

**Geometría y Cinemática del Frente de Deformación de la Falla de Honda en la Parte Sur
del Valle Medio del Magdalena**

Oscar Eduardo Márquez Torres

Autor

PhD. Francisco Velandia

Director

Maestría De Investigación En Geología “Área De Énfasis En Hidrocarburos”



Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenierías

Escuela de Geología

Maestría en Geología

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Al profesor Francisco Velandia, director del proyecto, por el apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A todas las personas que estuvieron siempre pendientes de ayudarme a terminar esta fase de mi desarrollo profesional Marce, Nero, Gorda, Sara, Negra, Maikol, Paula, Lina y a Andrés, Joakim y Koya por acompañarme en todas las noches que pase terminando este trabajo.

Dedicatoria

*A mi madre Iris Piedad por su apoyo incondicional y siempre estar a mi lado cuando
más la necesito.*

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Objetivos.....	22
1.1 Objetivo General	22
1.2 Objetivos Específicos.....	22
2. Marco Geológico	23
2.1 Estratigrafía del Área	24
2.1.1 Paleozoico	29
2.1.2 Jurásico	30
2.1.3 Cretácico	30
2.1.4 Paleógeno	37
2.1.5 Neógeno	41
2.1.6 Cuaternario	44
2.2 Rasgos Estructurales	45
3. Marco Teórico.....	48
3.1 Geometria de Falla	48
3.2 Cinemática de una Falla	53
3.3 Estilos Estructurales en una Faja Plegada y Corrida.....	54
3.4 Configuración Tectónica y Estructural en el Sur del VMM	59
3.5 Conversión a Profundidad.....	64
3.6 Construcción de Secciones Balanceadas	66
3.7 Cálculo de Acortamiento	68
3.8 Potencial de Hidrocarburos.....	68

3.8.1 Sistema Petrolífero en la subcuenca de Honda	69
3.8.2 Conceptos De Evaluación De Play Fairway	76
4. Metodología	81
4.1 Datos Disponibles	83
4.2 Interpretación Geológica de Datos Sísmicos	87
4.3 Secuencias Sísmicas.....	92
4.4 Conversión A Profundidad	96
4.5 Retrodeformación de las Secciones Estructurales	101
4.6 Geometría de Falla de Honda	102
4.7 Análisis de Play Fairway Map	107
5. Resultados	111
5.1 Mapas Geológicos de las Secciones Estructurales.....	111
5.2 Interpretación de Líneas Sísmicas 2D.....	112
5.3 Secciones Estructurales con Retrodeformación.....	120
5.4 Análisis Cinemático de la Falla Honda.....	127
5.5 Análisis de <i>Play Fairway Map</i>	134
6. Discusión.....	144
7. Conclusiones	152
Referencias Bibliográficas	154

Lista de Figuras

Figura 1 Localización del área de estudio en la subcuenca de Honda, zona sur del Valle Medio del Magdalena (polígono rojo). La imagen del área de estudio es la combinación del Modelo de Elevación del Terreno (DEM 30x30 m) y el mapa geológico escala 1:250.000 (modificado de Caballero et al., 2013). En el mapa se destaca: Sistema de Fallas del Magdalena (SFM) en el costado occidental de la Cordillera Oriental y el frente de deformación de la Falla de Honda (línea azul) objeto de este estudio.	18
Figura 2. Línea sísmica C-79-8 adquirida por Ecopetrol con la interpretación sísmica clásica del modelo de fallas Cambras-Cambao-Falla del Alto del Trigo en la zona sur del VMM (Llanos y Camargo, 1997).	20
Figura 3. Mapa de la subcuenca de Honda en el VMM con los rasgos geológicos principales y la presencia de la Falla de Honda, objeto de este estudio. En corte geológico donde la subcuenca de Honda representa una cuenca intracordillera basculada hacia el este con tendencia homoclinal donde el registro estratigráfico cubre del Paleozoico al Cuaternario. A. Esquema estructural de San Sebastián de Mariquita a cercanías de Villeta tomado y modificado de Mojica y Franco (1990). B. Corte geológico de la zona sur del VMM tomado y modificado de Cortes (2004).	24
Figura 4. Columna Estratigráfica para el bloque colgante y yacente en la Falla de Honda utilizada en este trabajo, tras la recopilación e integración de la nomenclatura e historia tectonoestratigráfica usada para la subcuenca de Honda e información de pozos. La nomenclatura de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM), la subcuenca Central o Barrancabermeja del VMM y la subcuenca de Honda fue modificada de Barrero et al. (2007); Moretti et al. (2010); Sarmiento et al. (2015); Lamus et al. (2013).	27
Figura 5. Mapa geológico modificado de Ariadna (2009) en las inmediaciones de la Falla de Honda, donde se observan las unidades antiguas aflorantes en la Cordillera Central como la Grupo Cajamarca y en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, la unidad cretácica más antigua aflorando al este de la falla de Bituima (línea punteada negra) conocida Kmpz Pinzaima = Formación Murca descrita en este trabajo.	32
Figura 6. Mapa con los rasgos estructurales asociados a este estudio con base en la combinación del Modelo de elevación del terreno (DEM 30x30 m) y el mapa geológico escala 1:250.000 (modificado de Caballero et al., 2013) con la columna estratigráfica.	47
Figura 7. Elementos de una falla en general, para describir la orientación de un plano geológico matemáticamente se necesita conocer la dirección de inclinación, el rumbo y el buzamiento (modificado de Griem, 1997).	49

Figura 8. Clasificación de fallas de acuerdo a diferentes elementos geométricos (modificado de Shaw, Connors y Suppe, 2004; Sorkhabi, 2012).	50
Figura 9. Pliegue de flexión de falla con sus elementos de plano, rampa y superficies axiales. Evolución cinemática de un pliegue de flexión de falla teórico propuesto por Suppe (1983) y una propuesta experimental tomada de Chester et al., (1991). Las variaciones se encuentran en los cambios del buzamiento de las capas en el flanco frontal con la amplificación del pliegue (modificado Poblet, 2004; Pace y Calamita, 2015).	51
Figura 10. Pliegue por flexión de falla y elementos geométricos. A. Anticlinales por flexión de falla donde el pliegue es cóncavo hacia la falla. B. Sinclinales por flexión de falla con el pliegue convexo hacia la falla (modificado de Shaw et al., 2005).	52
Figura 11. Desplazamiento en fallas. A. Diagrama para ilustrar la distribución del desplazamiento sobre una superficie elíptica de una falla, los tonos más oscuros indican el incremento del desplazamiento hacia el centro de la falla y los elementos de desplazamiento. B. Mapa de contornos estructurales de una falla vertical con un slip vertical y una vista en tres dimensiones de esta falla tomando los elementos de localización y elevación (modificado de Kim y Sanderson, 2005; Groshong, 2006).	53
Figura 12. Los sistemas de fajas plegadas y corridas se forman en ambientes tectónicos de subducción y tienen forma típica de cuña. El desarrollo del sistema depende de la combinación de la topografía, la superficie de despegue y los procesos de erosión (modificado de Horton, 1999).	55
Figura 13. Comparación estilos estructurales de piel delgada vs piel gruesa (modificado de Shaw et al., 2005).	56
Figura 14. Falla fuera de secuencia. A. En la figura inferior, la secuencia de corrimientos tiene fallas nucleadas en los bloques yacientes de las fallas anteriores y el dominio tectónico está en la misma dirección de los corrimientos previos, los números indican la secuencia de fallamiento. En la figura superior, la falla fuera de secuencia corta el sistema de cabalgamiento (modificado McClay, 1992) B. Ejemplo gráfico de la formación de las estructuras fuera de secuencia, en la parte inferior por interposición de un obstáculo y en la parte superior por erosión en la zona trasera (modificado de Cristallini, 1998).	58
Figura 15. Falla de atajo A. Pliegue de propagación de falla con una trayectoria incipiente de la falla de atajo. B. Configuración final después del desplazamiento sobre la falla de atajo (modificado McClay, 1992).	59
Figura 16. Configuración tectónica y estilo estructural A. Mapa tectónico actual de los Andes del Norte donde interactúan las placas de Nazca y caribe de afinidad oceánica con la placa Sudamericana (modificado de Mantilla-	

