimentos, resultando en un cambio de progradación a agradación y retrogradación y el del siguiente system tract (transgressive system tract).

2.4.2. Transgressive system tract (TST)

Es el system tract de la mitad de la secuencia. Pérez y Díaz (2014) explica que Transgressive system tract se deposita durante un aumento del nivel relativo del mar cuando la acomodación se aumenta más rápido que la tasa de suministro de sedimento, es retrogradacional. Este sistema puede mostrar evidencia de subsuministro de sedimentos y puede ser rico en carbones, depósitos de overbank y de lagoon. El sistema de drenaje se puede inundar por estuarios. Distalmente pasa a ser una sección condensada, caracterizada por tasas de depositación extremadamente bajas y el desarrollo de facies condensadas como glauconíticas, ricas en materia orgánica, chert, fosfatos y carbonatos pelágicos. La máxima tasa de aumento del nivel del mar ocurre en algún momento dentro del transgressive system tract y el final de este sistema ocurre cuando la tasa de acomodación decrece a un punto donde comienza a aumentar el suministro de sedimentos; la progradación comienza otra vez. Este punto se reconoce como superficie de máxima inundación. El transgressive system tract a menudo contiene horizontes sellos y/o estratos generadores de hidrocarburos.

2.4.3. Highstand system tract (HST)

Es el sistema más joven. Según Pérez y Díaz (2014) el Highstand system tract representa el sistema progradacional después de una máxima trasgresión y antes de un límite de secuencia, cuando la tasa de creación de acomodación es menor que la tasa de suministro de sedimentos. Se caracteriza por una tasa desacelerante de aumento del nivel del mar a través del tiempo, resultando en arquitectura inicialmente agradacional y posterior progradacional. Estos sistemas depositacionales pueden ser inicialmente similares a los del transgressive system tract, pero el relleno de áreas de plataforma por progradación y el decrecimiento en la tasa del nivel del mar, puede conducir a un decrecimiento en la influencia de mareas durante un highstand system tract y un decrecimiento en la cantidad de carbones, overbanks y shales de lagoon. Los canales de cuerpos arenosos serán más comunes y más conectados. Una secuencia tradicional completa está constituida por tres sistemas encadenado que de base a tope se encuentra LST, TST y HST.

Los recientes estudios sísmicos han reconocido dos tipos de secuencias que reflejaban el caso de la caída del nivel del mar debajo del quiebre del margen de rotura (tipo I) y el caso donde el nivel del mar no cae debajo de este quiebre (tipo II). Aunque haya habido mucha confusión subsecuente sobre el uso de estos dos tipos de afloramientos estudiados, Pérez y Díaz (2014) agregan que sus definiciones se han modificado tales que una secuencia del tipo I se refiere a uno en el cual haya una caída relativa en nivel del mar debajo de la posición de la actual línea de playa y una secuencia tipo II se refiere a una secuencia en la cual la caída relativa en nivel del mar no genera un cambio en la posición de la línea de la playa.

3. ESTUDIOS PREVIOS

La formación Caballos, constituye uno de los mejores reservorios del Valle Superior del Magdalena, la cuenca del Putumayo; sin embargo, sus atributos varían especialmente debido a los cambios de espesor, facies y procesos diagenéticos actuantes. Por ello, buscando obtener una mayor información de la formación Caballos en el Valle Superior del Magdalena se presenta algunos estudios llevados a cabo en esta formación de mucha importancia en la industria petrolera.

VERGARA, L., GUERRERO, J., PATARROYO, P., & SARMIENTO, G. (1995).

“Comentarios acerca de la Nomenclatura Estratigráfica del Cretácico Inferior del Valle Superior del Magdalena”. Geología Colombiana, 19, (Pag. 21-31).

Las formaciones Yaví, Caballos y Hondita del Cretácico inferior del Valle Superior del Magdalena han sido objeto de estudios recientes, que, aunque aportan información muy valiosa, son motivo de controversia. En esta contribución se discuten las discrepancias existentes entre algunos de estos trabajos, en cuanto a correlaciones y nomenclatura estratigráfica se refiere. Se recomienda el abandono del uso de varias unidades recientemente propuestas y se llama la atención sobre las definiciones originales de las unidades involucradas, de acuerdo con normas internacionales de procedimiento estratigráfico. Adicionalmente, se discuten las dataciones de dichas unidades, identificándose contradicciones que se adjudican al poco conocimiento de la dispersión temporal de algunos de los fósiles reportados.

DUARTE, E. (2003). *“Historia De La Cuenca Cretácea Del VSM En Un Marco Cronoestratigráfico. Implicaciones Ambientales”*. European Association of Geoscientists & Engineers.

Se determinaron seis marcadores regionales para el Cretácico a lo largo de la cuenca del Valle superior del Magdalena, utilizando diferentes parámetros como herramientas de correlación; caracterizaciones de electrofacies en registros eléctricos de pozo, análisis mineralógicos, calibraciones de registros eléctricos con corazones, análisis de foraminíferos provenientes de pozos y afloramientos realizados por PETROBAS, con el fin de calibrar observaciones de electrofacies y facies en un marco crono-estratigráfico. El marco crono-estratigráfico obtenido permite diferenciar cinco secuencias de depósito, relacionadas regionalmente por superficies máximas de inundación, superficies transgresivas, discordancias y otros límites de secuencias. Las edades determinadas para las líneas de tiempo mencionadas son respectivamente de más joven a más antigua; Campaniano, Santoniano-Coniaciano, Turoniano-Cenomaniano, Cenomaniano, Albiano y en último lugar en el Albiano-Aptiano se puede reconocer una superficie de inundación donde se inicia lo que llamamos Ciclo del Caballos. Las secuencias reconocidas están controladas localmente por variaciones del nivel del mar. Sin embargo, el control más importante en la cuenca es tectónico, evidenciado en cambios faciales, variaciones de espesores, además de contrastes ambientales a lo largo de la cuenca. Las variaciones mencionadas prevalecen hacia el oriente hasta la cordillera oriental. El modelo estratigráfico establecido proporciona una visión regional de las variaciones laterales en las propiedades de los reservorios. Por otra parte, permite obtener conclusiones acerca de la continuidad regional de las principales rocas generadoras en la cuenca.

RAMON, J., & FAJARDO, A. (2004). *“Sedimentología y Estratigrafía Secuencial de la Formación Caballos, Subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena”*. HOCOL S.A., Bogotá, Colombia.

La formación Caballos en el Valle Superior del Magdalena consiste en areniscas basales de edad Aptiano-Albiano presentando intercalaciones de lodolitas y de intervalos calcáreos. A escala regional el tope de la Formación Caballos se define como el tope de las primeras arenas por debajo de las margas, lodolitas y calizas de la Formación Villeta; estudios a escala de yacimientos de varios campos productores indican que existen cambios laterales de facies para la Formación Caballos y para la sección basal de la Formación Villeta.

Haciendo uso de una correlación detallada de 54 pozos calibrados con 3800 pies (1170 m) de corazonces de doce (12) pozos de los campos Balcón, San Francisco, Palermo y Los Mangos muestra que los cambios faciales se presentan en cada uno de los miembros litológicos y muestran un patrón regional de somerización de las facies y “onlap” de Norte a Sur.

Dicha correlación detallada muestra que la formación Caballos tienen ambientes diferentes según la posición geográfica con un patrón general de ambientes más proximales hacia el sur y más distales al norte. Así, el Caballos Inferior es continental en toda el área de estudio, pero es dominado por canales y superficies de reactivación al sur mientras que al norte se preservan lodolitas de llanura de inundación y de planicie costera. El Caballos Medio está constituido por depósitos de bahía distal y proximal en el norte y por depósitos de planicie costera y delgados lodos de bahía proximal al sur. El Caballos Superior varía de depósitos estuarinos a depósitos aluviales con influencia de mareas solo hacia el tope de la secuencia.

Finalmente, los estratos basales de la Fm. Villeta varían desde lodos y margas de

plataforma marina distal en el norte hasta areniscas sucias y lodolitas de plataforma marina proximal en el campo Los Mangos.

Por último, el contraste litológico de areniscas de la formación Caballos a lodos y margas de la formación Villeta no tiene implicaciones temporales a escala regional y no puede usarse como superficie de correlación.

PABLOS, N., RODRIGUEZ, G., & VELASQUEZ, B. (2004). *“Metodología Propuesta para la Evaluación de Potenciales Reservorios, Teniendo en Cuenta los efectos diagenéticos y sus efectos: Aplicación en la Formación Caballos en el área de Alpujarra, VSM”*. Sociedad Internacional Petrolera, Sipetrol Colombia.

El análisis de la calidad de los reservorios en proyectos exploratorios y de desarrollo, necesita de una metodología que debe estar basada en el análisis petrográfico de secciones delgadas por evaluación de relaciones existentes entre minerales y procesos diagenéticos.

Se aplicó una metodología en el área de Alpujarra (VSM), para 54 muestras de superficies y ripios del pozo El Encanto-1ST, permitiendo establecer que el miembro superior de la formación Caballos presenta las mejores características como roca reservorio de hidrocarburos debido a los valores de porosidad, que alcanzan un 11% en promedio. Los resultados indican que, entre los procesos de diagénesis, la cementación ha sido el principal causante de la reducción en los valores de porosidad primaria. Los estudios petrográficos de rocas sedimentarias, proporcionan una amplia información relacionada con el tipo de sedimentos acumulados y los cambios físico-químicos que en ellos se han generado a través del tiempo geológico. Esos cambios corresponden a procesos diagenéticos, cuyas causas y efectos son de particular

importancia en la industria del petróleo, porque afectan la porosidad y permeabilidad de las rocas, determinando atributos como reservorio de hidrocarburos.

VARGAS, R; PALENCIA, L., & CHAVARRO, M. (2013). *“Correlación petrofísica en superficie con subsuelo de formaciones productoras subcuenca de Neiva”*. Universidad Surcolombiana, Neiva-Huila.

Las propiedades petrofísicas son clave para la caracterización de los yacimientos de petróleo; principalmente las rocas almacén, las cuales son interpretadas en función de sus componentes, poros, fisuras, uniones intergranulares, composición química, minerales, etc. Para ello, es primordial caracterizar y analizar los cambios presentados en el proceso de meteorización. Para eso se correlacionó petrofísicamente las formaciones productoras de la subcuenca Neiva en superficie con las del subsuelo con el fin de observar los cambios ocurridos en dicho proceso, como afectan estos eventos la roca almacén y la producción de los campos petroleros en la Subcuenca Neiva. Para la formación Caballos se tiene que el Caballos inferior está constituido por una serie de secuencias arenosas, siendo un depósito continental a la base. En la parte media y tope predominan lodolitas negras, que corresponden a depósitos en llanuras aluviales. Caballo inferior tiene un espesor promedio de 150 pies.

Caballos medio fue depositada en un ambiente marino restringido, teniendo intercalaciones de calizas y dolomitas de color gris verdoso, con algunas glauconitas y lodolitas de color gris a negro. Caballos medio posee un espesor promedio de 120 pies. Caballo superior es el principal yacimiento productor en los Campos Santa Clara y los Mangos, está formada por cuarzoarenitas de grano fino a grueso friables, con laminación inclinada y paralela, que fueron originadas como depósitos de cordones de playa progradantes. Presentan intercalaciones de

lodolitas e interlaminaciones de arena y lodo y arenitas calcáreas bioclásticas, que representan depósitos marinos marginales (estuarios).

A su vez, se obtuvo que los cálculos hechos a las muestras tomadas en superficie de la formación caballos dieron como resultado una porosidad de 16,179%, que al compararlo con el valor de subsuelo que es 11% para el campo Los Mangos y 17% para el campo Las Brisas, se observa diferencia entre los resultados. Mientras, la permeabilidad promedio obtenida de los núcleos de las rocas de superficie es 91,035 md. Comparado con las muestras de subsuelo con valor de 38 md para el campo Los Mangos. Se establece una gran diferencia en los valores. El estudio arrojó resultados similares en las permeabilidades de las formaciones Caballos y Honda. Por último, las formaciones Caballos y Gualanday se encuentran en los rangos medidos en fondo.

ANDRADE, O., & MOSQUERA, D. (2014). *“Correlación Litoestratigráfica De Las Formaciones Geológicas y Construcción del Modelo Digital de los Pozos Petroleros del Área de San Francisco Sector Palermo”*. Universidad Surcolombiana, Neiva-Huila.

Se realizó la correlación litoestratigráfica de las formaciones geológicas y construcción del modelo digital de 64 pozos pertenecientes al campo San Francisco, ubicados en el municipio de Palermo. El resultado obtenido es una imagen sólida donde se puede observar la ubicación de los pozos en la misma ilustración con coordenadas exactas, además de los espesores de las formaciones geológicas, pertenecientes al Valle Superior del Magdalena. Para cada una de las formaciones geológicas se correlacionó y se puede apreciar la imagen de su estructura en tres dimensiones, permitiendo ver los diferentes cambios que ha sufrido el subsuelo por los diferentes fenómenos geológicos. Respecto a la formación Caballos se tiene que es una secuencia predominantemente arenosa con intercalaciones menores de arcillolitas, limolitas, lutitas y Calizas. Donde la formación Caballos superior está compuesta por paquetes arenosos separados

por niveles de lutitas, con un espesor para este miembro inferior de 412 pies. El Caballos medio es compuesto predominantemente por lutitas con menores intercalaciones de caliza, localmente limolita hacia el tope y algunos niveles de dolomita, hacia la base se observa un nivel de arcillolita. En este miembro medio hay un espesor de 434 pies.

El miembro inferior de la formación Caballos está separado por tres secciones diferenciadas de limolitas no calcáreas intercaladas con arcillolitas, arenas - areniscas friables con intercalaciones de arcillolitas blancas y arenas con niveles de arcillolita localmente limosa. Dicho miembro inferior le da un espesor de 227 pies. El trabajo de grado logra hacer un modelamiento de la formación Caballos, que en la mayoría de los pozos es la formación objetivo, y donde se espera encontrar hidrocarburos.

ESTUDIANTES DE CAMPO VI (2015). *“Guía Geológica Campo VI”*. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia.

Consiste en una guía que contiene la información geológica del departamento del Huila, así cuenta con información litológica, estratigráfica, estructural, tectónica, paleontológica, geomorfológica, y de procedimientos geofísicos para toma de datos. Respecto a la formación Caballos dice en términos regionales, decrece hacia el sur y oeste del Valle Superior, y varía desde 411 m en la quebrada Bambucá (Renzoni, 1994b), a 227 y 175 m en las secciones de las quebradas Itaibe y Yaguaracito, respectivamente (Renzoni, 1994b), y 226 y 210 m en las secciones de las quebradas Carpintero y Vegalarga (Renzoni, 1994b) al este del departamento del Huila. Cossio et al. (1995) encuentran espesores de 289 m en la quebrada Yaví y 226 m cerca del municipio de Alpujarra (plancha 283 Purificación).

Se describe como una secuencia arenosa cuyo depósito se da en un ambiente transgresivo a marino somero. Presenta expresiones topográficas medianas, con pendientes moderadas. Suprayace la formación Yaví transicionalmente y en algunos sectores tiene contacto discordante con la formación Saldaña y la Cuarzomonzonita de Teruel. Infrayace la formación Hondita con contacto neto y concordante. Además, se divide en tres miembros.

Litológicamente la formación Caballos en su parte inferior está constituida por arenitas cuarzo-feldespáticas de grano medio y conglomerático, hacia la base, con intercalaciones de arcillolitas bien laminadas de color gris oscuro a negro. El segmento medio consta de arcillolitas grises oscuras a negras, con intercalaciones potentes de cuarzo-arenitas de grano grueso hasta fino en la parte superior. El conjunto superior consta de cuarzo-arenitas intercaladas con delgados niveles de arcillolitas laminadas con un espesor total de 60 metros.

CARRERA, D. (2015). *“Sección balanceada del flanco occidental de la cordillera oriental en las inmediaciones de los municipios Villarrica y Cunday en la sub-cuenca de Girardot del Valle Superior del Magdalena”*. Universidad Eafit. Medellín, Colombia.

Menciona que el Valle Superior del Magdalena ha sido a lo largo de la historia un área con mucha exploración y explotación de hidrocarburos, especialmente en la subcuenta de Neiva. Debido a que en los últimos años ha surgido un gran interés por los yacimientos de hidrocarburos no convencionales en la mayoría de compañías exploradoras del mundo, implica estudiar a detalle aquellas áreas con un gran potencial para la búsqueda de los yacimientos no convencionales. Para tener una idea del potencial de reservas del área es necesario hacer la evaluación de una serie de parámetros dentro de los cuales destaca conocer la historia geológica, el comportamiento de la deformación de las unidades litológicas y su cinemática en el área.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se considerada que la mejor, manera de

tener un modelo bastante aproximado del subsuelo es aplicando técnicas de construcción de secciones geológicas.

El Cretáceo-Paleoceno está representado por unidades sedimentarias que están presentes en todo el Valle Superior del Magdalena, conformando amplias estructuras afectadas por numerosos sistemas de fallas. Las unidades de más antigua a más joven son; formación Yaví, formación Caballos, grupo Villeta, grupo Olini, formación Monserrate y grupo Guaduala. Estas unidades han sido objeto de diversos estudios, tanto en superficie como en el subsuelo por su importancia en el entendimiento de la evolución del Cretáceo en Colombia y sus implicaciones en el estudio de hidrocarburos. Pero por tratarse de unidades depositadas en ambiente transicional a marino, presentan cambios litológicos de un lugar a otro, generando los problemas de nomenclatura estratigráfica vigentes actualmente.

Específicamente, la formación Caballos es tratada de acuerdo con su descripción original (Corrigan, 1967). La subdivisión en los tres conjuntos conocidos ampliamente (Beltrán & Gallo, 1968), es viable, considerando ciertos cambios faciales evidenciados en correlaciones en superficie (Renzoni, 1994) y con interpretación de registros de pozo. Para la formación Caballos su ambiente se considera continental a transicional, y su edad va de Aptiano a Albiano.

UNION TEMPORAL PROSPECCIÓN (2018). *“Evaluación de las Cuencas y Estructuración de Escenarios de Oferta de Hidrocarburos Convencionales y No Convencionales”*. Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, Colombia.

Hace referencia a que el inicio de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) se da durante el Jurásico-Triásico y es originada por los procesos de apertura de la cuenca y de levantamiento de las cordilleras Central y Oriental, lo que ha permitido la depositación de

sedimentos desde el Mesozoico hasta el Terciario, depósitos que han sido afectados por fallas y pliegues que dan forma a la cuenca. La cuenca está rodeada por fallas importantes como Algeciras-Garzón y Bituima-La Salina y las cordilleras Central y Oriental. Sus sedimentos están depositados sobre un basamento cristalino que ha sufrido metamorfismo de alto y bajo grado, en medio de los diferentes procesos de extensión y compresión que han intervenido en la evolución de la cuenca.

Para la cuenca del Valle Superior del Magdalena, su sección estratigráfica inicia en el Proterozoico, edad del basamento sobre el que se depositan sedimentos que pasan de un ambiente marino a continental y finalmente marino. Estos depósitos han sufrido fuerte deformación por fallamiento y plegamiento. Para la formación de interés y que es objeto de estudio, Alpujarra se encuentra depositada en un ambiente fluvial durante el Aptiano inferior, El Ocal se deposita en un ambiente marino durante el Aptiano superior-Albiano inferior, mientras tanto Caballos se halla depositada en un ambiente de litoral-playa durante el Albiano medio.

DUARTE, E., CARDONA, A., LOPERA, S., VALENCIA, V., & ESTUPIÑAN, H. (2018). *“Procedencia y diagénesis de dos secciones estratigráficas de la Formación Caballos en el Valle Superior del Magdalena: implicaciones en la geología y la calidad del reservorio”*. Universidad Nacional. Medellín, Colombia.

Expone que la la formación Caballos pertenece al Cretácico Inferior que caracteriza el Oriente Colombiano, siendo almacenador probado en las cuencas productoras del Valle Superior del Magdalena y el Putumayo (Colombia), teniendo una amplia variación en sus propiedades petrofísicas. Se llevó a cabo análisis de petrografía, minerales pesados, geocronología en circones detríticos, SEM y DRX, integrados con análisis petrofísicos básicos de porosidad y permeabilidad en los miembros inferior y superior de dos secciones de la Formación Caballos en

el Valle Superior del Magdalena (Quebrada el Ocal y el Cobre), cuyo propósito es reconstruir su procedencia y diagénesis aportando a la comprensión de la historia de la cuenca y evaluando los factores composicionales y diagenéticos que afectan la calidad del reservorio.

Las areniscas de la formación Caballos varían entre subarcosas, litoarenitas y cuarzoarenitas. Sus altos contenidos de cuarzo, la presencia de feldespato, líticos sedimentarios, líticos metamórficos y volcánicos sugieren una fuente mixta. Las poblaciones de circones detríticos con edades Precámbricas, Pérmicas y Triásicas y las características composicionales de las areniscas sugieren que las áreas fuentes podrían incluir macizos adyacentes con características composicionales y temporales semejantes a los actuales incluidos en Valle Superior, Macizo de Garzón y Macarena (Sección El Ocal), y el Valle Superior del Magdalena y la Cordillera Central (Sección El Cobre). Los cambios en las características composicionales y la geocronología en circones detríticos entre los miembros superior e inferior de ambas secciones, sugieren un cambio en áreas fuentes, asociado al agotamiento de los altos de basamento adyacentes, a cambios a lo largo de la componente de rumbo en el estilo estructural entre zonas adyacentes y la aparición de fuentes cada vez más orientales y occidentales, que reflejan el fin de la inestabilidad tectónica y la profundización de la cuenca.

Al comparar los análisis de porosidad y permeabilidad con las características texturales, composicionales y la historia diagenética en las dos secciones estudiadas, se sugiere que la presencia de cuarzo, feldespato y líticos son un factor condicionante de la porosidad. En el miembro inferior es más abundantes estos dos últimos, hay valores de porosidad menores, ya que fueron transformados en arcilla y generan altos contenidos de pseudo-matriz. Por otro lado, el miembro superior de la formación Caballos una alta porosidad y mejores valores de

permeabilidad estarían relacionada con mayores contenidos de cuarzo y una mayor disolución de partículas del armazón durante las fases diagenéticas tardías.

Estos resultados en conjunto con los trabajos anteriores; indican que la heterogeneidad en las propiedades petrofísicas de la Formación Caballos, además de ser consecuencia de las características ambientales, está controlada por la composición y la historia diagenética.

4. GEOLOGIA REGIONAL

4.1. BASAMENTO ECONÓMICO

Palencia y Chavarro (2013) mencionan que en el Valle Superior del Magdalena el basamento económico corresponde a formaciones geológicas que van en edades desde el Precámbrico hasta el Jurásico, y está conformado por rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida correspondientes al batolito de Ibagué y la formación Saldaña y rocas de metamorfismo regional correspondiente al llamado Macizo de Garzón localizado al este del área. Esta unidad litológica está conformada por un núcleo de rocas precámbricas constituidas por migmatitas y gneises, anfibolitas e intrusiones de granitos y cuarzodioritas jurásicas. En el sector sur-occidente de la zona de estudio afloran rocas volcánicas de la formación Saldaña conformadas por flujos de lavas de composición riolítica a dacítica con delgadas intercalaciones de tobas y aglomerados, estas rocas se encuentran altamente meteorizadas dando una morfología abrupta con tonalidades violáceas a moradas (Véase Figura 7)

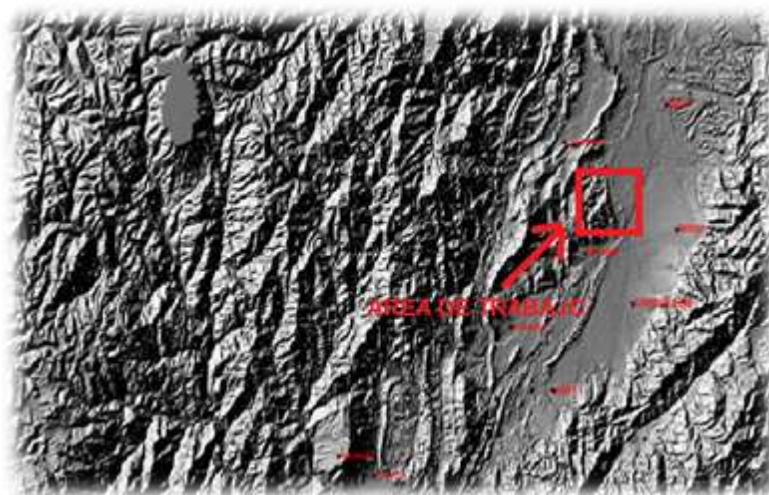


Figura 7: Modelo de Elevación Digital (MED) sector el Juncal. Se muestra el área del proyecto donde se observa la morfología del piedemonte de la cordillera central diferenciando el basamento de la cobertura productiva. (Fuente: Imagen satélite Landsat)

4.2. COBERTURA PRODUCTIVA

La cobertura productiva de carácter sedimentario está determinada por dos secuencias deposicionales diferentes caracterizada por presentar rocas de origen clástico y químico.

La primera se trata de una secuencia clástica marina que abarca desde el Cretáceo Medio (Aptiano - Albiano) hasta el paleógeno (Paleoceno) de un ambiente marino a transicional desarrollando un ciclo regresivo y en la cual fueron depositados en el área, las formaciones Caballos, Villeta, Monserrate y Guaduas respectivamente. (Véase Figura 9).



Figura 8: Secuencia estratigráfica del cretácico.

La segunda secuencia compuesta por rocas sedimentarias de origen continental que abarcan desde el Eoceno hasta el reciente, que corresponden estratigráficamente a las formaciones Gualanday, Doima, Potrerillos, Honda, Gigante y Depósitos Cuaternarios. (Véase Figura 9).

Como parte del presente trabajo se realizó el respectivo levantamiento estratigráfico a toda la secuencia litológica de la Formación Caballos: CABALLOS INFERIOR, CABALLOS MEDIO Y CABALLOS SUPERIOR en el sector del Juncal. Por medio del método de poligonal abierta se logró obtener la columna estratigráfica de toda la Formación.

		GRUPO	FORMACION	AMBIENTE	LITOLOGIA			
CUATERNARIO								
Neógeno	Secuencia Sin-Orogénica	Plioceno-Holoceno	Gigante / Mesa (1000 mts)	Terrestre, Llanuras de Piedemonte.				
		Mioceno	Medio a Superior	Honda (2500 mts)		Terrestre, Llanuras Aluviales		
			Inferior	Barzalosa (50 - 300 mts)		Terrestre, Lagunar		
Paleógeno	Secuencia Sin-Orogénica	Oligoceno	Doima	Terrestre, Ríos entrelazados.				
		Potreriillo						
		Eoceno	Gualanday			Tesalia		
						Bache		
						Palermo		
		Paleoceno	Guaduala			Teruel	Terrestre, Paálico.	
		Maastrichtiano	San Francisco					
CRETÁCEO	Superior	Maastrichtiano	Monserate (150 - 200 mts)	Marino Intera Intamareal.				
		Campaniano				K1		
		K2						
		K3						
	Inferior	Secuencia Preorogénica	Santoniano	Villeta (700 - 1100 mts)	Plataforma Detrítico - Calcárea			
			Albiano				Shale Aco	
			LaLuna					
			Shale Bambuca					
	Albiano	Caballos (90 - 200 mts)	Superior	Fluvial Salobre				
	Medio							
	Inferior							
	Aptiano	Yaví (385 mts)	Supia a intermareal Terrestre.					
Basamento	Jurasico	Saldaña (800 - 1500 mts)	Intrusivo	Subaéreo Vulcanoclástico				
	Triasico							
	Precambrico					metamorfico		

Figura 9: Columna estratigráfica para el Valle Superior del Magdalena. Tomada de Ecopetrol ICP-2000. Modificado por (Vargas, 2010)

4.2.1. FORMACIÓN CABALLOS (KC). Cenomaniano (99.6 M.a)

La Formación Caballos fue definida originalmente por Corrigan (1967), en el cerro Caballos al oeste de Olaya Herrera (Ortega, Tolima), designando con este nombre una unidad arenosa, depositada en ambiente transgresivo a marino somero; la ubicó estratigráficamente como suprayacente a las unidades «pre cretácicas» e infrayacente a la Formación Villeta. El presente trabajo sigue la redefinición de la Formación hecha por Flórez y Carrillo (1994) con la redefinición de estas formaciones denominándolas Formación Alpujarra (Caballos Inferior), El Ocal (Caballos Medio) y Caballos (Caballos Superior) (Véase figura 10).



Figura 10: Areniscas la Formación Caballos

En el sector occidental del área de estudio se encuentra aflorando la formación Caballos con una potencia de aproximadamente 10 metros siendo un conjunto de estratificación media a gruesa compuesto por capas monoclinales con una orientación de N25W / 21° SW. Compuestas de areniscas intercaladas con capas de arcillolitas y limolitas ferruginosas (Véase figura 11); de base a techo se describen las capas presentes en el afloramiento, comenzando por cuarzoareniscas de color blancuzco, duras, parcialmente meteorizadas y friables, con granos de tamaño fino a

muy fino de formas sub-redondeadas y sub-esférica a sub-angular, los granos están bien seleccionados, compuestas principalmente por cuarzo. Las arcillolitas son abigarradas, duras, cohesivas y están parcialmente oxidadas son poco plásticas. La lodolita es de color rojo, dura, compacta y fresca las partículas son de tamaño limo medio a fino y se compone por óxido de hierro; seguidas por Cuarzo-areniscas de color blancuzco, duras, parcialmente meteorizadas y friables, con granos de tamaño medio a grueso de formas subredondeadas a sub-angulares y sub-esférica a sub-angular, los granos están bien seleccionados, compuestas principalmente por cuarzo.



Figura 11: Capas de arcillolitas intercaladas con areniscas cuarzosas y limolitas ferruginosas

5. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Mojica & Dorado (1987) describen que “El Valle Superior del Magdalena es una depresión alargada en la dirección NE-SW que separa la mitad meridional de las Cordilleras Central y Oriental, extendiéndose desde Pitalito (en el Sur), hasta Honda (en el Norte)”. La cuenca del VSM es de carácter estructural compresivo, de cabalgamiento- plegamiento, afectando por igual ambos costados del mismo con transporte tectónico opuesto y convergente hacia el centro del valle, con desplazamientos que pueden alcanzar decenas de kilómetros a lo largo de múltiples superficies de despegues localizadas dentro de las unidades (Grupo Villena y Guaduas).