Pimiento et al., 2009) el cuadro negro corresponde al área de estudio. B. Corte geológico a través de la Cordillera Oriental (línea roja) desde el Sinclinal de Guaduas a los Llanos Orientales mostrando las características de doble-vergencia en un estilo estructural de piel gruesa considerando un basamento Precámbrico a Paleozoico (modificado de Tesón et al., 2013).....	61
Figura 17. Modelos de configuración tectónica propuestos en la zona de Cordillera Central, VMM y Cordillera Oriental. A. Presencia de la placa de Nazca y la paleo placa Caribe subduciendo bajo el bloque Andino (modificado de Cortes y Angelier, 2005) B. Placa de Nazca en subducción de alto ángulo, presencia del <i>Intender</i> de Panamá y el <i>Caldas Tear</i> con sus respectivos nidos sísmicos. La imagen de tomografía presenta a través de las anomalías de atenuación la geometría de subducción (modificado de Vargas <i>et al.</i> , 2011).....	62
Figura 18. Estilo estructural de piel gruesa en el SFM en el bloque colgante asociado a la Cordillera Oriental y un estilo de piel delgada para la Falla de Honda como una falla fuera de secuencia en el bloque yacente.	63
Figura 19. Modelo teórico en las relaciones de velocidad promedio, velocidad intervállica y velocidad instantánea (modificado de Schultz, 1999).....	65
Figura 20. Subcuenca de Honda, sur del VMM. A. Mapa Geológico Regional (SGC, 2020) con los elementos estructurales principales y la posición de la Falla de Honda. B. Localización de los rezumaderos de aceite y campos de aceite y gas reportados en la base de datos de la ANH (2020). C. Localización de los pozos exploratorios y estratigráficos perforados (ANH, 2020).	70
Figura 21. Elementos del sistema petrolífero de la subcuenca de Honda, sur del VMM (modificado de Moretti et al., 2010).....	75
Figura 22. Diagrama y conceptos de jerarquía de clasificación cuenca-sistema petrolífero-play-campo descubrimiento-prospecto-lead (modificado de Magoon y Dow, 1994).....	76
Figura 23. Concepto de la forma de clasificación y su representación probabilística junto al semáforo de colores (Seubert, 2012).	77
Figura 24. Evaluación Play Fairway. A. Elementos claves en los datos de cada elemento del sistema petrolífero para determinar si está presente, ausente o puede o no estar en el primer acercamiento a la evaluación de Play Fairway, modificado de Kristoffersen (2010). B. Análisis de resultados de pozos en una cuenca ficticio para indicar el semáforo de presencia, ausencia o incertidumbre modificado de Forum (2018).....	79

Figura 25. Evaluación Play Fairway. A. Mapa semáforo ejemplo en un reservorio. B. Mapa de segmentos de riesgo (CCRS: Combined common risk segments). C. Mapa final del play de interés con la matrix cualitativa asociada, donde hay una alta probabilidad de encontrar hidrocarburo en la zona de color verde (modificado de Forum, 2018).	80
Figura 26. Diagrama de la metodología usada en este trabajo de investigación.	83
Figura 27. Base de datos mapas geológicos. A. Mapas y planchas geológicas escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano. B. Mapa geológico escala 1:250.000 del portal web Servicio Geológico Colombiano. C. Mapa regional Ariadna escala 1:250.000. D. Mapa final integrando DEM y mapa geológico final escala 1:250.000.	84
Figura 28. Modelo digital de terreno en la zona de la Falla de Honda con la localización de los buzamientos reportados, así como el diagrama de rosas donde hay una marcada orientación N10E. En azul Sección Norte, en verde Sección Central y en rojo Sección Sur.	85
Figura 29. Mapa de localización geográfica de las tres secciones estructurales (Líneas azules) con las líneas sísmicas 2D (Líneas amarillas) reportadas en la página web de la ANH con las líneas sísmicas 2D facilitadas por ECOPETROL (líneas rojas) y los pozos utilizados en la evaluación de la Falla de Honda.	86
Figura 30. Carga de datos Software 2DMove 2013.1 A. Vista de planta de la Sección Norte, integrado el mapa geológico, DEM, datos estructurales y los pozos Rio La Miel-1, Rio Negro-5 y el pozo San Antonio-1 proyectado 800 m al NW. B. Vista en corte de la Sección Norte con los pozos y líneas sísmicas balanceadas al Datum Sísmico 1400 msnm. C. Unión eventos de pozo y datos de sísmica 2D. Registro GR (azul), RES (rojo), TZ (amarillo y Tabla Excel) del pozo Rio la Miel-1 con una sección sísmica de la línea DC-1985-1825 y los eventos sísmicos asociados. Nótese la fuerte impedancia entre el basamento y las rocas del Cenozoico. D. Horizontes sísmicos interpretados en la Sección Norte.	90
Figura 31. Registros de pozos. A. Rio La Miel-1 GR (azul) ILD (rojo) CHECKSHOT (amarillo y Excel) perfil de la línea sísmica. B. San Antonio-1 GR (azul) ILD (rojo) y CHECKSHOT (amarillo y Excel).	91
Figura 32. Línea sísmica TP-95-1402 con un resumen de las secuencias sísmicas 1 – 6 del bloque yacente y A – F en el bloque colgante de la Falla de Honda elegidas para el trabajo de interpretación geológica del presente trabajo.	92

Figura 33. Definición de Velocidades Interválicas pozo Armero-1 para conversión tiempo a profundidad. **A.** Tabla TZ al GL. **B.** Gráfica T vs Z con ecuación linear y el factor de correlación 0.99 **C.** Tabla valores de velocidad. **D.** Gráfico T vs Z con las secuencias sísmicas y los topes en tiempo y profundidad. **E.** Gráfico de velocidad interválica. **F** Tabla final con los valores de velocidad interválica para cada secuencia en el pozo.....98

Figura 34. Conversión a profundidad en el software 2DMove de la sección norte a partir de las velocidades interválicas. **A.** Sección norte con polígonos en tiempo. **B.** Tabla de velocidades interválicas para cada sección sísmica. **C.** Módulo Depth Convert en el software 2DMove. **D.** Sección norte convertida a profundidad.100

Figura 35. Elementos geométricos de la Falla de Honda. **A.** Sección Norte escala 1:1 con los datos de ángulo de corte (Θ), el cambio en el buzamiento de la falla (Φ), el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) y el ángulo interlimbo (γ). **B.** De acuerdo a la clasificación de pliegues asociados a flexión de falla, la Falla de Honda tiene un sinclinal asociado y se clasifica como un multi pliegue de flexión de falla, en esta figura se ilustra la cinemática para su formación.101

Figura 36. Expresión topográfica de la Falla de Honda y extracción de información de elevación del terreno partiendo del DEM. Los trazos en el filo como QC del punto máximo de expresión topográfica y 500 metros al oeste sobre el bloque yacente denota un cambio en las elevaciones vinculadas a los cambios geomorfológicos de la falla.104

Figura 37. Magnitud del deslizamiento de la falla (dip slip). **A.** Relación del ángulo de corte y el ángulo interlimbo (Suppe, 1992). **B.** Valores geométricos de la Falla de Honda en la sección Norte.105

Figura 38. Sentido del movimiento y elementos de referencia bibliográfica en la zona del SFM ubicados en la red de Schmidt, hemisferio inferior. A la izquierda solución de mecanismos focales, en el centro datos de lineamientos sobre las fallas de Cambras y Dos Hermanos, a la derecha datos de fallas de rumbo, en rojo la Falla de Honda (modificado de Acosta et al., 2004).106

Figura 39. Sentido de la falla considerando elementos de transurrencia. A la derecha experimentos de Riedel mostrando la relación de diferentes estructuras como pliegues, fallas R y R', fracturas y fallas, las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo (modificado Cristallini, 1998). A la izquierda mapa geológico escala 1:250.000 de donde se extraerán los diferentes ejes de pliegues sinclinales y anticlinales identificados en este borde oriental del SFM, las fallas de rumbo y los cabalgamientos.107

Figura 40. Diagrama y conceptos de jerarquía de clasificación cuenca-sistema petrolífero-play-campo/descubrimiento-prospecto-lead con los datos del área de estudio en la subcuenca Honda (modificado de Magoon y Dow, 1994).....	108
Figura 41. Mapas geológicos base para las secciones estructurales Norte, Central y Sur a lo largo de la Falla de Honda con los conceptos unificados a nivel de nomenclatura estratigráfica, secuencias sísmicas y rasgos estructurales.	112
Figura 42. Interpretación sísmica Sección Norte A. Ubicación Sección Norte con líneas sísmicas y pozos. B. Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Norte. C. Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.....	114
Figura 43. Interpretación sísmica Sección Central A. Ubicación Sección Central con líneas sísmicas y pozos. B. Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Central. C. Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.....	117
Figura 44. Interpretación sísmica Sección Sur. A. Ubicación Sección Sur con líneas sísmicas y pozos. B. Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Sur. C. Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.....	119
Figura 45. Sección Norte en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.....	122
Figura 46. Sección Central en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.	123
Figura 47. Sección Sur en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.	125
Figura 48. Datos geométricos de la Falla de Honda ángulo de corte (Θ), el cambio en el buzamiento de la falla (Φ), el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) y el ángulo interlimbo (γ). B. De acuerdo a la clasificación de pliegues asociados a flexión de falla. A. Sección Norte. B. Sección Central. C. Sección Sur.....	126
Figura 49. Expresión morfológica de la Falla de Honda en el DEM y las imágenes disponibles en Google Earth para estimar el corredor de ancho de la falla. En los cuadros A y B se presenta las condiciones de los bordes sur y norte de la Falla de Honda donde termina su expresión morfológica en superficie. Los puntos indicados con estrellas marcan las características frente a las poblaciones de Honda y La Dorada.	129
Figura 50. Borde Norte de la Falla de Honda. A. Mapa geológico escala 1:100000 plancha Puerto Boyacá (modificado de Rodríguez y Ulloa, 1994). B. Línea sísmica TPB-95-16-4 interpretada donde se observa la Falla de	