El Valle Superior del Magdalena (VSM) se encuentra delimitado en los extremos por fallas inversas, que ocupa el vértice interno de la bifurcación de las Cordilleras Central y Oriental hasta un poco al Norte de Girardot. El Valle Superior del Magdalena, ha sido subdividida al Sur por la Subcuenca de Neiva y al Norte por la Subcuenca de Girardot. Según Butler (1969) se separan “por el umbral o alto del basamento económico de Patá” o para Mojica & Bayer (1987) por la de Natagaima. Así la cuenca limita al Norte con el nomabrado umbral de Natagaima, que divide el VSM en la Subcuenca de Neiva y la Subcuenca de Girardot, al sudeste con el sistema de fallas Algeciras-Garzón y al Oeste con las rocas del Pre-cretáceo de la cordillera occidental.

En el valle Superior del Magdalena puede observarse dos sistemas de estructuras diferentes. (Véase Figura 12)

Para Butler (1986) “consiste en una cadena plegada cabalgante de antepais con vergencia al este de edad oligocena a tardía, se presenta en el piedemonte oriental de la Cordillera Central”.

La cadena plegada cabalgante se subdivide en dos sistemas; el de Chusma, en la

Subcuenca de Neiva y en la Subcuenca de Girardot, está limitado al norte por la falla transcurrente dextral de Ibagué.

Una cadena plegada cabalgante con vergencia al oeste, ubicada en el piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, de edad miocena temprana a pliocena. Esta cadena cabalgante está constituida por el Sistema de Fallas de Garzón-Suaza y el Sistema del Magdalena.

Asimismo, Butler (1986) menciona que las fallas cabalgan sobre secuencias molásicas neógenas y desplazan todas las rocas más antiguas que el Cuaternario.

Las diversas estructuras geológicas de la Subcuenca de Neiva causadas por múltiples eventos tectónicos, esta simbolizado con las fallas y los pliegues a grandes rasgos como lo son; el sinclinal Media Luna y el sistema de fallas chusma-Teruel, que reúne las fallas de cabalgamiento con forma sinuosa que limita la subcuenca de Neiva con la cordillera central.

5.1. GEOLOGIA ESTRUCTURAL LOCAL DE LA ZONA

Para el área del juncal y específicamente las estructuras que afectan el área de estudio se encuentran representadas en el corte estructural realizado (Véase figura 13), para la sección estratigráfica y poligonal abierta levantada para los tres miembros (Véase figura 14). Las principales características estructurales se describen a continuación.

5.1.1. PLIEGUES

Los pliegues observados en el área son de carácter regional y local, afectan las rocas sedimentarias e ígneas presentes en el área. Los pliegues en general tienen una orientación N-S y N 20-E.

Anticlinal El Indio: Es una estructura alargada, localizada en el occidente de la zona, siendo un pliegue asimétrico con dirección N - S cabeceando hacia el norte. En su núcleo se encuentran rocas jurásicas de la formación Saldaña, afectando unidades cretácicas como la Formación Caballos. Es extraído por acción de la falla de Betania. (Véase figura 13)

En la sección estratigráfica levantada el Anticlinal del Indio se presenta dentro de las rocas de la Formación Caballos Medio generando gran fracturamiento.

Pliegues menores: se presentan principalmente en Caballos medio dentro de las rocas lutíticas presentes, son estructuras asimétricas de rumbo N 20 – 35 E y con cabeceo hacia el norte, estos pliegues son de muy pequeña escala y no se representan en el mapa geológico de este trabajo, pero en la elaboración de la poligonal abierta y la sección estratigráfica, el balanceo y reconstrucción paniplástica resto estas repeticiones de los espesores aparentes.

5.1.2. FALLAS

Se identifican en la zona fallas regionales y locales asociadas principalmente al sistema de fallas de Buenavista y Betania.

Falla Betania: La Falla Betania tiene vergencia al suroriente con inclinación del plano hacia el noroccidente con un rumbo de N 15° W, localizada al oriente del área de estudio y pone en contacto la Formación Honda (Ngh) con la secuencia de Caballos Inferior. Esta estructura geológica se constituye en una de las más destacadas en la geología del Departamento del Huila, después de las fallas que conforman los límites de las cordilleras con el valle del río Magdalena.

Dio lugar al levantamiento que conforma un cinturón de cabalgamiento de escamación gruesa, que asociado al Piedemonte de la cordillera central pone en contacto principalmente rocas antiguas del Jurásico con las rocas sedimentarias del Cretácico, Paleógeno y Neógeno del VSM.

Localmente estas fallas afectan la base de la Formación Caballos cambiando el rumbo de las capas en direcciones N 20 – 30 E buzando entre 20° y 30° NE y llevando la secuencia de la parasecuencia 1 de base a techo, en la reconstrucción paniplática se corrige esta secuencia estructural determinando su base con base en sus estructuras sedimentarias. (Véase figura 13)

Falla de Silena: se presenta una falla de carácter inverso de tipo local con una dirección N 30/40 W buzando 60° hacia el SW y pone en contacto las parasecuencias 1 y 2 de la sección estratigráfica levantada. Esta falla pone a la secuencia normal ascendiendo estratigráficamente. Se considera como una de las fallas más importantes del área del estudio, dirección aproximada N 35 E, girando para volverse casi N-S. Buzando al oeste. Su traza se localiza al occidente de Neiva a una distancia mínima de 2,5 km aproximadamente y al oriente del área de estudio. Pone en contacto rocas de la Formación Gigante con rocas del Grupo Honda. Afectando depósitos cuaternarios en los cuales ha manifestado actividad reciente. (Gonzalez Letrado, Gonzalez Lopez, & Sterling Cabrera, 2015). (Véase figura 13)

Falla el mudo: Se presenta una falla de carácter inverso que corresponde a una falla antitética del sistema de fallas de la Boa, generando en el área rocas cataclásticas de tipo microbrechas y correspondiente al flanco oriental del Anclinal del indio. (Véase figura 13)

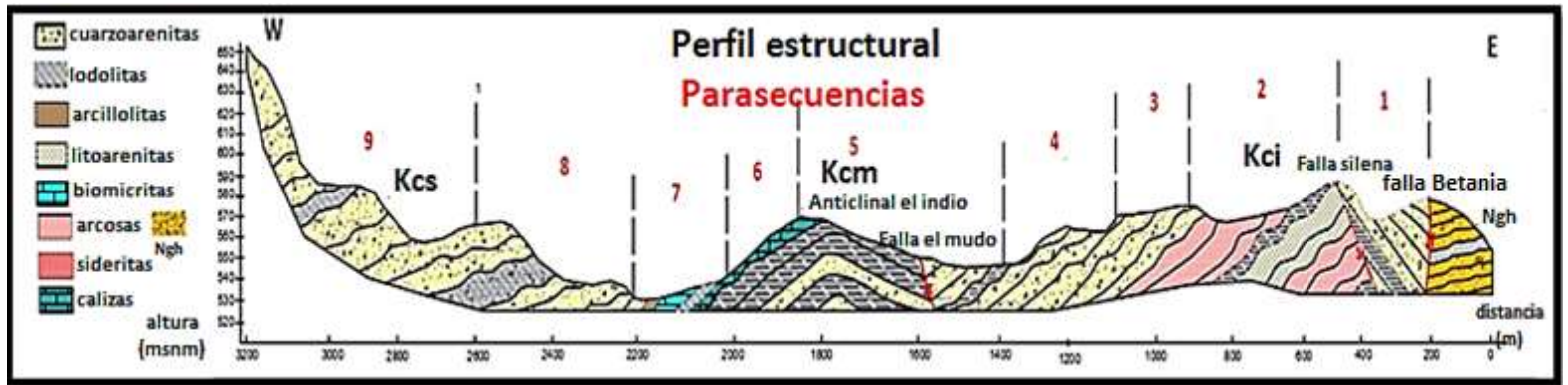


Figura 13. Perfil estructural de la Formación Caballos, sección el Juncal

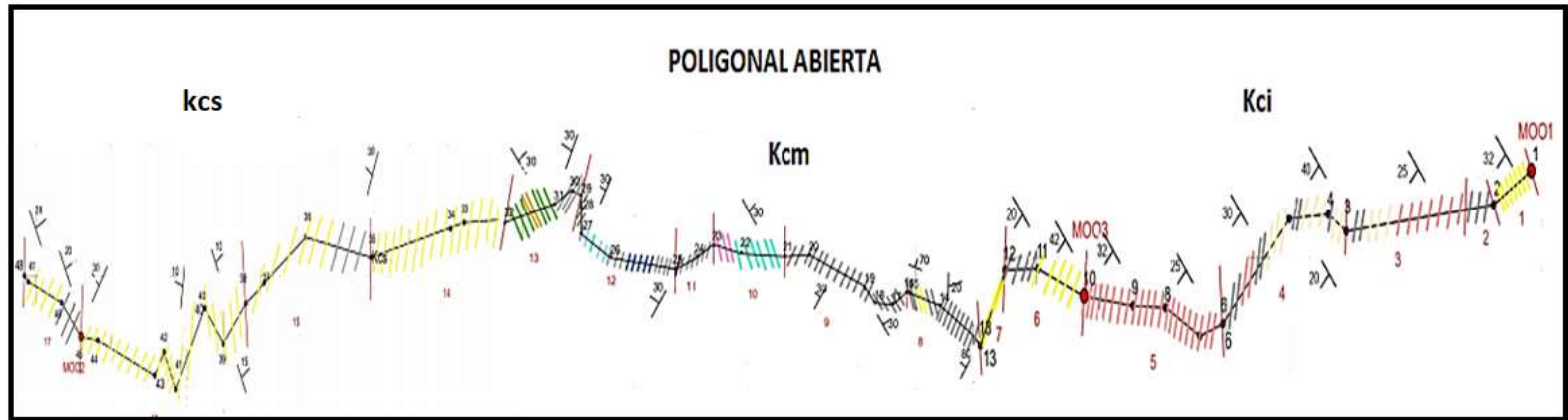


Figura 14. Poligonal abierta levantada para la Formación Caballos, sección el Juncal

6. GEOLOGÍA LOCAL DE LA ZONA

Para el levantamiento detallado de la Formación Caballos, objetivo del presente trabajo y después de un reconocimiento general del área fue seleccionada la sección Hacienda Buenavista y Finca el Cucharó, ya que en este carretable aflora en su totalidad los tres miembros de la Formación Caballos.

Para el levantamiento de la columna estratigráfica en el sector de Buenavista – Cucharó, se realizó una poligonal abierta para cada miembro de la Formación Caballos (véase Figuras 15, 16,17) con brújula, GPS y hip-chain y en la cual se realizaron 48 puntos de control geológico (véase Tabla 2).

Tabla 2

Coordenadas de la poligonal abierta, Formación Caballos, sección el Juncal

Puntos	Este	Norte	Altura (m)
1	863096,8	817210,4	452.64
2	856084,0	807674,9	547.09
3	859831,8	807851,8	565.77
4	857491,3	807886,4	567.3
5	856024,0	807646,0	570.72
6	855791,0	807622,9	570.81
7	855762,9	807637,6	570.96
8	855699,2	807633,8	571.73
9	855594,5	807543,2	571.23
10	855504,4	807557,1	566.72
11	855452,3	807558,8	566.82
12	855375,9	807566,8	564.63
13	855302,1	807590,4	558.82
14	855250,5	807589,5	551.9
15	853069,0	807599,9	551.27
16	855211,4	807525,1	551.25
17	855144,2	807569,2	551.03
18	855558,0	807532,8	552.27

19	855087,1	807587,2	553.49
20	855085,6	807587,7	555.47
21	855060,4	807570,6	556.57
22	855028,3	807573,2	561.39
23	855010,6	807594,7	559.8
24	854911,4	807635,7	557.45
25	854867,8	807633,6	554.59
26	854790,4	807638,3	550.55
27	854739,9	807650,2	544.21
28	854709,6	807632,3	541.44
29	854673,7	807617,7	544.08
30	854557,4	807632,5	542.53
31	854505,3	807663,5	542.5
32	854506,0	807693,4	549.79
33	854504,2	807715,1	555.71
34	854487,8	807721,9	557.76
35	854458,6	807704,3	565.23
36	854370,0	807679,5	567.63
37	854242,7	807674,3	572.5
38	854206,2	807665,6	576.66
39	853994,2	807625,4	579.63
40	853821,1	807653,5	582.75
41	853710,3	807589,6	598.18
42	853658,5	807560,7	604.52
43	853598,5	807504,5	607.86
44	853548,7	807554,6	619.77
45	853472,2	807440,4	626.06
46	853441,3	807492,4	632.83
47	853416,2	807459,6	643.91
Finca el Cucharo	853264,8	807509,0	563.85