Honda cortando las secuencias terciarias hasta ser cubierta discordantemente por la Formación Mesa (modificado Sarmiento, 2011).130

Figura 51. Segmentación de la Falla de Honda. A. Modelo Digital de terreno, trazos de los cuerpos de agua destacables, localidades de interés y trazo de la Falla de Honda (color vinotinto). La Falla de Honda varía su trazo a lo largo del rumbo. B. Perfiles topográficos en el bloque colgante y yacente de la Falla de Honda, donde se presentan anomalías por la erosión del río Magdalena y río Negro. C. Perfil del salto de la falla de acuerdo a la morfología actual.132

Figura 52. Sentido de la falla considerando elementos de estructurales regionales exhibidos en el mapa geológico escala 1:250.000 del SFM y datos bibliográficos de solución de mecanismos focales, datos de lineamientos sobre las fallas de Cambras y Dos Hermanos (modificado de Acosta et al., 2004).134

Figura 53. Mapa base de la evaluación de PFE de la Falla de Honda dividido en bloque yacente y colgante con la posición de los pozos clave (cuadrado negro) con su ID en la Tabla 6, pozos perforados en la zona (cuadrado vinotinto), posición de rezumaderos en superficie (ANH, 2020), campos de aceite y gas.136

Figura 54. Roca fuente - Posición de la cocina y mapas de expulsión para el Grupo Villeta con un polígono del área de estudio y la Falla de Honda. A. Mapa de la anomalía gravimétrica de Bouguer regional. B. Mapa de la posición de las cocinas de la cuenca del VMM. C. Mapa de hidrocarburo expulsado para la roca fuente cretácica (modificado de Sarmiento et al., 2011).137

Figura 55. Correlación de pozos en el bloque yacente de la Falla de Honda en dirección sur a norte.138

Figura 56. Mapas de elementos para el PFE en la Falla de Honda A. Roca Fuente B. Roca reservorio C. Trampa.141

Figura 57. Mapas de elementos para el PFE en la Falla de Honda A. Roca sello B. Migración C. Mapa integrado final.143

Lista de Tablas

Tabla 1. Lista de pozos exploratorios y estratigráficos perforados en la subcuenca de Honda, sur del VMM referenciados en la Figura 20 (modificado ANH, 2020). EsPo (Estructural Posición) BC: Bloque Colgante BY; Bloque Yacente.....	71
Tabla 2. Lista de campos productores de aceite reportados en la subcuenca de Honda, sur del VMM (modificado ANH, 2020).	72
Tabla 3. Datos de buzamientos en unidades aflorantes en cercanías a la Falla de Honda.....	85
Tabla 4. Líneas sísmicas disponibles en el área de trabajo.....	87
Tabla 5. Pozos con información de registros disponibles en el área de trabajo.....	87
Tabla 6. Pozos clave en el área de la Falla de Honda para los mapas de PFE, localización en la Figura 53.	135

Abreviaturas

3WD: *Three Way Direction* – Cierre estructural en tres dimensiones

ANH: Agencia Nacional de Hidrocarburos

BC: Bloque Colgante

BY: Bloque Yacente

DEM: *Digital Elevation Model* – Modelo de Elevación del Terreno

EsPo: Posición Estructural

Gcf: *Giga Cubic Feet* - Miles de millones de pies cúbicos de gas

GL: *Ground Level* – Elevación del suelo

FPC: Faja Plegada y Corrida

SFM: Sistemas de Fallas del Magdalena

MMBO: *Million Barrel Oil* – Millones de barriles de petróleo

OOIP: *Original Oil In Place* – Petróleo Original en sitio

OWT: *One Way Time* – Tiempo sencillo

PFE: *Play Fairway Evaluation* por sus siglas en inglés

Ro: Reflectancia de vitrinita

SCG: Servicio Geológico Colombiano

TOC: *Total Organic Carbon* – Carbono orgánico total

TWT: *Two Way Time* – Tiempo doble

TZ: *Time Depth pair* – Relación tiempo profundidad

UIS: Universidad Industrial de Santander

VMM: Valle Medio del Magdalena

VSM: Valle Superior del Magdalena

Resumen

Título: Geometría y Cinemática del Frente de Deformación de la Falla de Honda en la Parte Sur del Valle Medio del Magdalena, Colombia. *

Autor: Oscar Eduardo Marquez Torres**

Palabras Clave: Falla de Honda, Faja Plegada y Corrida, *Play Fair Evaluation*.

Descripción:

El propósito de este trabajo es contribuir con el entendimiento de la Falla de Honda a partir del conocimiento de cinemática y geometría, su relación con el Sistema de Fallas del Magdalena y las posibles zonas con potencial exploratorio de hidrocarburo convencional asociado tanto al bloque yacente como en el bloque colgante, en este sector de la subcuenca de Honda. Mediante el análisis e integración de mapas geológicos, información bibliográfica, información de pozos y líneas sísmicas 2D se identificaron cinco secuencias sísmicas coetáneas en el bloque yacente y colgante de la falla. Integrando imágenes DEM y datos estructurales se generaron secciones estructurales en profundidad, junto a perfiles de salto de falla, datos geométricos y el esquema cinemático para determinar la orientación, características geométricas, segmentación y acortamiento a través de la trayectoria de la falla. La Falla de Honda presenta tres segmentos en sus 103 km de extensión, tiene una componente de cabalgamiento y transpresión dextral con una dirección de esfuerzo principal NW-SE con rumbo en las estructuras N20E, está asociada a un sistema híbrido con deformación de piel gruesa y piel delgada dentro del sistema de faja plegada y corrida en el sistema de fallas del Magdalena y la geometría de despegue corresponde a una falla fuera de secuencia como un *shortcut* del basamento. El potencial exploratorio en el play estructural de cierre en tres dimensiones contra la Falla de Honda fue evaluado con la metodología *Play Fairway Evaluation* en los dos sistemas petrolíferos asociados Villeta-Mugrosa (bloque colgante) y Villeta-Honda (bloque yacente) donde hay un remanente potencial exploratorio convencional en la zona norte y central respectivamente.

* Trabajo de Grado para Optar por el Título de Magíster en Geología.

**Facultad Físico-química. Maestría en Geología. Director: Francisco Velandia, Geólogo PhD

Abstract

Title: Geometry and Kinematics of the Deformation Front from the Honda Fault in the south part of the Magdalena Middle Valley, Colombia

Author: Oscar Eduardo Marquez Torres**

Keywords: Honda Fault, Fault and Thrust Belt, Fair Play Evaluation.

Description:

The purpose of this work was to contribute to the understanding of the Honda Fault from the knowledge of its kinematics and geometry, the relationship with the Magdalena Fault System and the possible zones with exploration potential of hydrocarbon associated to the hanging block and the footwall block in this area of the Honda in the Middle Magdalena Valley, Colombia. Through the analysis and integration of geological maps, bibliographic information, wells and 2D seismic lines, five coetaneous seismic sequences were identified in the footwall and hanging block in the fault. Integrating DEM images and structural data, structural sections in depth were generated, along with fault slip profiles, geometric data and the kinematic scheme to determine the orientation, geometric characteristics, segmentation and shortening through the fault trajectory. The Honda Fault has three segments in its 103 km of extension, it has a thrust component and dextral transpression with a NW-SE main stress direction heading towards the N20E, it is associated with a hybrid system with thick skin and thin skin deformation within the fault and thrust belt in the Magdalena fault system and the detachment geometry corresponds to an out-of-sequence fault as a basement shortcut. The exploratory potential in the three-dimensional closure structural play against the Honda Fault was evaluated with the Play Fairway Evaluation methodology in the two associated oil systems Villeta-Mugrosa (hanging block) and Villeta-Honda (footwall block) where there is an exploratory conventional potential in the north and central zone respectively.

* Degree Work to Opt for the Master's Degree in Geology.