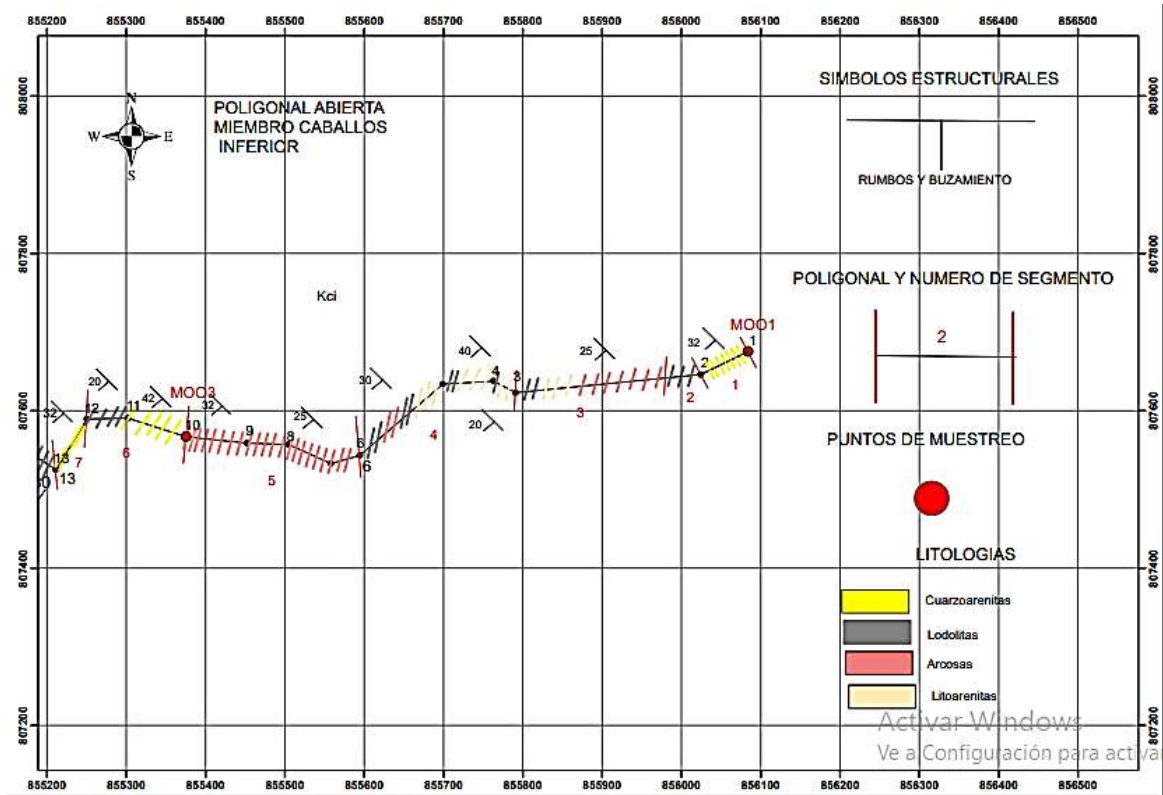


Figura 15: Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Inferior

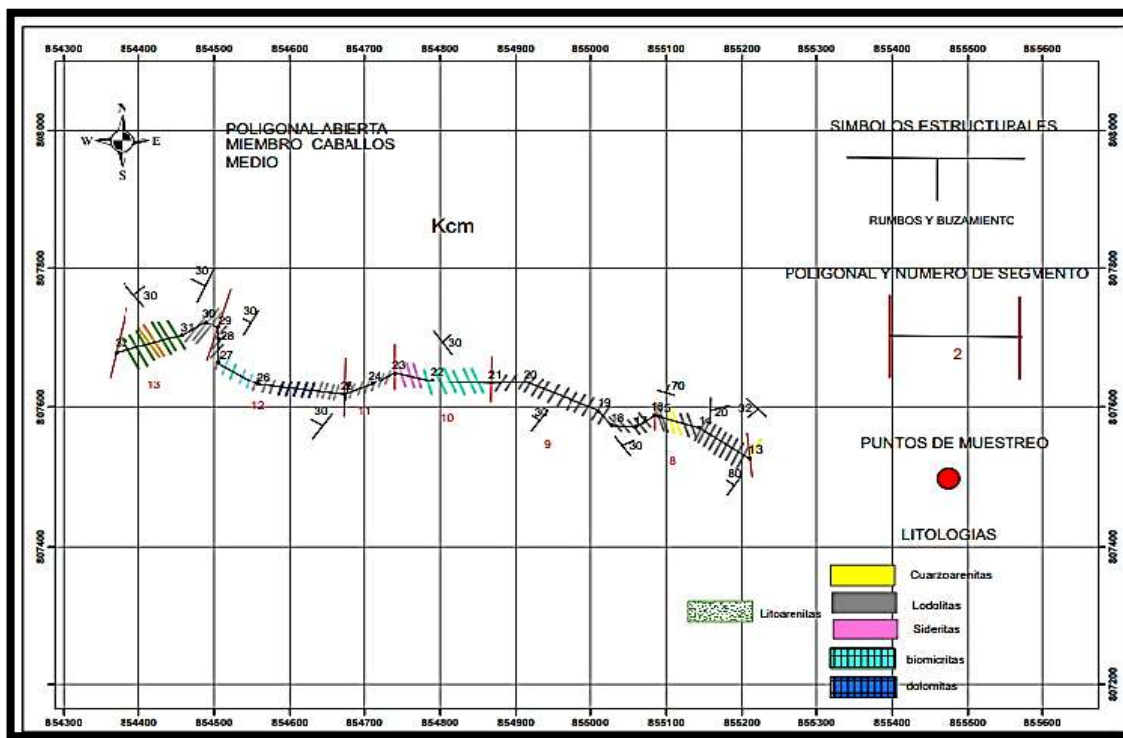


Figura 16: Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Medio

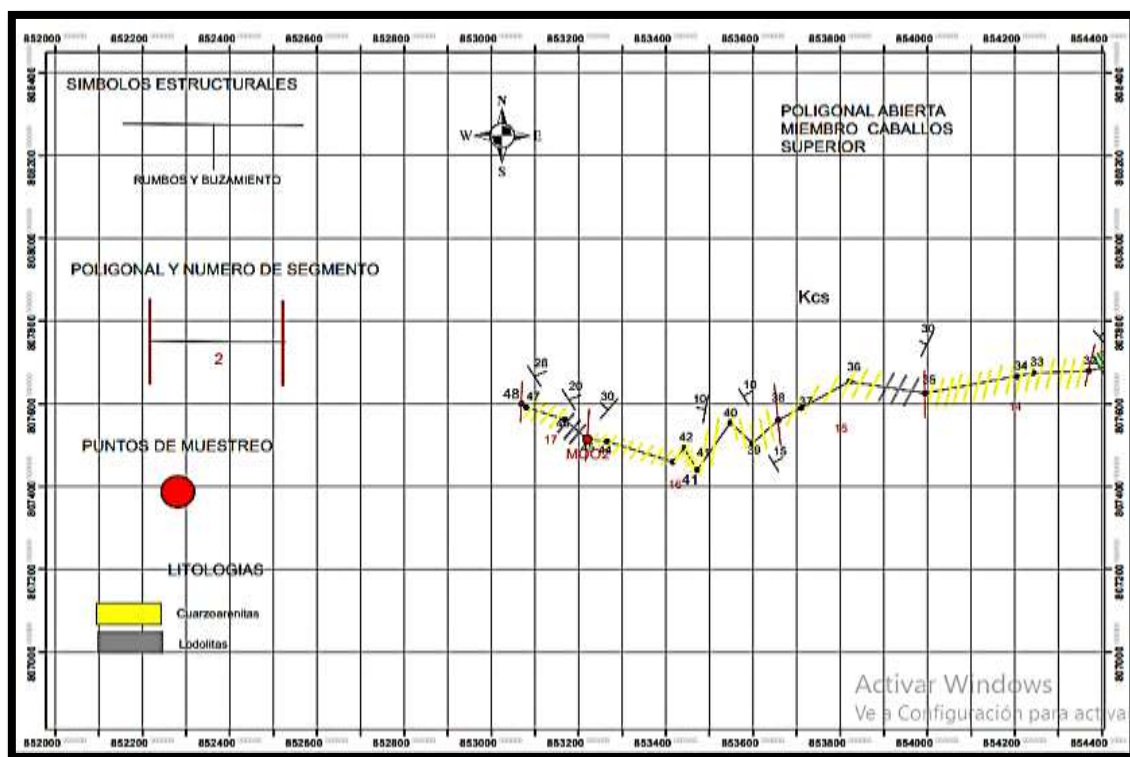


Figura 17: Poligonal abierta elaborada para el miembro Caballos Superior

6.1. ESTRATIGRAFIA PARA LA ZONA DE ESTUDIO

Como uno de los objetivos centrales del proyecto es el levantamiento de las columnas estratigráficas de la Formación Caballos para el área Hacienda Buenavista y Finca El Cucharó, con cuatro días de campo, fue realizada la cartografía geológica y representada en el mapa geológico a escala 1:5000 (véase plano y figura 18).

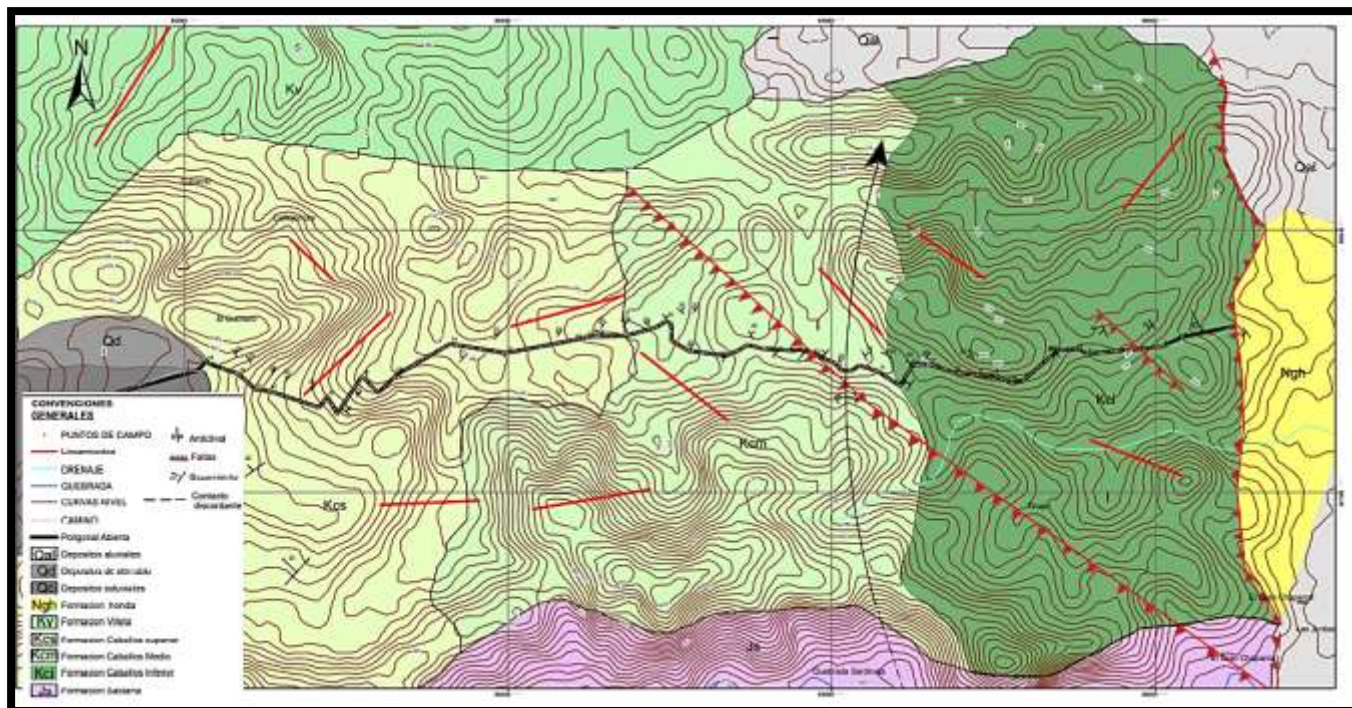


Figura 18: Plano geológico de la zona de estudio. Se muestra la cartografía geológica realizada en la sección estudiada. Tomada y restituido de la plancha 323 IV C del IGAC.

Así también fue levantada la sección estratigráfica por el método de la poligonal abierta; posteriormente esta poligonal fue representada en un plano planimétrico separándola por segmentos, en esta, y teniendo en cuenta todos los parámetros estructurales como son: Orientación de las capas (rumbos y buzamientos), fallas y pliegues se realizó el balanceo de las secciones por el método geométrico y se determinó el espesor real de la Formación Caballos, el cual tiene 220 metros. (Véase figura 19)

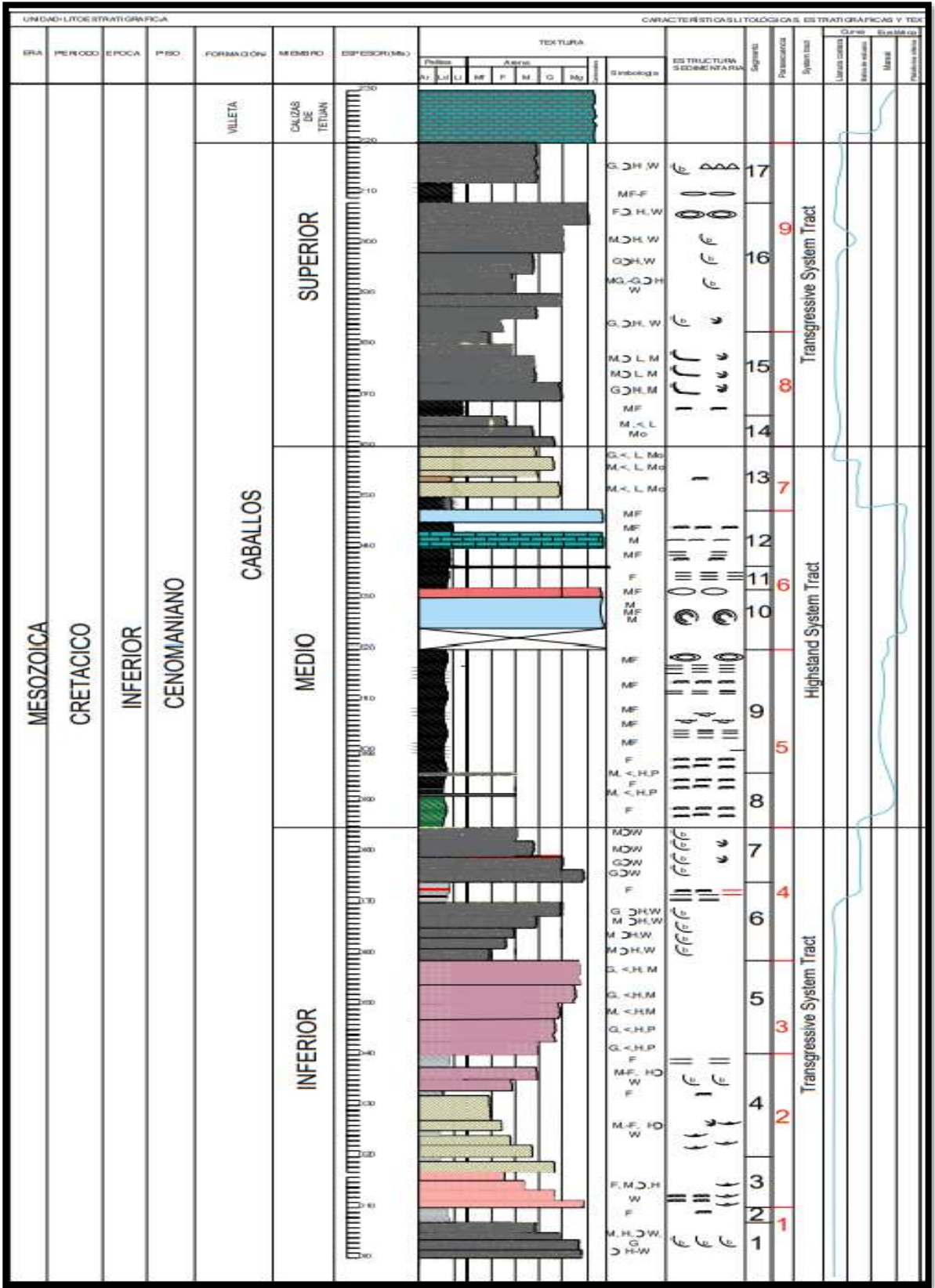


Figura 19: Columna estratigráfica detallada de la Formación Caballos en el sector el Juncal


TEXTURA				ESTRUCTURA SEDIMENTARIA		TIPO DE LAMINACION
SELECCION	REDONDEZ	ESFERICIDAD	ESTRATIFICACION			
w: Muy buena W: Buena Mo: Moderada P: Pobre VP: Muy pobre	< Sub-angular ○ Sub- redondeado ○ Redondeado	L: Baja H: Alta	MF: Muy fina F: Fina M: Media G: Gruesa MG: Muy gruesa	○ Nodulos ferruginosos ○ Madrigueras △ Ondulas ○ Lentejones ○ Fosiles	Estratificación cruzada de bajo ángulo Estratificación cruzada planar Estratificación cruzada en artesa	≡ Laminacion plana paralela ≡ Laminacion ondulosa paralela ≡ Laminacion ondulosa no paralela ≡ Laminacion plana discontinua
						

Figura 20: Simbología para rocas presentes en la columna estratigráfica

En la sección estratigráfica levantada fueron identificadas claramente los tres miembros que comprende la Formación Caballos, la identificación y descripción petrográfica, textural, composicional y el análisis de las facies sedimentarias presentes de los tres miembros de la Formación caballos, como también el análisis de las estructuras sedimentarias externas (forma, espesor, tipos de contactos) e internas (laminación, estratificación cruzada, variaciones granulométricas), se pudo construir la curva eustática (véase figura 19) que se presentan en las capas de la Formación Caballos permitieron la división de acuerdo a los parámetros de la estratigrafía secuencial en segmentos, parasecuencias y estas a su vez interpretadas representan los sistemas deposicionales o System Tract los cuales se asocian en el área a las secuencias de Transgressive System Tract para el miembro inferior y superior y Highstand System Tract para el miembro medio.