** Physical-Chemical Faculty. Master of Geology. Director: Francisco Velandia, PhD geologist

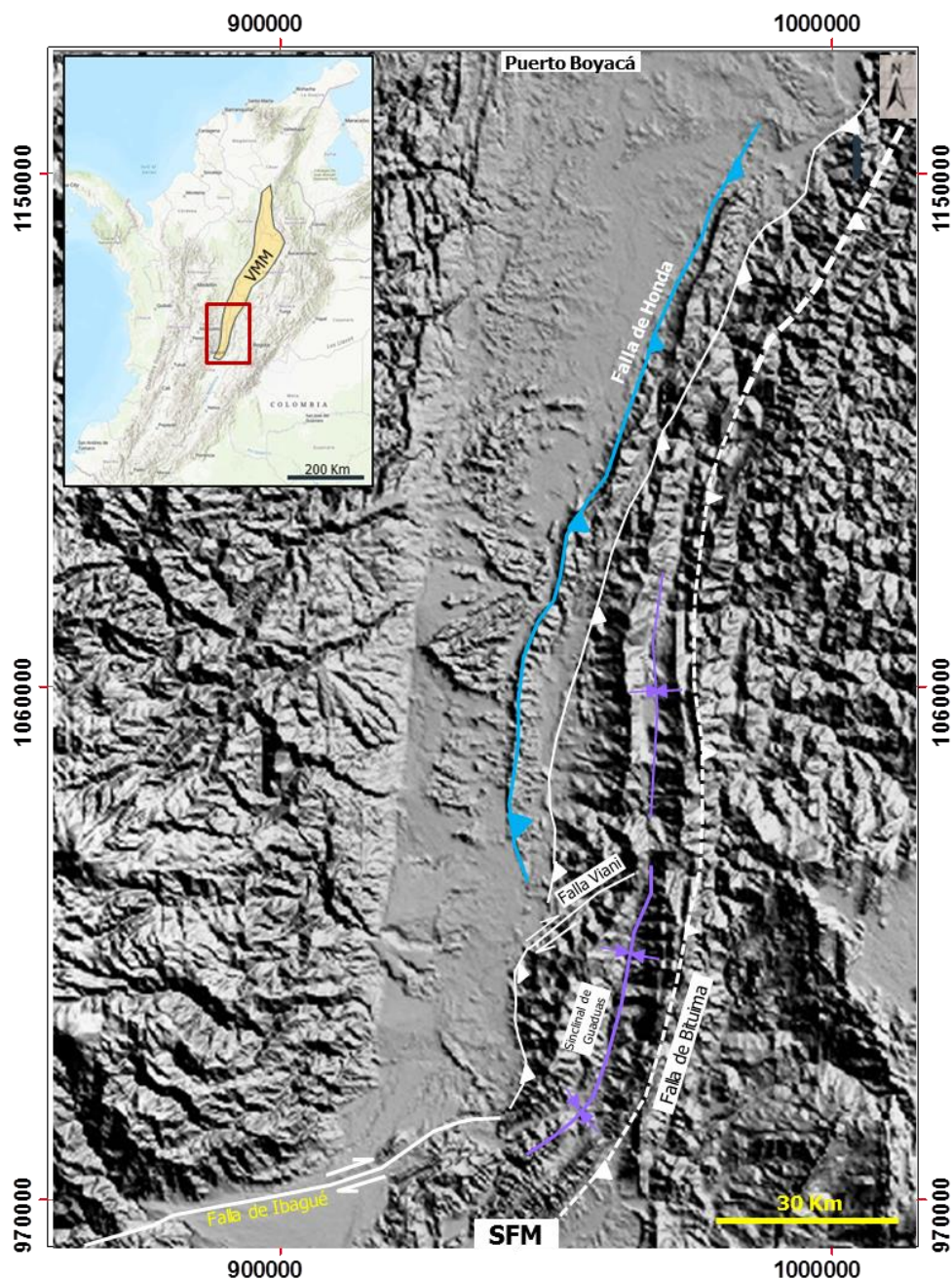
Introducción

El Valle Medio del Magdalena (VMM) es una cuenca madura a nivel exploratorio ubicada entre las cordilleras Central y Oriental, dividida informalmente de norte a sur por sus características geológicas en tres subcuencas: Norte, Central o Barrancabermeja y Honda. En la subcuenca de Honda, se encuentra el área de estudio, donde han sido reportados rezumaderos de aceite de diferentes calidades.

La subcuenca de Honda representa una cuenca intracordillera basculada hacia el este, donde el flanco occidental está representado por la Cordillera Central y el flanco oriental por el límite occidental de la Cordillera Oriental representado por la faja plegada y corrida (FPC) del Sistema de Fallas del Magdalena (SFM) con vergencia al oeste (Figura 1) conformado por las fallas de Honda, Cambao y Bituima (Llanos y Camargo, 1997).

La Falla de Honda, objeto de este estudio está ubicada entre los municipios de Ambalema y La Dorada, tiene un frente de deformación aproximado de 103 km con transporte tectónico hacia el noroeste. Los rasgos geomorfológicos sobre la Falla de Honda permiten diferenciar dos segmentos:

Figura 1 Localización del área de estudio en la subcuenca de Honda, zona sur del Valle Medio del Magdalena (polígono rojo). La imagen del área de estudio es la combinación del Modelo de Elevación del Terreno (DEM 30x30 m) y el mapa geológico escala 1:250.000 (modificado de Caballero et al., 2013). En el mapa se destaca: Sistema de Fallas del Magdalena (SFM) en el costado occidental de la Cordillera Oriental y el frente de deformación de la Falla de Honda (línea azul) objeto de este estudio.



Segmento Norte, paralelo a la trayectoria del río Magdalena con un rumbo N10E, cortando en superficie a la Formación Mesa de edad Plioceno y el Cuaternario.

Segmento Sur, el cual tiene una dirección N-S; en el bloque colgante las unidades se encuentran buzando 10° al este. La secuencia incluye la Formación Colorado de edad Oligoceno, el Grupo Honda de edad Miocena, la Formación Mesa y el Cuaternario. En el bloque yacente las unidades del Plioceno y Cuaternario se encuentran horizontales.

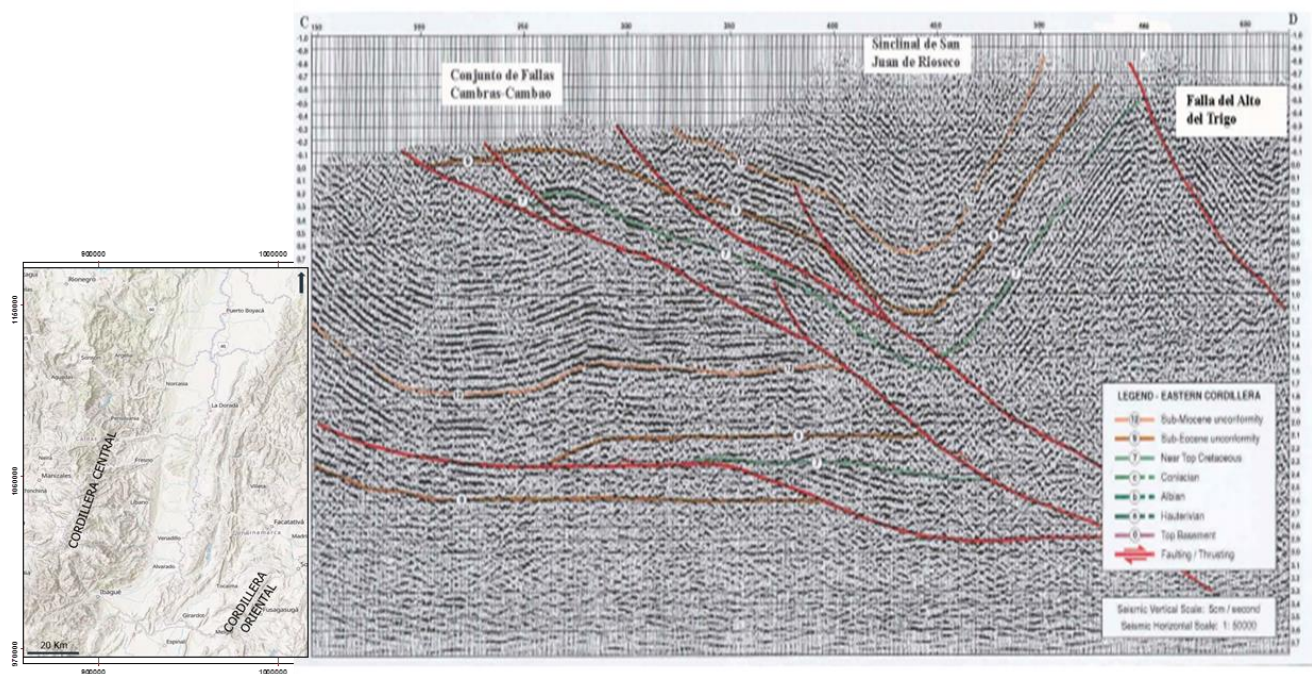
Este tipo de segmentación norte-sur se observa en las otras estructuras del SFM involucrando unidades más antiguas del Cretácico y formando estructuras sinclinales como se evidencia en el mapa geológico. Esta segmentación podría estar asociada a la presencia de un sistema de fallas con dirección N60E, el cual afecta al frente de deformación, cambiando el ángulo de dirección de las fallas y generando al menos un *shortcut* en la Falla de Cambao y Honda.

En la zona de estudio se han realizado diferentes campañas de adquisición sísmica desde la década del sesenta, debido al potencial para la industria del petróleo. La imagen sísmica es de regular a buena calidad y ha permitido en los últimos 50 años identificar los rasgos estructurales previamente descritos. En la Figura 2 se ilustra un ejemplo de una interpretación de este frente de deformación en los años noventa. El amarre sísmico con la información de los pozos, sistemáticamente ha servido para mejorar el modelo geológico y refinar las interpretaciones sísmicas.

Este trabajo busca determinar si la Falla de Honda corresponde al último evento de deformación del SFM, relacionando la topografía de la zona, la interpretación geológica de la falla en la sísmica, la geometría de la secuencia aflorante en el bloque colgante y los datos de neotectónica de estudios previos en la zona. Mediante el análisis e integración de mapas

geológicos, información bibliográfica, información de pozos, líneas sísmicas 2D, imágenes DEM y datos estructurales se generaron secciones estructurales en profundidad, junto a perfiles de salto de falla, datos geométricos y el esquema cinemático para determinar la orientación, características geométricas, segmentación y acortamiento a través de la trayectoria de la falla.

Figura 2. Línea sísmica C-79-8 adquirida por Ecopetrol con la interpretación sísmica clásica del modelo de fallas Cambras-Cambao-Falla del Alto del Trigo en la zona sur del VMM (Llanos y Camargo, 1997).



Utilizando herramientas como la interpretación geológica de líneas sísmicas, la construcción de tres secciones estructurales y la relación de acortamiento, se plantean dos hipótesis sobre la geometría y la cinemática de la Falla de Honda en relación con el SFM:

- Es una falla de piel gruesa con despegue en el basamento
- Pertenece al sistema de deformación híbrido del SFM como una falla fuera de secuencia con despegue en un nivel arcilloso del Cretácico.

De acuerdo con los rasgos geomorfológicos de la Falla de Honda, se aprecia una segmentación y cambio en su dirección, ¿Este cambio en la geometría corresponde a un *shortcut*?, ¿De existir, podría evidenciarse en las líneas sísmicas?

El SFM involucra pliegues y fallas en la secuencia del Cretácico al Oligoceno, sin embargo, la Falla de Honda incluye unidades recientes del Plioceno al Cuaternario; ¿Analizando la cinemática de la Falla de Honda podríamos entender su relación con el SFM, y concluir si es una falla fuera de secuencia del sistema o es una falla independiente?

Considerando la presencia de rezumaderos de aceite en el área de estudio, ¿Cuál sería el potencial exploratorio a nivel de hidrocarburos asociado al frente de deformación de la Falla de Honda?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Describir la geometría y la cinemática del frente de deformación de la Falla de Honda en la parte sur del Valle Medio del Magdalena, para establecer su relación estructural con el Sistema de Fallas del Magdalena.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar la expresión de la segmentación de la Falla de Honda en superficie con base en el modelo de elevación del terreno en el área de estudio.
- Obtener la geometría de la Falla de Honda a partir de los elementos que la componen y de su estilo estructural en relación con el SFM.
- Obtener el modelo estructural en el subsuelo, a través de la interpretación en líneas sísmicas 2D y la conversión tiempo-profundidad a partir del ajuste de pozos por medio de datos de velocidad.
- Validar el modelo estructural propuesto a partir de la construcción y retrodeformación de tres (3) secciones estructurales a lo largo del frente de deformación de la Falla de Honda.
- Evaluar el potencial exploratorio a través del análisis del *play fairway map* del frente de deformación de la Falla de Honda.

2. Marco Geológico

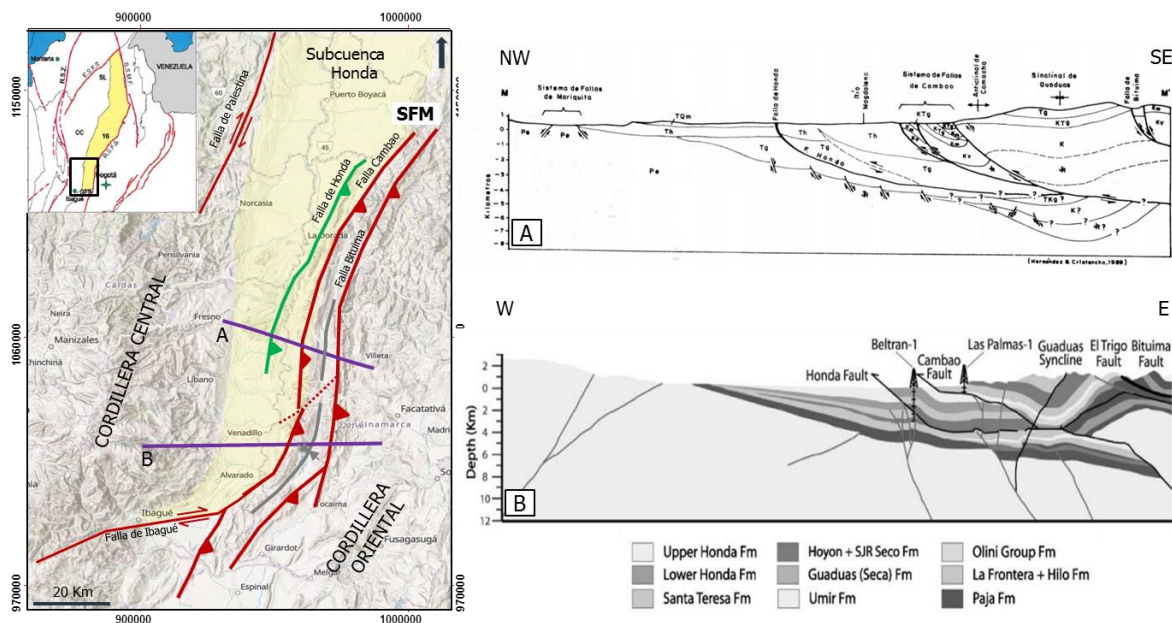
EI VMM cubre un área de 34.000 Km²; se localiza entre las Cordilleras Central y Oriental de Colombia, está limitada al norte por la Falla de Bucaramanga, en cercanías a la población de El Banco (Magdalena), y al sur por la división natural de la Falla de Ibagué y la barrera Guatiquia-Girardot (Porta, 1966; Gomez, 2001; Bayona *et al.*, 2013). Las alturas en la cuenca fluctúan entre 50 y 150 m.s.n.m. aproximadamente.

La amplitud de la cuenca del VMM varía de norte a sur pasando de aproximadamente 100 Km en la zona de Barrancabermeja a 50 Km en inmediaciones de la población de Honda. Informalmente por su historial exploratorio y rasgos geológicos se ha dividido en tres subcuencas: Norte, Central o Barrancabermeja y Honda. En relación con los objetivos de este trabajo, se tratara exclusivamente la subcuenca de Honda.

Los límites de la subcuenca de Honda son: al este el SFM con vergencia al oeste junto al sinclinal de Guaduas, al sur la Falla de Ibagué y la barrera Guatiquia-Girardot y al oeste las estribaciones de la Cordillera Central (Pérez y Valencia, 1977). En corte geológico la subcuenca de Honda representa una cuenca intracordillera basculada hacia el este con tendencia homoclinal con el desarrollo de pliegues y fallas vinculados a la faja plegada y corrida en el flanco occidental de la Cordillera Oriental (Figura 3).

El espesor de sedimentos sobre el basamento ígneo-metamórfico alcanza 5000 m en las inmediaciones de la falla de Palestina. La secuencia se va adelgazando sistemáticamente hacia la Cordillera Central y hacia el sur donde el pozo Potosí-1 reporta 500 m de espesor de sedimentos cenozoicos. El basculamiento de la cuenca hacia el este y la deformación del sistema de fallas del Magdalena representan los rasgos principales.

Figura 3. Mapa de la subcuenca de Honda en el VMM con los rasgos geológicos principales y la presencia de la Falla de Honda, objeto de este estudio. En corte geológico donde la subcuenca de Honda representa una cuenca intracordillera basculada hacia el este con tendencia homoclinal donde el registro estratigráfico cubre del Paleozoico al Cuaternario. **A.** Esquema estructural de San Sebastián de Mariquita a cercanías de Villeta tomado y modificado de Mojica y Franco (1990). **B.** Corte geológico de la zona sur del VMM tomado y modificado de Cortes (2004).