Tabla 3

Localización geográfica de las muestras descritas

Segmento	Punto	Muestra	Este	Norte	Altura (m)	Análisis
1	1	SM 001	863096,8	817210,4	452.64	PP, PR, DC
2	3	SM 005	859831,8	807851,8	565.77	DC
3	entre 2 - 3	SM 004	856084	807674.9	547.09	DC
4	5	SM 006	856024,0	807646,0	570.72	DC
5	8	SM 007	855699,2	807633,8	571.73	DC
6	10	SM 003	855504,4	807557,1	566.72	PP, PR, DC

7	13	SM 008	855302,1	807590,4	558.82	DC
8	14	SM 009	855250,5	807589,5	551.9	DC
9	19	SM 010	855087,1	807587,2	553.49	DC
10	22	SM 011	855028,3	807573,2	561.39	DC
11	24	SM 012	854911,4	807635,7	557.45	DC
12	27	SM 013	854739,9	807650,2	544.21	DC
13	entre 31 - 32	SM 014	854506	807693,4	549.79	DC
14	34	SM 015	854487,8	807721,9	557.76	DC
15	37	SM 016	854242,7	807674,3	572.5	DC
16	45	SM 002	853472,2	807440,4	626.06	PP, PR, DC
17	47	SM 017	853416,2	807459,6	643.91	DC

La tabla 3 muestra la localización geográfica de las rocas descritas en cada segmento, la última columna da a conocer los análisis realizados a cada muestra donde, PP: porosidad y permeabilidad, PR: petrografía, DC: descripción de campo. Autoría propia.

6.1.1. MIEMBRO CABALLOS INFERIOR (EL OCAL)

El miembro Caballos Inferior de la Formación Caballos tiene un espesor real de 84.80 metros y se divide en 7 segmentos, desde el segmento 1 al 7, (puntos 1 al 13 de la poligonal).

- **Segmento 1:** (0 a 8 metros)

El contacto fallado con la falla de Betania, litológicamente hacia la base de la unidad (puntos 1 al 2) se presenta un conjunto de estratificación fina a media con un espesor real de 8 metros (véase figura 21) y conformado por areniscas conglomeráticas con estratificación media a gruesa de color gris claro amarillento están conformados con granos gruesos a muy gruesos de forma subredondeados, bien seleccionado con capas granodecrecientes y estratificación cruzada de bajo ángulo, localmente presenta madrigueras de tipo talacinoideas, composicionalmente conformadas por cuarzo hialino y localmente lechoso (85%), y supreyacen en contacto gradacional de Cuarzoarenitas de color gris claro en capas de estratificación media a fina

granodecrecientes, de estratificación ondulada con algunas madrigueras de color gris verdoso con estratificación fina a muy fina.



Figura 21: Cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas Tomada por autores.

- **Segmento 2:** (8 a 10 metros)

Con contacto erosivo se presenta una secuencia de estratificación fina a muy fina con un espesor de 2m (puntos entre 2 y 3) y conformado por lodolitas de color violáceo a gris claro en capas tabulares y localmente lenticulares, con laminación ondulosa paralela.



Figura 22: Lodolitas de color violáceo a gris claro con laminación ondulosa paralela. Tomada por autores

- **Segmento 3:** (de 10 a 20 metros)

Suprayaciendo esta sección (puntos 2 y 3) y en contacto erosivo se presenta un conjunto de estratificación fina a media con un espesor de 10 metros y conformados litológicamente por arcosas de color rojizo en capas de estratificación fina a media, conformada por granos granodecrecientes (medio a fino) subangular a subredondeado medianamente seleccionado, conformado por cuarzo (90%), feldspatos (6%), líticos (2%), matriz arcillosa ondulitas de corrientes y estratificación cruzada en artesa



Figura 23: arcosas de color rojizo en capas de estratificación fina a media. Tomada por autores.

- **Segmento 4:** (20 a 40 metros)

Con un espesor real de 20 metros fue levantado el segmento 4 entre los (puntos 3 y 6) y conformado por una secuencia de areniscas líticas de color gris amarillento a violáceo en capas de estratificación fina a media, granodecrecientes, conformado por Cuarzo hialino (85%) , líticas (tobas, chert, areniscas 10%), feldspatos (ortoclasas 2%) y matriz arcillosa (3%), suprayacidas por arcosas líticas de color gris claro de capas con estratificación medias a finas y con estructuras sedimentarias internas de tipo estratificación cruzada de bajo ángulo, hacia el tope de este segmento se presenta una secuencia de estratificación fina de lodolitas verdosas, blandas, fisiles. En general se observa en este segmento en las areniscas estratificación cruzada en artesa con delgadas intercalaciones de lodolitas en capas finas con laminación plana paralela discontinua.



Figura 24: Areniscas líticas con intercalaciones de lodolitas de color gris amarillento a violáceo en capas de estratificación fina a media. Tomada por autores.

- **Segmento 5:** (40 a 58.5 metros)

18.5 metros de espesor real (puntos 6 a 10) se presenta una secuencia de estratificación media a gruesa de arcosas de color gris claro a rosado, localmente oxidado en capas granocrecientes, subangular, de composición conformada por cuarzo hialino (35%), feldespatos (ortoclasa 15%), líticas (5%) y matriz limoarcilloso (5%).



Figura 25: Arcosas grises claro a rosadas localmente oxidadas. Tomada por autores.

- **Segmento 6:** (58.5 a 74 metros)

Tiene un espesor real de 15.5 metros (puntos 10 a 12), este segmento se encuentra representado por una secuencia de 11.5 metros de cuarzoareniscas de color gris claro amarillento en capas de estratificación gruesa a media, granocrecientes, de una composición conformada por cuarzo hialino (95%), minerales pesados (1%), líticos (2%), matriz limosa (3%), estratificación cruzada de bajo ángulo con presencia de madriguera y restos leñosos.

Supreyase una secuencia de 4 metros de lodolitas fisiles de gris claro a verde, blandas, con nivel de oxidación.



Figura 26: Cuarzoarenitas de color gris claro amarillento con presencia de madriguera y restos leñosos. Tomada por autores.

- **Segmento 7:** (74 a 84.9 metros)

Conformada por una sección de cuarzoareniscas amarillentas tiene un espesor de 10.9 metros, (puntos 12 a 13 de la poligonal) en capa de estratificación media a gruesa granodecreciente, con estratificación cruzada de bajo ángulo y hacia el tope ondulitas, madrigueras (pachignea) en la base de las capas.



Figura 27: Secuencia de Cuarzoarenitas amarillentas en capa de estratificación media a gruesa. Tomada por autores.

6.1.2. MIEMBRO CABALLOS MEDIO (ALPUJARRA)

El miembro Caballos Medio de la Formación Caballos tiene un espesor real de 75.2 metros y se divide en 6 segmentos, desde el segmento 8 al 13, (puntos 13 al 32 de la poligonal).

- **Segmento 8:** (84.9 a 95.9 metros)

Con un espesor real de 11 metros (puntos 13 a 16), está secuencia se inicia con un paquete de lodolitas gris verdosa oxidada, seguida por una secuencia de lodolitas gris oscuras, fisiles con niveles de óxido junto a delgadas intercalaciones de areniscas cuarzosas.



Figura 28: Lodolitas gris verdosa con niveles de oxidación. Tomada por atores.

- **Segmento 9:** (95.9 a 120 metros)

Espesor real de 24.1 metros (puntos 16 a 21), es una unidad conformada litológicamente por una secuencia de lodolitas, siendo en su base y hasta la parte media lodolitas calcáreas de color gris oscuro, fisiles, duras en capas de estratificación fina, con laminación interna ondulante. Hacia el techo son lodolitas negras localmente calcáreas, fisiles, blandas, con capas de estratificación fina a muy fina, con delgados niveles de concreciones sideríticas.



Figura 29: Lodolitas calcáreas de color gris oscuro, fisiles, duras en capas de estratificación fina. Tomada por autores.

- **Segmento 10:** (120 a 132.2 metros)

Suprayaciendo en contacto erosivo y con 4 metros cubiertos se presenta una secuencia con una potencia de 12.2 metros (puntos 21 a 24), se tiene un paquete de 6 metros de biomicritas oscuras con capas de estratificación media (WASCKSTONE) con delgados niveles de lodolitas fisiles. En el tope del segmento se tiene una secuencia de 2.2 metros de capas finas de sideritas de color rojizo en forma tabulares y ondulares.



Figura 30: Biomicrita oscuras con niveles de lodolitas fisiles y con capas finas de sideritas. Tomada por autores.

- **Segmento 11:** (132.2 a 136.1 metros)

Con un espesor real de 3,9 metros (puntos 24 a 25), es una pequeña sección conformada por lodolitas negras fisiles en capas de estratificación fina, localmente calcáreas, con intercalación de un manto de carbón de 0.3 metros de espesor, de color negro frágil de tipo lignito.



Figura 31: Lodolitas negras fisiles con intercalación de carbón. Tomada por autores.

- **Segmento 12:** (136.1 a 147.8 metros)

Con un espesor real de 11.7 metros (puntos 25 a 28), lo conforma una secuencia de lodolitas de color gris oscuro a violáceo localmente calcáreas, fisiles, blandas, con laminación interna onduloza. Seguida de una secuencia de dolomitas de color gris claro a amarillento, finas, homogéneas. Continuando a una sección de lodolitas calcáreas fisiles y termina con la sección de Biomicritas con fragmentos de fósiles de bivalvos.



Figura 32: Biomicritas con fragmentos de fósiles de bivalvos. Tomada por autores.

- **Segmento 13:** (147.8 a 160 metros)

Con un espesor real de 12.2 metros (puntos 28 a 32), lo constituye una secuencia de lodolitas, litoarenitas, arcillolitas y areniscas. Las lodolitas son tipo sideríticas de color rojizo, las litoarenitas son verdosas. Las arcillolitas son violáceas semiplásticas con desarrollo de lentes caolinitizados. Las areniscas son líticas de color gris claro amarillentas en capas de estratificación media de grano medio a grueso, cuya composición es cuarzo (80%), fragmentos líticos (15%) y una matriz limo arcillosa (5%).



Figura 33: Arcillolitas de color violáceas semiplásticas. Tomada por autores.

6.1.3. MIEMBRO CABALLOS SUPERIOR (CABALLOS)

El miembro Caballos Superior tiene un espesor real de 60 metros y se divide en 4 segmentos, desde el segmento 14 al 17, (puntos 32 al 48 de la poligonal).

- **Segmento 14:** (160 a 166 metros)

Con un espesor real de 6 metros (puntos 32 a 35), es una unidad de cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas en capas de estratificación media y granodecrecientes, composicionalmente conformada por cuarzo (89%), minerales pesados (7%) y matriz (4%). Presenta estratificación cruzada planar y con presencia de ondulitas, hacia el tope presencia de madriguera de un solo tipo.



Figura 34: Cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas en capas de estratificación media. Tomada por autores.

- **Segmento 15:** (166 a 182.8 metros)

Con un espesor real de 16.8 metros (puntos 35 a 38), es un segmento formado en superioridad por lodolitas fisiles de color gris claro con raicillas. Hacia la base está totalmente conformado por cuarzoarenitas de color gris claro en capas de estratificación media a gruesa, bien seleccionadas, granodecipientes y con estratificación cruzada planar localmente ondulitas simétricas, presenta huellas de bioturbación por madrigueras de tipo epichinia, con presencia de glauconita.



Figura 35: Cuarzoarenitas de color gris claro en capas de estratificación media a gruesa. Tomada por autores.

- **Segmento 16:** (182.8 a 208 metros)

Con un espesor real de 25.2 metros (puntos 38 a 45), constituida exclusivamente por cuarzoarenitas dividida en dos partes, una sección gruesa de 7.2 metros es cuarzoarenitas blanco amarillenta en capas de estratificación gruesa granocrecientes, presentan estratificación cruzada de bajo ángulo, presentan huellas de madriguera y en algunos niveles presencia de glauconita. Y la otra sección muy gruesa de 18 metros es cuarzoarenitas de color gris claro a blancas en capas de estratificación gruesa a muy gruesa, granocrecientes, bien seleccionadas, con estructuras sedimentarias tipo estratificación cruzada de bajo ángulo, en el tope de algunas capas se presentan costras ferruginosas con presencia de glauconita.



Figura 36: Cuarzoarenitas blanco amarillenta en capas de estratificación gruesa. Tomada por autores.

- **Segmento 17:** (208 a 220 metros)

Con un espesor real de 12 metros (puntos 45 al 48 de la poligonal), litológicamente hacia la base de la unidad se encuentra una secuencia de lodolitas fisiles, de color gris claro en capas de estratificación fina a muy fina. En la parte media y el tope es dominado por cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas en capas de estratificación gruesa a muy gruesa, de formas tabulares con estructuras sedimentaria de tipo estratificación cruzada de bajo ángulo y localmente ondulada con delgados niveles de lodolitas y con presencia de glauconita.



Figura 37: Cuarzoarenitas de color gris claro amarillentas con delgados niveles de lodolitas y con presencia de glauconita. Tomada por autores.

7. PETROFISICA

En el desarrollo del proyecto “LEVANTAMIENTO ESTRATIGRAFICO DETALLADO DE LA FORMACIÓN CABALLOS, SECCIÓN EL JUNCAL” y con base en los objetivos propuestos fueron realizados varios análisis de laboratorio con el objeto de caracterizar mineralógica y petrográficamente las diferentes litofases determinadas en el levantamiento estratigráfico elaborado para la Formación Caballos.

- Análisis petrográfico macroscópico para la determinación textural y mineralógica de la Formación Caballos (3 muestras).
- Determinación de la porosidad de tres muestras por el medio del Porosímetro Ruska de expansión de Helio.
- Determinación de la permeabilidad de tres muestras por medio del permeámetro Ruska para gases.

7.1. ANÁLISIS PETROGRÁFICO MACROSCÓPICO PARA LA DETERMINACIÓN TEXTURAL Y MINERALÓGICA DE LA FORMACIÓN CABALLOS

Complementando el análisis textural mineralógico generalizado realizado en campo para la caracterización litoestratigráfica de las unidades estudiadas, principalmente en de los miembros estudiados de la Formación Caballos se realizó el análisis textural y composicional en campo de 13 muestras para la sección Caballos Inferior, 19 muestras para la sección Caballos Medio y 16 muestras para la sección Caballos Superior. Todo esto enfocado en describir detalladamente la formación de interés del presente trabajo.

Se recolectaron las muestras más representativas de la Formación Caballos y mediante el microscopio estéreo binocular Sc-jsz6d 200x Zoom disponible en el Museo Geológico a las cuales se le realizaron la descripción detallada y el análisis petrográfico de 3 muestras en el laboratorio de rocas adscrito a la facultad de ingeniería para la determinación textural y mineralógica con el fin de apoyar la interpretación geológica de la Formación Caballos, lo cual se encuentra representado en la columna estratigráfica detallada para cada sección de la Formación Caballos.

Las muestras tomadas de la formación caballos son: **SM-001, SM-002, SM-003**, las cuales tienen las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 4

Coordenadas de las muestras analizadas, Formación Caballos

MUESTRA	PUNTO POLIGONAL	ESTE	NORTE	COTA
001	1	863096	817210	550
002	45	853472	807440	630
003	10	855504	807557	665

7.1.1. MUESTRA SM-001 PUNTO 1

7.1.1.1. LOCALIZACIÓN

Muestra tomada sobre el carretable Buenavista – el Cucharero perteneciente al nivel miembro inferior de la Formación Caballos, la muestra se tomó en canal longitudinal de una capa de estratificación gruesa y posee las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 5

Coordenadas de las Muestra SM – 001

ESTE	NORTE	COTA
863096,8	817210,4	550

7.1.1.2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS Y RELACIONES DE CAMPO:

Roca sedimentaria clástica de color gris claro con tonalidades amarillas, dura, fresca y muy fracturada.

La muestra fue tomada de la parte media de un afloramiento de una potencia de 2m.

CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:

- **TEXTURA ESTRUCTURA:** la roca está conformada por granos de tamaño grueso a medio localmente conglomeraticos hacia su base, de forma subredondeadas a subangulares. Bien seleccionada con matriz limosa y cemento silíceo.
- **COMPOSICION MINERALOGICA:** Los minerales presentes en la sección delgada presentan la siguiente distribución:

Tabla 6

Composición mineralógica presente en la muestra SM-001

ESENCIALES	ACCESORIOS	DE ALTERACIÓN
Cuarzo.....	95%	
Matriz de limo arcillosa..	3%	
Cemento silicio.....	.1%	
Minerales pesados.....	1%	

DESCRIPCION DE MINERALES:

- **CUARZO:** Xenoblástico de forma anhedral, las formas subredondeadas con alta esfericidad, monocristalino, hialino, traslucido localmente lechoso. Los contactos entre estos son rectos, y en los bordes presentan patinas de óxido de hierro.

- **MATRIZ:** Es de aspecto limoso, de color blanco lechoso, terroso, frágil; localizada entre intersticios de los granos y posiblemente de composición caolinitica.
- **CEMENTO:** de sílice y localmente patina ferruginosas.
- **MINERALES PESADOS:** se observa algunos cristales opacos de forma anhedrales a subhedrales diseminados en el armazón; con el reflejo de la luz presenta una coloración amarilla que podría corresponder a minerales de hierro.

OTRAS OBSERVACIONES: presenta porosidad intergranular cerrada parcialmente por el cemento ferruginoso.

- **ORIGEN DE LA ROCA:** sedimentario clástico.
- **CLASIFICACION:** Cuarzoarenita.



Figura 38: Muestra SM – 001

7.1.2. MUESTRA SM -002 PUNTO 45

7.1.2.1. LOCALIZACIÓN

Muestra tomada sobre el carreteable Buenavista – el Cucharero en el punto 45 de la poligonal abierta levantada y perteneciente al miembro superior de la Formación Caballos y posee las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 7

Coordenadas de la muestra SM-002

ESTE	NORTE	COTA
853472,2	807440,4	630

7.1.2.2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS Y RELACIONES DE CAMPO:

Roca sedimentaria clástica de color blanco a gris claro con tonalidades amarillas, dura, fresca, cohesiva, puntualmente oxidada.

CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:

- **TEXTURA ESTRUCTURA:** La roca está conformada por granos de tamaño fino a grueso, de forma subangular ha redondeado. Presenta selección regular.
- **COMPOSICION MINERALOGICA:** Los minerales presentes en la muestra macroscópica presentan la siguiente composición mineral:

Tabla 8

Composición mineralógica presente en la muestra SM-002

ESENCIALES	ACCESORIOS	DE ALTERACIÓN
Cuarzo.....95%	Glauconita.....1%	
Matriz arcillosa.....3%	Óxido de hierro.....1%	

DESCRIPCION DE MINERALES:

- **CUARZO:** Se presenta a manera de granos, aspecto lechoso a hialino y fractura en forma concoidea.
- **GLAUCONITA:** Se presenta a manera de granos finos, aspecto granular a laminar y de color verde pálido.
- **MATRIZ:** Se encuentra diseminado en la roca,s de aspecto caolinitico, color blanco lechoso.
- **CEMENTO:** de sílice y localmente patina ferruginosas.
- **ÓXIDO DE HIERRO:** De color amarillo claro, se presenta puntualmente concentrado en la matriz y a manera de costras sobre los granos de cuarzo.

OTRAS OBSERVACIONES:

- **ORIGEN DE LA ROCA:** sedimentario clástico.
- **CLASIFICACION:** Cuarzoarenita.



Figura 39: Muestra SM – 002

7.1.3. MUESTRA SM -003 PUNTO 10

7.1.3.1. LOCALIZACIÓN

Muestra tomada sobre el carreteable Buenavista – el Cucharero en el punto 10 de la poligonal abierta levantada y perteneciente al miembro inferior de la Formación Caballos, y posee las siguientes coordenadas geográficas:

Tabla 9

Coordenadas de la muestra SM-003

ESTE	NORTE	COTA
855504,4	807557,1	665

7.1.3.2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS Y RELACIONES DE CAMPO:

Roca sedimentaria clástica muy friable de color amarillo a gris claro con tonalidades blancas.

CARACTERÍSTICAS MICROSCÓPICAS:

- **TEXTURA ESTRUCTURA:** La roca está conformada por granos de cuarzo, feldspatos finos a muy fino, de formas angulares a subangulares.
- **COMPOSICION MINERALOGICA:** Los minerales presentes en la muestra macroscópica presentan la siguiente distribución:

Tabla 10

Composición mineralógica presente en la muestra SM-003

ESENCIALES	ACCESORIOS	DE ALTERACIÓN
Cuarzo.....62%	Oxido de hierro.....4%	
Feldspatos..... .30%		
Matriz de limo arcillosa.....3%		
Cemento silicio..... .1%		

DESCRIPCION DE MINERALES:

- **CUARZO:** Se presenta a manera de granos angulares a subangulares traslucidos con fractura concoidea, se encuentra puntualmente recubierto por una pátina de óxido de hierro. - -
- **FELDSPATOS (ORTOCLASA):** Se presenta a manera de granos angulares a subangulares de color rosado pálido (Ortoclase), con fractura recta, se encuentra puntualmente alterado a minerales de arcilla.
- **MATRIZ:** Es de aspecto limoso, de color blanco lechoso, terroso, frágil; localizada entre intersticios de los granos y posiblemente de composición caolinitica.
- **CEMENTO:** De tipo silicio y puntualmente patina ferruginosas.
- **ÓXIDO DE HIERRO:** Se presenta a manera de costras de colores amarillos a rojizo de aspecto terroso.

OTRAS OBSERVACIONES:

- **ORIGEN DE LA ROCA:** sedimentario clástico.
- **CLASIFICACION:** Arcosa



Figura 40: Muestra SM – 003

7.2.DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DE 3 MUESTRAS POR EL MEDIO DEL POROSÍMETRO RUSKA DE EXPANSIÓN DE HELIO

Con el objetivo de aportar información adicional al análisis petrofísico de las areniscas de Formación Caballos, se le realizaron a la 3 muestras recolectadas una medida directa de la porosidad mediante el desplazamiento positivo de un gas inerte en una recámara de expansión hermética; permitiendo de esta manera que el porosímetro se base en la Ley de Boyle de los gases ideales, el cual gobierna la expansión isotérmica para determinar el volumen desconocido de un sólido colocado en una cámara de expansión. Esta prueba es conocida como porosidad de una muestra por medio del porosímetro Ruska de expansión de Helio. Es importante resaltar que la prueba determina la porosidad efectiva la cual es en realidad la que interesa para las estimaciones de petróleo y gas en sitio. La prueba fue hecha a una muestra de los puntos GPS 1, 45 y 10 de la sección el Juncal; a la cual se le extrajo un núcleo en el laboratorio de yacimientos adscrito al programa de Ingeniería de Petróleos.

7.2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

- ✓ Porosímetro de expansión de Helio RUSKA
- ✓ Bomba de vacío
- ✓ Cilindro de Helio
- ✓ Cilindros de acero
- ✓ Porta muestras



Figura 41: Porosímetro Ruska de expansión de helio.

7.2.2. Cálculos:

- **Muestra SM- 001**

Tabla 11

Datos del núcleo

Número de Muestra	SM – 001
Dimensiones	Longitud (cm) 6,592
	Diámetro (cm) 3,787
Volumen de la muestra (cm3)	74,2502

Tabla 12

Datos de la muestra SM - 001

No. Muestra	Volumen (cm³)	Presión (Psi)		Presión promedio (Psi)	
		P1	P2	P1	P2
SM 001	74,2502	99,99	33,64		
		99,89	33,19	99,92	33,61
		99,87	34		

Calculo del volumen de grano

$$V_g = V_c - V_r \left(\frac{\bar{P}_1}{\bar{P}_2} - 1 \right)$$

\bar{P}_1 y \bar{P}_2 = presiones promedio

V_r = volumen de la camara de referencia

V_c = volumen de la camara donde es introducida la muestra

V_g = volumen de grano

Los volúmenes de las cámaras son respectivamente 32,4 y 130,8 cm^3 .

Reemplazando los datos:

$$V_g = 130,8 - 32,4 \times \left(\frac{99,92}{33,61} - 1 \right)$$

$$V_g = 66,87 \text{ cm}^3$$

Calculo de la porosidad efectiva

$$\Phi_{efectiva} = \frac{V_t - V_g}{V_t}$$

$\Phi_{efectiva}$ = porosidad efectiva

V_t = volumen de la muestra

V_g = volumen de grano

$$\Phi_{efectiva} = \frac{74,2502 - 66,87}{74,2502}$$

$$\Phi_{efectiva} = 0,09932 \times 100$$

$$\Phi_{efectiva} = 9,932 \%$$

- **Muestra SM- 002**

Tabla 13
Datos del núcleo

Número de Muestra	SM – 002
Dimensiones	Longitud (cm) 6,390
	Diámetro (cm) 3,480
Volumen de la muestra (cm³)	60,7784

Tabla 14
Datos de la muestra SM -002

No. Muestra	Volumen (cm³)	Presión (Psi)		Presión promedio (Psi)	
		P1	P2	P1	P2
		98	29,01		
SM 002	60,7784	97,97	28,97	97,99	28,99
		97,99	29		

Calculo del volumen de grano

$$V_g = 130,8 - 32,4 \times \left(\frac{97,99}{28,99} - 1 \right)$$

$$V_g = 53,69 \text{ cm}^3$$

Calculo de la porosidad efectiva

$$\phi_{efectiva} = \frac{60,7784 - 53,69}{60,7784}$$

$$\phi_{efectiva} = 0,11654 \times 100$$

$$\phi_{efectiva} = 11,654 \%$$

Tabla 15
 Datos del núcleo

Número de Muestra	SM – 003
Dimensiones	Longitud (cm) 5,370
	Diámetro (cm) 2,680
Volumen de la muestra (cm³)	30,2924

Tabla 16
 Datos de la muestra SM - 003

No. Muestra	Volumen (cm ³)	Presión (Psi)		Presión promedio (Psi)	
		P1	P2	P1	P2
SM 003	30,2924	106,04	24,58		
		106,10	24,66	106,05	24,68
		106	24,80		

Calculo del volumen de grano

$$V_g = 130,8 - 32,4 \times \left(\frac{106,05}{24,68} - 1 \right)$$

$$V_g = 23,96 \text{ cm}^3$$

Calculo de la porosidad efectiva

$$\phi_{efectiva} = \frac{30,2924 - 23,96}{30,2924}$$

$$\phi_{efectiva} = 0,20908 \times 100$$

$$\phi_{efectiva} = 20,908 \%$$

7.3.DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE 3 MUESTRAS POR EL MEDIO DEL PERMEAMETRO RUSKA PARA GASES.

Con el objetivo de aportar información adicional al análisis petrofísico de las areniscas de Formación Caballos, se les realizó a las 3 muestras recolectadas de los puntos GPS 1, 45 y 10 de la sección el Juncal; la determinación de la permeabilidad mediante el permeámetro Ruska para gases.

7.3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

- ✓ Permeámetro RUSKA para gases
- ✓ Bomba de vacío
- ✓ Cilindro
- ✓ Válvula de acero
- ✓ Porta muestras



Figura 42: Permeámetro Ruska para gases.

7.3.2. Cálculos:

- **Muestra SM- 001**

Tabla 17

Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM- 001

PRESIÓN Psia	TIEMPO (s)	CAUDAL (ml/seg)	K (md)	1/ Pm (atm)
18.6487	10.02	9.98003992	148.786647	0.902818082
18.6482	10.02	9.98003992	148.804652	0.902831944
18.6443	10.03	9.970089731	148.796728	0.902940083
18.6359	10.05	9.950248756	148.80329	0.903173087
18.6319	10.06	9.940357853	148.799747	0.903284083
18.6312	10.06	9.940357853	148.825038	0.90330351
18.6279	10.07	9.930486594	148.796461	0.903395106
18.6275	10.07	9.930486594	148.810923	0.90340621

➤ Determinación del inverso de la presión media.

$$\frac{1}{P_m} = \frac{29.4}{(P_1 + P_b)}$$

$$\frac{1}{P_m} = \frac{29.4}{(18.6487 \text{ psia} + 12,32 \text{ psi})}$$

$$\frac{1}{P_m} = 0,902818082 \text{ atm}^{-1}$$

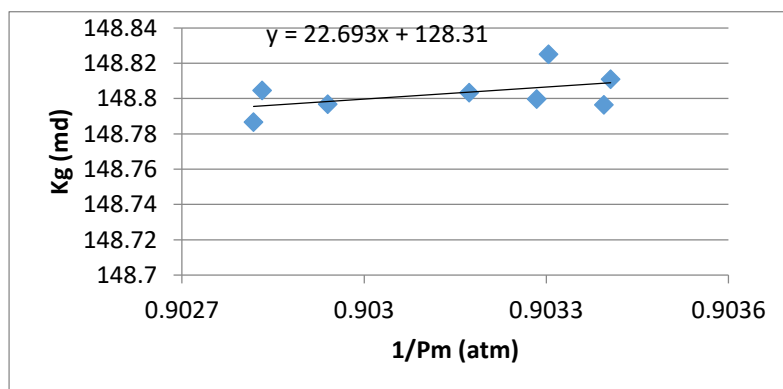


Figura 43: Grafica de Permeabilidad en función del inverso de la presión promedio.