2.1 Estratigrafía del Área

En la subcuenca de Honda para este trabajo se ha escogido una combinación de la nomenclatura estratigráfica entre la propuesta para el Valle Superior del Magdalena de Sarmiento (2001) y Radic (2004), las unidades reportadas en pozos, la nomenclatura usada en la zona del sur del VMM, la estratigrafía en el Sinclinal de Guaduas de Porta (1965), Cáceres y Etayo-Serna (1969) y Martínez y Vergara (1997), la nomenclatura del borde occidental de la Cordillera Oriental al oeste (SFM) y este de la falla de Bituima (Acosta y Ulloa, 2001) y la nomenclatura clásica en la subcuenca de Barrancabermeja del VMM de Cooper *et al.* (1995).

Teniendo en cuenta los cambios faciales y la ausencia de unidades reportados en pozos y en trabajos previos, el contexto estratigráfico se representa especificado para el bloque yacente y colgante de la Falla de Honda resumido en la columna estratigráfica (Figura 4).

En este trabajo, los conceptos tectonoestratigráficos se basaran en los trabajos de Porta (1966), Julivert *et al.* (1968), Pérez y Valencia (1977), Velandia *et al.* (1977), Acosta y Obando (1984), Taborda (1984), Mojica y Franco (1990), Gomez (2001), Acosta *et al.* (2004), Cortés *et al.* (2006), Lamus *et al.* (2013), Díaz Poveda (2016) y Bayona (2018); los mapas del Servicio Geológico Nacional Escala 1:100.000 (Barrero y Vesga, 1976) y Ariadna (2009), el informe de riesgo geológico de la falla de Ibagué Ingeominas (2005) y el trabajo de las cuencas sedimentarias de Colombia de Barrero *et al.* (2007) y ANH (2012).

El basamento del área tiene unas fábricas estructurales propias, las cuales son reactivadas por los procesos tectónicos posteriores. El basamento en la Cordillera Oriental está asociado al terreno alóctono de Garzón – Quetame, el cual fue acrecionado durante el Paleozoico Inferior a la región autóctona de Amazonia a través de la paleo sutura de Guaicaramo (Etayo Serna *et al.*, 1983). El basamento de la Cordillera Central corresponde a la unidad alóctona de Cajamarca, la cual junto a una serie de pequeños terrenos de la misma afinidad conocido como terreno Tahimi fueron acrecionados durante el comienzo del Paleozoico Superior a través de la paleo sutura de Otu Pericos (Gomez *et al.*, 2015). El registro de diferentes episodios de acumulación de depósitos durante el Paleozoico Superior ha sido documentado en diferentes zonas de la Cordillera Oriental. Sin embargo, las rocas más antiguas descritas en cercanías al área de estudio en esta posición de la Cordillera Oriental pertenecen a la base del Cretácico Temprano.

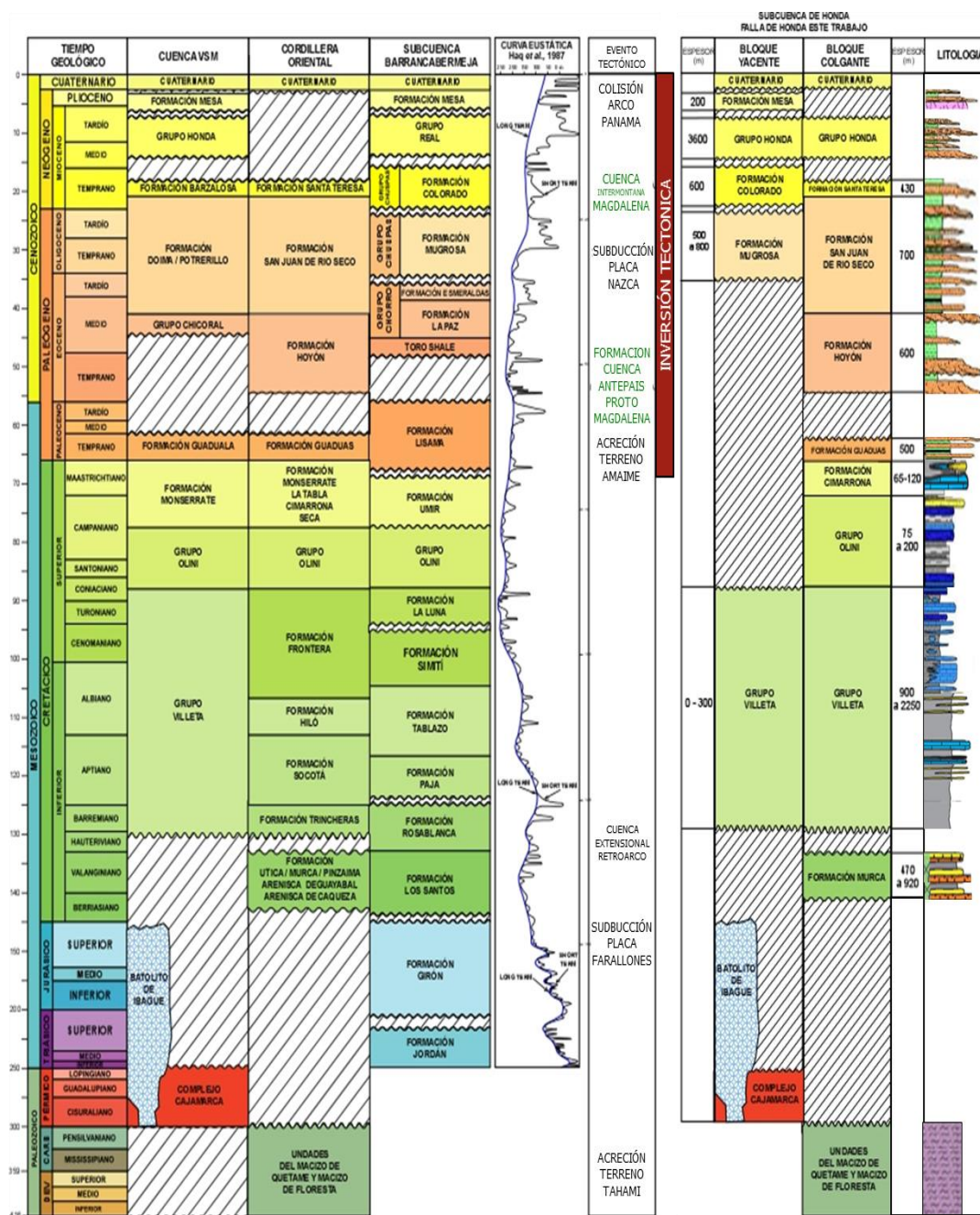
Durante finales del Paleozoico Superior y el Jurásico (280 – 140 Ma) la placa de Farallón subduce bajo el borde NW de la placa Sudamericana dejando intrusiones de granitos Tipo-S en la Cordillera Central, el Valle del Magdalena y la Cordillera Oriental (Restrepo-Pace, 1995).

En el Cretácico Temprano (130 - 99 Ma) una cuenca extensional de retroarco se desarrolla en la actual Cordillera Oriental junto a la acreción del Terreno Amaime en la Cordillera Central induciendo un período de deformación (Cortés *et al.*, 2006). Durante el Cretácico Superior (99-70 Ma) se presenta una subsidencia termal en la zona de la Cordillera Oriental permitiendo el desarrollo del mar Cretácico con una serie de cambios faciales a través de toda la actual cuenca del Valle del Magdalena (Julivert, 1968; Macellari, 1988; Villamil, 1999).

Entre el Maastrichtiano y el Paleoceno Temprano (70 – 62 Ma) debido a la acreción de terrenos a lo largo del sistema de la Falla de Romeral y la subducción de la placa Caribe, un nuevo pulso tectónico genera el levantamiento-basculamiento de la Cordillera Central con el desarrollo de una cuenca de antepais al este denominada cuenca proto-Magdalena y la reactivación de estructuras de rumbo preexistentes del basamento.

El inicio de la acumulación sinorogénica en la cuenca denominada proto-Magdalena registra fragmentos metamórficos, minerales pesados y ultraestables asociados a la exposición del basamento (Lamus *et al.*, 2013; Bayona *et al.*, 2013). En el Paleoceno Medio a Eoceno Temprano (62 – 53 Ma), la deformación de bloques intracuenca con dirección N70E se asocia a la disminución de actividad magmática en la Cordillera Central por cambios en la geometría de convergencia (Bayona *et al.*, 2011).

Figura 4. Columna Estratigráfica para el bloque colgante y yacente en la Falla de Honda utilizada en este trabajo, tras la recopilación e integración de la nomenclatura e historia tectonoestratigráfica usada para la subcuena de Honda e información de pozos. La nomenclatura de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM), la subcuena Central o Barrancabermeja del VMM y la subcuena de Honda fue modificada de Barrero et al. (2007); Moretti et al. (2010); Sarmiento et al. (2015); Lamus et al. (2013).



Durante el Paleoceno Medio a Eoceno Temprano también se presentó un gran aporte a la cuenca sinorogénica del proto-Magdalena viene de un aporte local de estos bloques levantados de la falla de Ibagué y Viani (Díaz Poveda, 2016).

Durante el Eoceno Medio al Oligoceno Medio (53 - 35 Ma) continúa el basculamiento de la Cordillera Central y la inversión tectónica por reactivación de fallas en ambos flancos de la Cordillera Oriental (Cortés *et al.*, 2006). La asociación de los minerales pesados inestables, el dominio de la fracción de líticos metamórficos y la población de circones de 140-160 Ma sugiere un aporte de detritos procedentes del Batolito de Ibagué, rocas metamórficas adyacentes y cobertera de edad Paleocena (Lamus *et al.*, 2013). La ruptura interna de la cuenca proto-Magdalena continua por fallas intracuenca, al oeste el límite es dado por la presencia de fallas de rumbo en la Cordillera Central.

En el Mioceno Temprano (35 – 28 Ma) se presenta el confinamiento de la cuenca y su desconexión con la cuenca axial de la Cordillera Oriental definiendo el inicio de la cuenca del Magdalena con un sentido fluvial N-S, el cual es inundado por sistemas de lagunas (Lamus *et al.*, 2013).

A partir de este momento, la cuenca de los Llanos y Valle del Magdalena comienzan a evolucionar como dos cuencas independientes (Sarmiento, 2001; Radic, 2004). Al final se presenta la fractura de la placa Farallón en las placas de Nazca y Cocos (Somoza y Ghidella, 2005).

Entre el Mioceno Medio al Plioceno (16 – 5 Ma) debido a los cambios en las geometrías de convergencia de las placas y la colisión del arco de Panamá se presentan diferentes pulsos de levantamiento con vulcanismo activo en la Cordillera Central, evidenciado en la presencia de material volcánico y volcanoclástico re TRABAJADO proveniente en su mayoría de la Cordillera

Central. Un menor aporte de material proviene de la ancestral Cordillera Oriental siendo particularmente importante en el Mioceno Superior (Caballero *et al.*, 2015).

La falla La Salina-Bituima es una falla normal invertida, la cual a través del tiempo cambio de inversa a oblicua como resultado de la indentación del bloque Panamá. Las fallas de Cambras, Dos Hermanos y Honda son cabalgamientos y fallas oblicuas con una dirección de transporte del SE al NW, ramificadas de la falla de Bituima como resultado de la traspresión durante el cambio de desplazamiento cinemático a lo largo del sistema La Salina-Bituima (Acosta *et al.*, 2004).

2.1.1 Paleozoico

- **Unidades del Macizo Quetame y Floresta (Bloque colgante Falla de Honda)**

En el área de estudio no hay afloramientos cercanos o registro en pozos sobre el basamento presente en la Cordillera Oriental. Sin embargo, debido al objetivo de este trabajo es necesario anotar una referencia sobre el basamento para el bloque colgante en la Falla de Honda, el término unidades del Macizo de Quetame y Floresta se utilizó para hacer referencia al basamento formado por unidades paleozoicas registradas a lo largo de la faja occidental de la Cordillera Oriental ampliamente descritas por Moreno Sanchez *et al.* (2008).

- **Complejo Cajamarca (Bloque yacente Falla de Honda)**

Se utiliza con algunas restricciones en cuanto a su litología y extensión geográfica para las rocas metamórficas que afloran en la Cordillera Central de Colombia y representa el basamento económico en el bloque yacente de la Falla de Honda en la zona de estudio. Los esquistos verdes constituyen la roca más abundante del Complejo Cajamarca se pueden subdividir en esquistos cuarzosos y aluminicos.

2.1.2 Jurásico

- **Batolito de Ibagué (Bloque yacente Falla de Honda)**

Es uno de los mayores cuerpos intrusivos aflorantes en el flanco oriental de la Cordillera Central, intruye rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas. Sus afloramientos se extienden desde el norte del Departamento del Tolima hasta un poco al sur de la localidad de La Plata (Huila) de acuerdo a Núñez (1986). Se ha registrado como el basamento económico en algunos pozos de la zona.

Autor: Batolito de Ibagué fue el nombre dado por Nelson (1957) a uno de los mayores cuerpos ígneos intrusivos que se presentan en el flanco oriental de la Cordillera Central.

Edad: Dataciones radiométricas del Batolito de Ibagué (K/Ar en hornablenda y biotita) en muestras recolectadas al sur de la localidad de Armero (Tolima), dieron edades que varían entre 140 y 150 Ma (Barrero y Vesga, 1976).

Descripción: La composición predominante del intrusivo es cuarzodiorítica con tamaño de grano medio a grueso; el color es generalmente gris con diversos tonos, dependiendo del contenido de minerales ferromagnesianos (hornblenda y biotita). El Batolito de Ibagué, es la expresión magmática de un arco plutónico-volcánico asociado a la subducción jurásica de la ancestral Cordillera Central (Núñez, 1986).

2.1.3 Cretácico

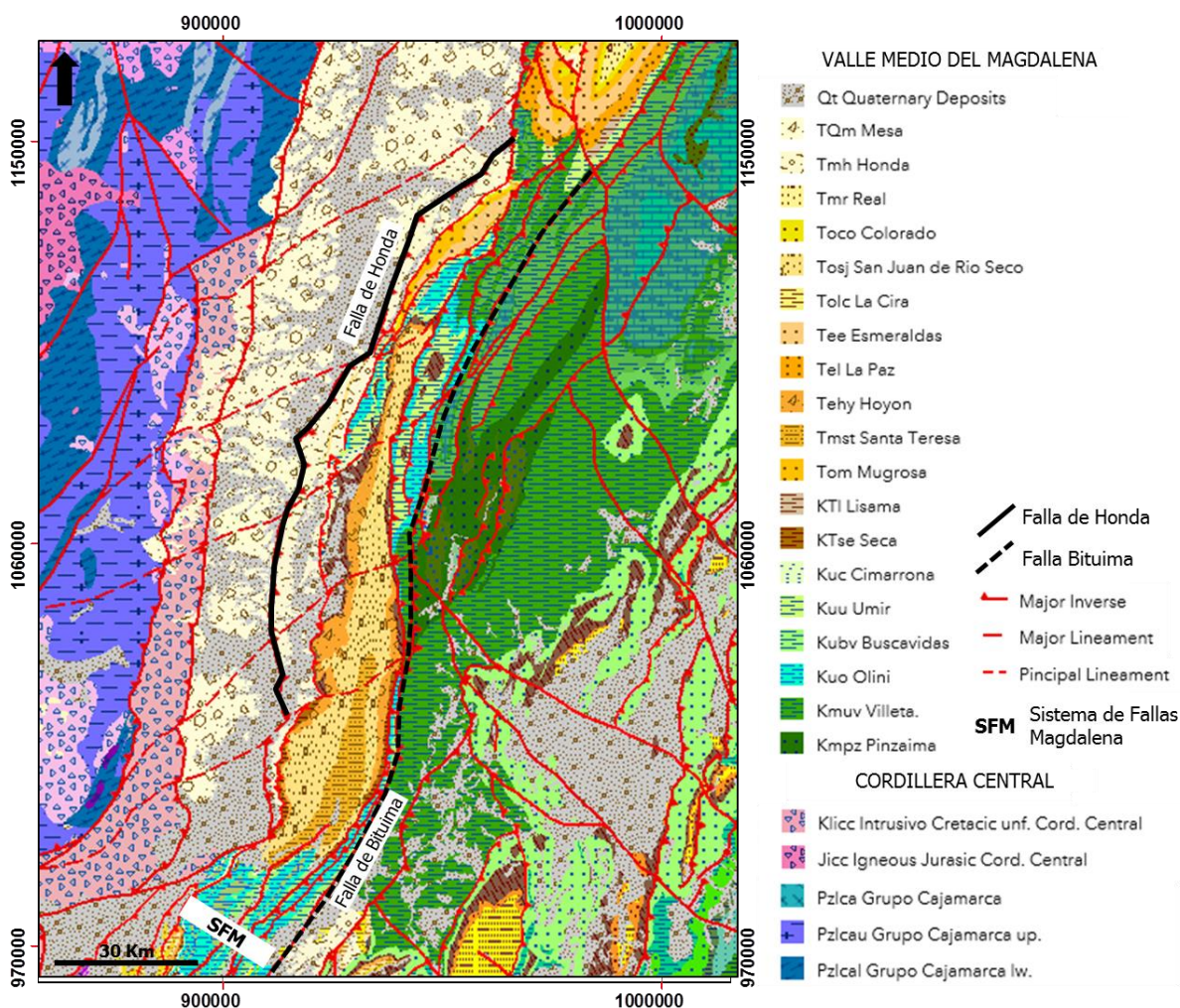
- **Formación Murca (Bloque colgante Falla de Honda)**

Esta unidad se encuentra aflorando al este de la falla de Bituima, representa la unidad más antigua aflorante en este sector de la Cordillera Oriental. En la literatura geológica esta unidad litoestratigráfica ha sido denominada Arenisca de Caqueza (Champetier *et al.*, 1961),

Arenisca de Guayabal (Ulloa, 1982) y Arenisca de Pinzaima (Sarmiento, 1989). La unidad se correlaciona cronológicamente con las unidades Cumbre, Rosablanca y Utica.