- Ecuación de línea de tendencia:

$$f(x) = mx + b$$

$$f(x) = 22.693x + 128.31$$

- Ecuación de permeabilidad del gas:

$$Kg = m(1/Pm) + X_l$$

$$Kg = 22.693 (1/Pm) + 128.31$$

Se conoce que b representa la constante de los poros abiertos al flujo y que depende de cada medio poroso, por lo tanto, podemos calcular la b para nuestra.

$$b = \frac{m}{k_l}$$

$$b = \frac{22.693}{128.31} = 0.17686$$

Corrección del valor de la permeabilidad para el primer dato obtenido en laboratorio.

$$K = K_{\infty} * \left(1 + \frac{b}{p}\right)$$

Se calcula la presión promedio

$$\bar{P} = \frac{18.6487 + 12.32}{2} = 15.48435 \text{ psi}$$

$$K = 86.015 * \left(1 + \frac{0.17686}{15.48435}\right) = 128.310 \text{ md}$$

- **Muestra SM- 002**

Se realizan los mismos cálculos realizados en SM – 001 para calcular K para SM – 002

Tabla 18

- *Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM- 002*

PRESIÓN	TIEMPO	CAUDAL (ml/seg)	Kg (md)	1/ Pm (atm)
19.5586	10.00	10	232.7115371	0.878277858
19.5551	10.00	10	232.8803226	0.878369698
19.5497	10.02	9.98003992	232.6758043	0.878511431
19.5485	10.02	9.98003992	232.7337209	0.878542934
19.5466	10.02	9.98003992	232.8254741	0.878592817
19.5428	10.03	9.970089731	232.7768585	0.878692601
19.5325	10.05	9.950248756	232.8113257	0.878963182
19.5290	10.05	9.950248756	232.9808746	0.879055165
19.5232	10.07	9.930486594	232.7990368	0.879207637

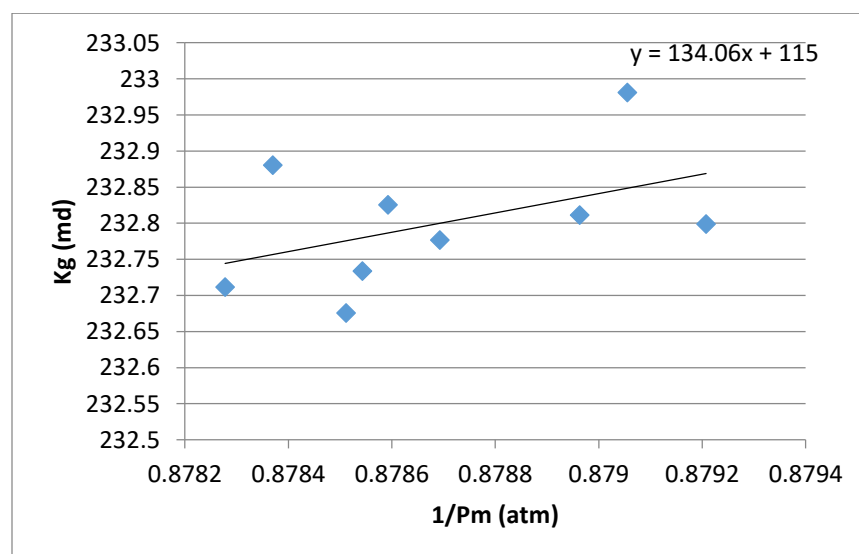


Figura 44: Grafica de Permeabilidad en función del inverso de la presión promedio.

- **Muestra SM- 003**

Se realizan los mismos cálculos realizados en SM – 001 para calcular K para SM – 002

Tabla 19

Datos para el cálculo de permeabilidad absoluta. Muestra SM- 003

PRESIÓN	TIEMPO	CAUDAL (ml/seg)	K (md)	1/ Pm (atm)
22,1635	30,06	16,63339987	200,551938	0,814867168
22,1619	30,09	16,61681622	200,399748	0,814903306
22,1612	30,08	16,62234043	200,48728	0,814919118
22,1593	30,15	16,58374793	200,078444	
22,1577	30,12	16,6002656	200,325491	
22,1543	30,13	16,59475606	200,360536	0,815075006
22,1502	30,15	16,58374793	200,350098	0,815167664
22,1493	30,12	16,6002656	200,576578	0,815188006
22,1461	30,13	16,59475606	200,605768	0,815260343
22,1443	30,15	16,58374793	200,52656	0,815301037

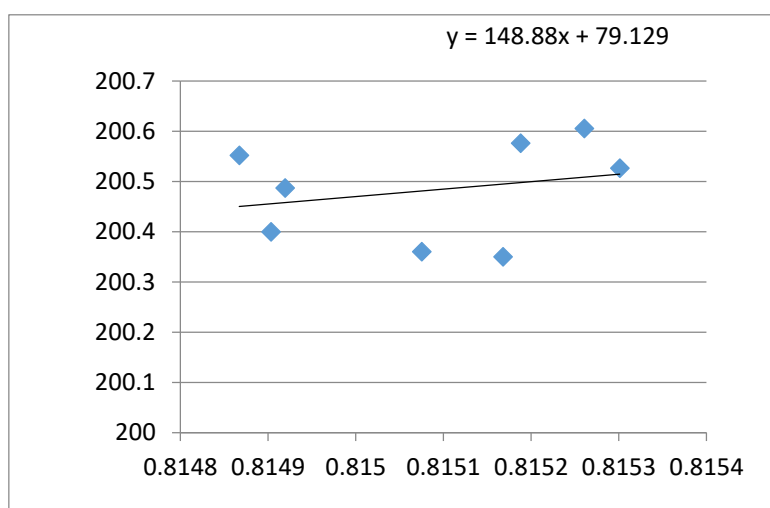


Figura 45: Grafica de Permeabilidad en función del inverso de la presión promedio.

7.4. Resultado de los cálculos realizados

Tabla 20

Tabla de resultados

MUESTRA	MIEMBRO	ϕ_e (%)	ϕ_e PROMEDIO (%)	K ABSOLUTA (md)	K PROMEDIO (md)
SM-001	INFERIOR	9,932		128,310	
SM-002	SUPERIOR	11,654		115,000	
SM-003	INFERIOR	20,908		79,129	
			14.164		107.479

7.4.1. Análisis porosidad formación caballos

El resultado obtenido al realizar el análisis de porosidad promedio a las muestras tomadas en superficie de la Formación Caballos fue 14.164

7.4.2. Análisis permeabilidad formación Caballos

La permeabilidad promedio obtenida de los núcleos de las rocas de superficie son 107.479md.

8. DISCUSION DE RESULTADOS

Este trabajo se basó en el estudio de las rocas reservorio de la Formación Caballos que cubre la sección geológica que se encuentra entre el carretable que va desde la Hacienda Buenavista a la Finca el Cucharero en el sector del Juncal con una distancia de 3,4 km y consistió en el levantamiento estratigráfico de la Formación Caballos, reconociendo sus ambientes de sedimentación, los diferentes tipos de litología, las unidades litoestratigráficas y un análisis de la estratigrafía secuencial basado principalmente en la interpretación de las estructuras sedimentarias presentes. Con estos datos se elaboró la columna estratigráfica detallada y se obtuvo la curva eustática la cual es representativa de las variaciones del nivel del mar y el ambiente sedimentario de depósito.

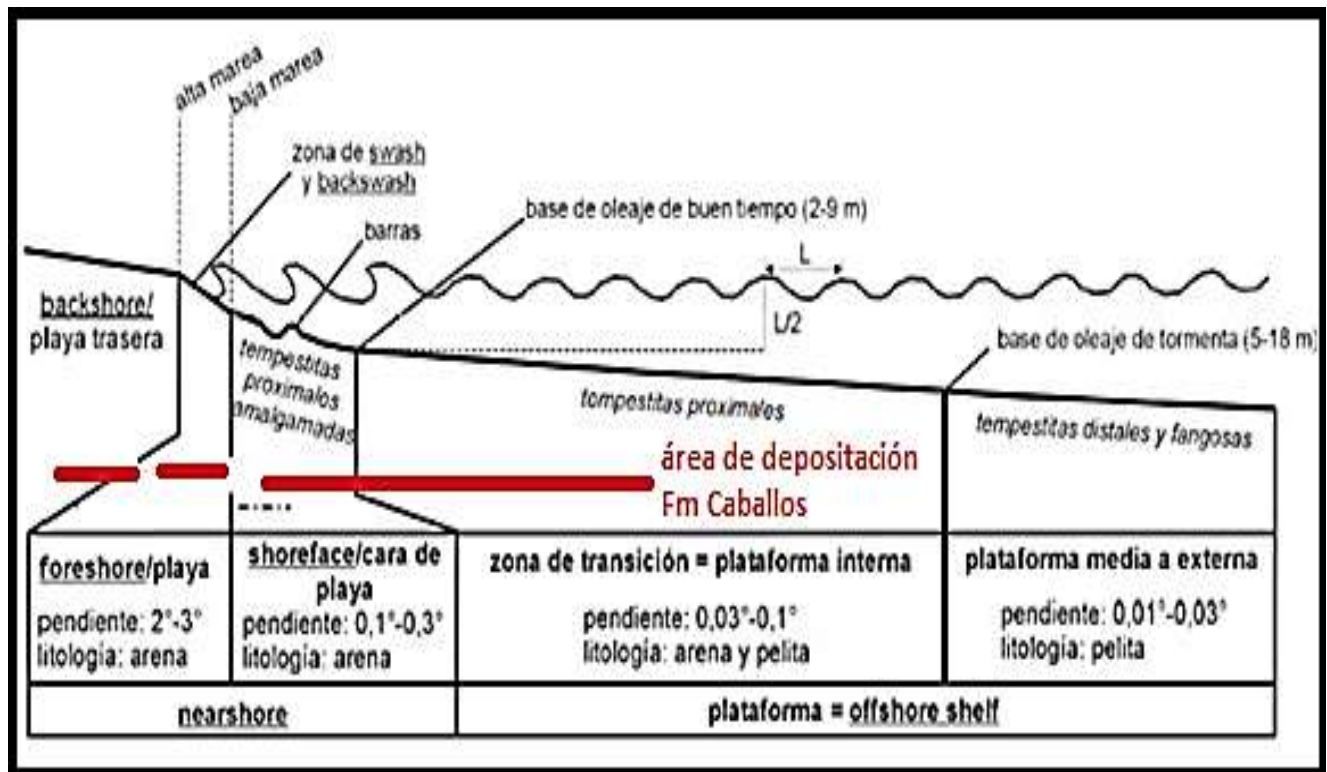


Figura 46. Ambientes de sedimentación de la Formación Caballos en la subcuenca de Neiva. Tomada y modificada de ambientes de deposición, (Pérez & Días, 2014). (Vargas, 2021).

Estudios recientes llevados a cabo en la Formación Caballos, redefinen y dividen en tres unidades llamadas; formación Alpujarra (caballo inferior), el Ocal (caballos medio) y Caballos (caballos superior) (Flórez & Carrillo, *et al.*, 1994). En el subsuelo se ha usado esta división desde al área de Neiva (Campos San Francisco y Santa Clara), Yaguará (Los Mangos) y Aipe (Balcón) hasta las áreas de Ortega (campos Ortega, Quimbaya, etc.) y Alpujarra. Para este trabajo se utiliza la terminología tradicional para denominar los tres miembros informales como Caballos Inferior, Medio y Superior dado que en la industria petrolera es más ampliamente usada la nomenclatura *sensu*, dicha (Vergara *et al.*, 1995).

Con base al análisis de las parasecuencias, las litofacies y el contenido fósil e ignofosiles presentes, se obtiene un modelo de ambientes sedimentarios para la Formación Caballos que va de llanura costera hasta plataforma interna en el sector el Juncal, mostrando así que el Caballos Inferior se encuentra en un ambiente llanura costera de la interacción entre el mar transgresivo sobre la llanura inundación, el Caballos Medio en un ambiente de bahía de estuario hasta plataforma interna y el Caballos Superior en un ambiente de plataforma marina interna. (Véase figura 48).

El Caballos inferior con base en el análisis litofacial presenta depósitos de canales fluviales junto a depósitos provenientes de llanuras de inundación. A su vez hay depósitos crevasse-splay (Véase figura 47), que representan ambientes donde el río ha roto su barrera natural y se ha desbordado, estas facies tienen cierto interés en la industria petrolera por sus facies arenosas generando rocas almacén. (Véase figura 48).

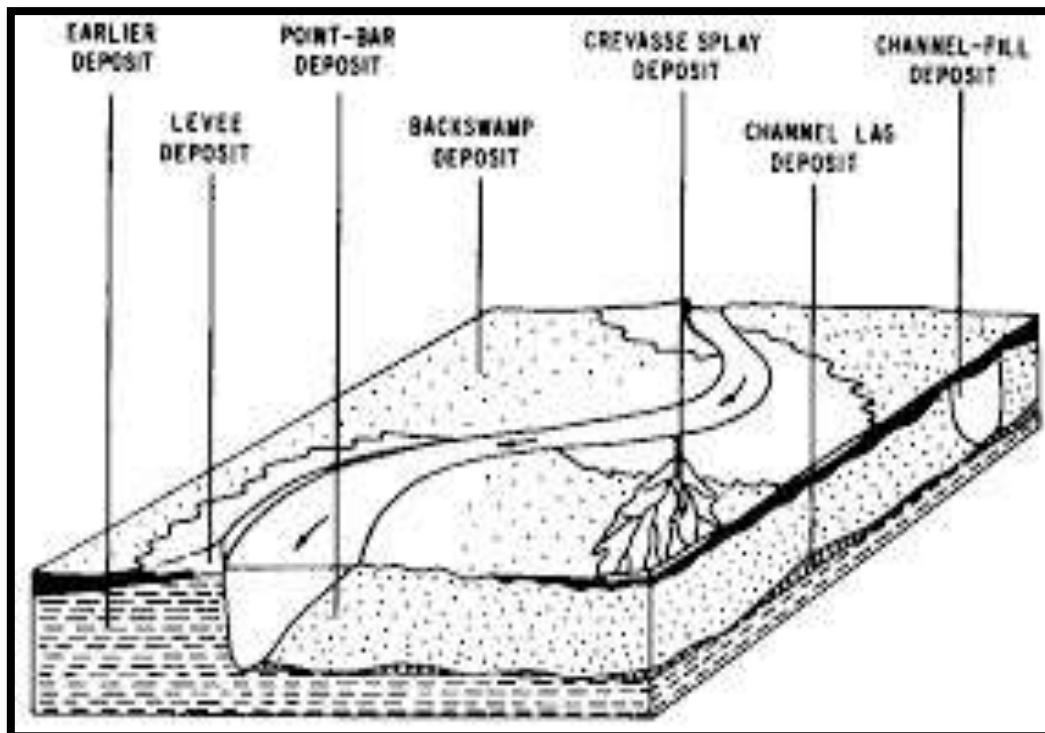


Figura 47: Crevasse - splay deposit en Caballos Inferior. Tomado de diagrama de bloques de depósitos de canales y llanuras de inundación de ríos repertantes, (McBride & Caffey, 1979).

En el Caballos Medio la depositación se presenta en un ambiente fuera de la influencia activa de mareas y olas, permitiendo interpretar que fue depositado en un ambiente de baja energía generado en un ascenso relativo en el nivel del mar, ubicándolo en un ambiente de estuario a plataforma interna. (Véase figura 48).

La base de Caballos Superior muestra depósitos de canal y llanuras de inundación, mientras en su parte superior son depósitos de plataforma marina interna, los cuales manifiesta una subida relativa de los niveles del mar para llegar transicionalmente a las Calizas de Tetuán de la formación Villeta.

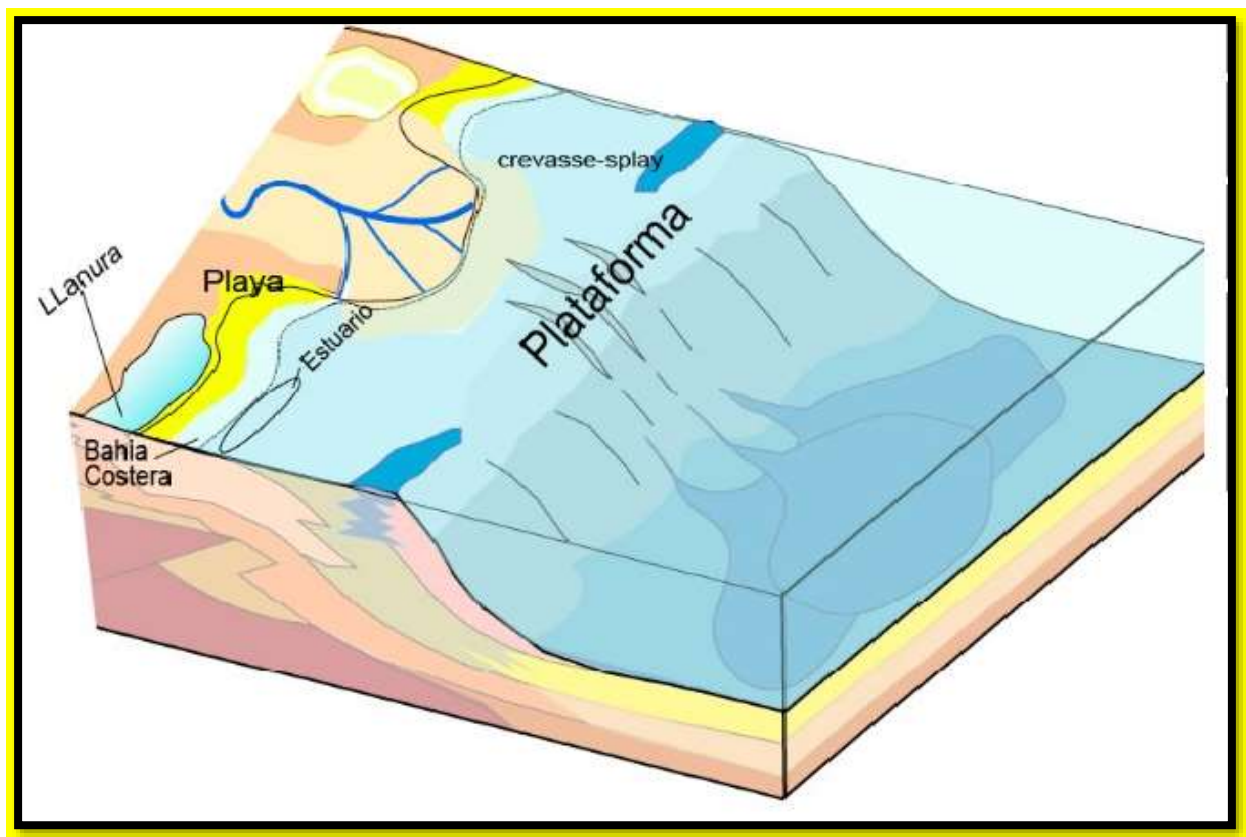


Figura 48: Ambientes de deposición de los tres miembros de la Formación Caballos. Modificada de ambiente marino (Melo & Gómez, 2015). (Vargas, 2021)

Los cálculos petrofísicos realizados a las muestras tomadas en superficie de la Formación Caballos dieron como resultado una porosidad de 14.164 % y una permeabilidad de 107.479 mD. El elemento esencial de una roca reservorio es su porosidad para permitir el almacenamiento de petróleo y gas, sin embargo, esta condición no es suficiente, los poros además deben estar interconectados para permitir el paso de los hidrocarburos a través de la roca, es decir la roca debe ser permeable. Evaluando la porosidad obtenida para la Formación Caballos, se puede afirmar que se trata de una porosidad regular (10 % - 15 %). La baja porosidad en muestras de superficie puede ser debida a procesos recientes de oxidación y alteración de los feldespatos a arcillas. Asimismo, evaluando la permeabilidad obtenida para la Formación Caballos, se puede inferir que consiste de una permeabilidad muy buena (100-1000 mD).

De todos los sedimentos, las rocas más porosas y permeables son las areniscas. Aunque se asume que los carbonatos contienen la mayor parte de las reservas del mundo. En el caso de la Formación Caballos en la sección el Juncal, su miembro inferior y superior son arenosos (conformados por areniscas), teniendo valores de porosidad de 9.932 % y 20,908 % respectivamente, permitiendo posiblemente que las rocas que conforman al miembro inferior y superior almacenen fluidos, todo eso complementado con una permeabilidad muy buena, para que los fluidos allí almacenados se muevan a través de ellas. La porosidad de las areniscas en el miembro Caballos inferior y superior puede ser por porosidad primaria o secundaria.

La relación cuantitativa entre la porosidad y la permeabilidad es sumamente difícil de determinar y varía mucho. En general al aumentar la porosidad aumenta también la permeabilidad, pero esto no es definitivo.

El análisis petrográfico realizado a tres muestras como también la descripción macroscópica general a todas las muestras de las estaciones realizadas en el levantamiento de la poligonal muestran un predominio de areniscas, arcósicas y líticas hacia la base y predominando al tope las areniscas cuarzosas.

9. CONCLUSIONES

- Se realizó el levantamiento estratigráfico detallado de la Formación Caballos en la sección el Juncal en el sector entre la Hacienda Buenavista y la finca el Cucharo, mostrando un espesor real de 220 metros.
- Obtención de la cartografía geológica a escala 1:5000 de la sección Hacienda Buenavista y Finca el Cucharo, permitiendo identificar los tres miembros (Caballos inferior, Caballos medio, Caballos superior) que conforman la Formación Caballos en la sección el juncal, siendo el Caballos superior quien cubre una mayor área en la zona de estudio. A su vez, se puede observar la presencia de un anticlinal y fallas que moldean la geología del lugar.
- Se llevó a cabo el levantamiento estratigráfico a escala 1:1000 de la Formación Caballos en la sección Hacienda Buenavista y Finca el Cucharo, indicando la presencia de cuarzoarenitas, lodolitas, arcillolitas, areniscas, calizas, biomicritas, arcosas y sideritas.
- Se obtuvieron los espesores reales para cada uno de los miembros de la Formación Caballos siendo, Caballos inferior (Ocal), con el mayor espesor de 84,8 metros, Caballos medio (Alpujarra) con un espesor real de 75.2 metros y Caballos superior (Caballos) con 60 metros de espesor real.
- Se realizó la columna estratigráfica detallada de la Formación Caballos con una nomenclatura específica adecuada para este proyecto
- Con base en el análisis litológico facial he interpretación de estructuras sedimentarias, la Formación Caballos fue dividida en 17 segmentos agrupados a su vez en 9 parasecuencias.

- El miembro Caballos inferior se ubica en un sistema de posicional de tipo 2 (Transgressive System Tract), indicando una tendencia de incremento en la relación “espacio de acomodación” contra suministro de sedimento (A/S).
- El miembro Caballos Medio se ubica en un sistema de posicional de tipo 1 (Highstand System Tract), donde se puede interpretar como un aumento en la relación (A/S) marcando un máximo en lodolitas de llanura de inundación a lodolitas de bahía.
- El miembro Caballos Superior se ubica en un sistema de posicional de tipo 2 (Transgressive System Tract), indicando una tendencia de incremento en la relación “espacio de acomodación” contra suministro de sedimento (A/S).
- Elaboración con base al reconocimiento de estructuras sedimentarias e interpretación de parasecuencias de la curva eustática, cuya misma refleja que la sedimentación en la Formación Caballos ocurrió de un ambiente de llanura costera hasta plataforma interna.
- Se determinaron las propiedades petrofísicas de las rocas de la formación mediante análisis básico petrofísico y petrografía, los cuales arrojaron como resultado una porosidad promedio de 14.164 correspondiéndole una permeabilidad promedio de 107.479 mD para la Formación Caballos en la sección el Juncal.
- Con este proyecto de grado se ha logrado recopilar información de la Formación Caballos en la sección el Juncal, representando un paso para continuar ampliando el conocimiento del Valle Superior del Magdalena en la parte de la subcuenca de Neiva, de aquellas formaciones que en un futuro se puedan convertir en potenciales yacimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos tanto de yacimientos convencionales y no convencionales.

10. RECOMENDACIONES

- Seguir trabajando en otras secciones la caracterización e investigaciones cartográficas sobre las arenas de la Formación Caballos en la subcuenca de Neiva por parte del Museo geológico y del Petróleo, con el propósito de tener una caracterización más completa de la misma.
- Realizar estudios de geoquímica en el miembro Caballos Medio con objeto de conocer a mayor profundidad su génesis.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, O., & Mosquera, D. (2014). Correlación litoestratigráfica de las Formaciones geológicas y construcción del modelo digital de los pozos petroleros del área de San Francisco Sector Palermo. Universidad Surcolombiana, Neiva-Huila.
- Arche, A. (2010). Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Madrid, España: CSIC.
- Beltrán, N., & Gallo, J. (1968). The geology of the Neiva Sub-Basin Upper Magdalena Basin, Southern portion. En: Geological Field Trips Colombia, 1959-1968. Col. Soc. Petrol. Geol. and Geophys, pp. 253-275, Bogotá.
- Carrera, D. (2015). Sección balanceada del flanco occidental de la cordillera oriental en las inmediaciones de los municipios Villarrica y Cunday en la sub-cuenca de Girardot del Valle Superior del Magdalena. Universidad Eafit. Medellín, Colombia.
- Corrigan, H. T. (1967). Guidebook to the geology of Upper Magdalena Basin (Northern portion). En: Geological Field Trips, Colombia, 1958-1978. Col. Soc. Petrol. Geol. and Geophys, 8 Field Trip, pp. 40, Bogotá.
- Duarte, E. (2003). Historia De La Cuenca Cretácea Del VSM En Un Marco Cronoestratigráfico. Implicaciones Ambientales. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Duarte, E., Cardona, A., Lopera, S., Valencia, V., & Estupiñan, H. (2018). Procedencia y diagénesis de dos secciones estratigráficas de la Formación

- Caballos en el Valle Superior del Magdalena: implicaciones en la geología y la calidad del reservorio. Universidad Nacional. Medellín, Colombia.
- Estudiantes de campo VI (2015). Guía Geológica Campo VI. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia.
- Ferreira, P., Núñez, A., & Rodríguez, M.A. (2002). Levantamiento geológico de la plancha 323, INGEOMINAS, Bogotá.
- Flórez, M. J., & Carrillo, G. (1994): Estratigrafía de la sucesión litológica basal del Cretácico del Valle Superior del Magdalena. En: Etayo Serna, F. (ed.). Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia.
- GMA. (2013). *Geología marina*. Obtenido de Introducción a la geología marina: <https://gma.icm.csic.es/sites/default/files/pdf/Introduccion-a-la-geologia-marina.pdf>.
- Marocco, R. (2009). *Introducción a la estratigrafía secuencial*. Lima: IRD.
- Marquínez, G., Morales, C. J., & Caicedo, J.C. (2002). Memoria explicativa: plancha 344 Tesalia, INGEOMINAS, Bogotá.
- Mojica, J., & Dorado, J. (1987). El Jurásico anterior a los movimientos intermálmicos en los Andes Colombianos. Parte A: Estratigrafía. En: Volkheimer, W., Edit.
- Mojica, J., & Bayer, K. (1987). Características esenciales del Valle Superior del Magdalena, una cuenca Cretácica interandina de Colombia. Aporte Proyecto IGCP-UNESCO 242, Cuencas Petrolíferas Cretácicas de América Latina, Tucumán.

Pablos, N., Rodríguez, G., & Velásquez, B. (2004). Metodología Propuesta para la Evaluación de Potenciales Reservorios, Teniendo en Cuenta los efectos diagenéticos y sus efectos: Aplicación en la Formación Caballos en el área de Alpujarra, VSM. Sociedad Internacional Petrolera, Sipepetrol Colombia.

Palencia, L., & Chavarro, M. (2013). Correlación petrofísica en superficie con subsuelo de formaciones productoras Subcuenca de Neiva. (*Tesis de grado*). Universidad Surcolombiana, Neiva.

Pérez, C., & Díaz, C. (2014). Levantamiento estratigráfico detallado para el miembro Shale de Bambucá en dos secciones de la subcuenca de Neiva. (*Tesis de grado*). Universidad Surcolombiana, Neiva.

Posamentier, H., & Allen, G. (1999). Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications, Concepts in Sedimentology and Paleontology vol. 7, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), pp. 210.

Ramon, J., & Fajardo, A. (2004). Sedimentología y Estratigrafía Secuencial de la Formación Caballos, Subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena. HOCOL S.A., Bogotá, Colombia.

Schlumberger. (2008). *Estratigrafía secuencial*. Obtenido de Oilfield Glossary: https://glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/sequence_stratigraphy.

Unión Temporal Prospección (2018). Evaluación de las Cuencas y Estructuración de Escenarios de Oferta de Hidrocarburos Convencionales y No Convencionales. Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, Colombia.

- Van Wagoner et al. (1988). An overview of sequence stratigraphy and key definitions. Editors, Sea Level Changes-An Integrated Approach, Special Publication vol. 42, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) (1988), pp. 39-45.
- Vargas, R. (2001). Geomorfología y riesgos Geológicos de la Ciudad de Neiva. Revista Ingeniería y Región. Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana.
- Vargas, R. (2002). Proyecto de Integración Cartográfica de la Geología de la Cordillera Central y Occidental de Colombia Aplicada a la Exploración Aurífera, Geotec Ltda. Anglo Gold Ashanti Colombia.
- Vargas, R. (2010). Estratigrafía del Jurásico de la región Surcolombiana. Neiva: ECOSURC. Universidad Surcolombiana.
- Vargas, R., & Lamilla, J. (2010). Reconocimiento Geológico de la cobertura Productiva de la Subcuenca de Neiva Huila Colombia Field Trip, PETROMINERALES.
- Vargas, R. (2013). Reconocimiento Geológico del Basamento Económico de la subcuenca de Neiva y su perspectiva como yacimientos no convencionales. Universidad Surcolombiana.
- Vargas, R., Pérez, C., & Díaz, C. (2014). Levantamiento estratigráfico detallado para el miembro Shale de Bambucá en dos secciones de la subcuenca de Neiva. Revista *Ingeniería y Región*, pp. 59. Universidad Surcolombiana.

Vargas, R. (2016). *Formación Caballos*. Neiva: ECOSURC. Universidad Surcolombiana.

Velandia, F., Núñez, A., & Marquínez, G. (2001). Memoria explicativa para el departamento del Huila, escala 1:300.000. INGEOMINAS, Bogotá.

Vergara, L., Guerrero, J., Patarroyo, P., & Sarmiento, G. (1995). Comentarios acerca de la Nomenclatura Estratigráfica del Cretácico Inferior del Valle Superior del Magdalena. *Geología Colombiana*, 19, pp. 21-32.