Autor: El nombre y rango de Formación Murca fue dado por Moreno (1989) para describir una sucesión de arenitas subarcóicas y lodolitas negras que afloran a lo largo de la carretera Pacho – La Palma. Al este de la falla de Bituima se encuentra en el núcleo del Anticlinal de Murca-Guayabal-Nimaima. En la figura 5 se encuentra el mapa geológico Ariadna (2009) donde se resalta la falla de Bituima, al este se presentan las unidades más antiguas aflorantes en el área de interés.

Figura 5. Mapa geológico modificado de Ariadna (2009) en las inmediaciones de la Falla de Honda, donde se observan las unidades antiguas aflorantes en la Cordillera Central como la Grupo Cajamarca y en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, la unidad cretácica más antigua aflorando al este de la falla de Bituima (línea punteada negra) conocida Kmpz Pinzaima = Formación Murca descrita en este trabajo.



Edad: Moreno (1991) reporta la presencia de amonitas y restos de plantas en las intercalaciones arcillosas asignándole a la Formación Murca una edad entre Berriasiano y Valanginiano superior.

Descripción: La unidad litológica tiene un espesor reportado de 920 m en la localidad tipo en el flanco occidental del Anticlinal de Murca y 470 m en la carretera Villeta – La Vega.

Está conformado por tres segmentos de areniscas subarcosicas de areniscas de grano fino a grueso con estructuras sedimentarias estratificación interna plano paralela, inclinada y lenticular; las capas presentan granodecrecimiento e intercalaciones de niveles delgados de limolitas y arcillolitas negras. Estos segmentos arenosos están separados por arcillolitas negras meteorizadas, en capas delgadas, plano paralelas con algunos niveles fosilíferos (Garay y Ulloa, 2001).

Ambiente: La presencia de secuencias granodecrecientes, capas amalgamadas, superficies erosivas, arenitas mal seleccionadas, canales y la intercalación rítmica de arenitas y lodolitas apoyan un origen turbidítico con ambientes de depósito de abanicos con lóbulos con el área de aporte en la paleocordillera Central (Garay y Ulloa, 2001).

- **Grupo Villeta (Bloque colgante y yacente Falla de Honda)**

La unidad se encuentra aflorando en el bloque colgante del SFM aflorando al este de la falla de Bituima, constituye el núcleo del sinclinal de Guaduas y ha sido reportado en algunos pozos en el bloque yacente de la zona de estudio. Las rocas del Cretácico corresponden a la roca fuente del sistema petrolífero, la Formación La Luna de edad Cenomaniano a Santoniano es ampliamente conocida y utilizada en la cuenca central o Barrancabermeja del VMM, en este trabajo sobre la subcuenca de Honda localizada entre VSM y VMM, se utiliza el nombre Formación Villeta.

Autor: Este nombre fue introducido por Hettner en 1892, la denominó *Villetaschiten* y se refirió así a los estratos lodolíticos infrayacentes a las arenitas del Guadalupe en la Cordillera Oriental. Hubach (1951) lo denomina Piso Villeta, posteriormente el mismo autor denomina a esta sucesión como Grupo Villeta (Hubach, 1957). Esta definición se mantiene a través del tiempo.

Edad: Su edad con base en fósiles de amonitas reportada por Etayo *et al.* (1969) y microfósiles de Martínez y Vergara (1997), abarca desde el Hauteriviano hasta el Coniaciano (Cretáceo Superior) en la vía entre Villeta – Honda (Ulloa y Acosta, 1988).

Descripción: Esta unidad litológica está formada por intercalaciones de *shales* negros (algunos calcáreos), calizas micríticas y esparíticas con *chert* negro. Las estimaciones de espesor del Grupo Villeta para el oeste de la Sabana de Bogotá varían entre 900 m (Cáceres y Etayo, 1969) a 2250 m (Hubach, 1957).

Ambiente de Depósito: La sucesión litoestratigráfica da registro de una invasión marina del Cretácico, la cual se dio sobre una cuenca extensional tectónicamente activa en una fase de *rift* durante los periodos Triásico y Jurásico (Etayo *et al.*, 1969; Fabre, 1987; Sarmiento 2001). En el lapso Albiano temprano al Coniaciano se registran condiciones marinas de costa afuera donde se acumularon sedimentos finogranulares carbonatados y siliciclásticos.

- **Grupo Olini (Bloque colgante Falla de Honda)**

Hubach (1957) utiliza el término Olini para citar fauna descrita por Petters (1954) y extiende el término no solo al VSM, sino también a la región de Girardot - Guataquí. Porta (1965) redefine el Grupo Olini conformado por las unidades Lidita Superior, Nivel de Lutitas y Lidita Inferior, y sugiere como sección de referencia la sucesión aflorante en el camino que conduce de Piedras a La Tabla (Tolima), y algunos cortes de la carretera Girardot - Guataquí. Según Porta (1965), el Grupo Olini está limitado en la base por el Grupo Villeta en el VSM, contacto que está determinado por la aparición de las primeras capas de *chert* en la Lidita Inferior.

Autor: El nombre del grupo Olini fue introducido por Petters (1954) utilizó por primera vez el término en la región de Ortega y Guamo, para ubicar algunas especies nuevas de foraminíferos en dos de sus miembros, sin hacer ninguna descripción litológica y sin señalar una sección tipo.

Edad: Amonitas colectadas en diferentes niveles de las liditas indican una edad Coniaciano-Campaniano (Bermúdez, 2004).

Descripción: El Grupo fue dividido por Porta (1965) en las unidades: Lidita inferior (30 m), Nivel de Lutitas (15 m) y lidita superior (30 m). En la localidad del Alto del Trigo se pueden observar los tres niveles. La inferior compuesta por limolitas silíceas calcáreas y *chert* en estratos de 3 a 5 cm de espesor; la media esencialmente lutítica y la unidad superior compuesta de limolitas silíceas, *cherts* y pequeñas intercalaciones de lutitas. El grupo en esta localidad tiene un espesor aproximado de 200 m.

Ambiente de depósito: La evolución de la cuenca durante el Coniaciano superior – Santoniano inferior, permite observar una fuerte transgresión marina que acumuló calizas, fosforitas y facies biosilíceas de la Formación Lidita Inferior, la cual representa la retrogradación de ambientes sedimentarios de plataforma media a externa. El nivel de lutitas registra una regresión generalizada del mar en el Santoniano - Campaniano inferior, que ocasionó la progradación de ambientes de plataforma interna y permitió, en secciones proximales, el desarrollo de areniscas e incluso conglomerados de ambientes de frente de playa. En el Campaniano superior un nuevo evento transgresivo permitió la acumulación de fosforitas, calizas y *cherts* de ambientes de depósito de plataforma interna a media representados por la Formación Lidita Superior (Bermúdez, 2004).

- **Formación Cimarrona (Bloque colgante Falla de Honda)**

En la zona norte del sinclinal de Guaduas, Porta (1965) redefine el Cretácico Superior, incluyendo el Cimarrona en la vía Honda-Guaduas como una secuencia aflorante asociada a diferentes fallas de cabalgamiento.

Autor: La Formación Cimarrona fue descrita inicialmente por Washburne y White, 1922 en Julivert (1968) como una secuencia de cuatrocientos pies compuesta por areniscas de grano grueso y conglomerados calcáreos.

Edad: La edad de la Formación Cimarrona de acuerdo a la fauna de foraminíferos corresponde al Maastrichtiano (Porta, 1966).

Descripción: La Formación Cimarrona está constituida principalmente por conglomerados que forman alrededor de 48% a 64% de la unidad. También presenta en menores proporciones areniscas (21%-42%) y paquetes lodo-arenosos (10%-15%). El espesor de la unidad oscila entre 65 y 120 m. Generalmente, los límites con las Formaciones Seca y Guaduas (en el tope) y Formación Villeta (en la base) se consideran concordantes (Gómez y Pedraza, 1994).

Ambiente de Depósito: Representa interdigitaciones de ambientes deltaicos y de llanuras costeras con otras unidades del Cretácico Superior, las cuales representan ambientes transicionales de baja energía de zonas pantanosas (Porta, 1965). En la cuenca del proto-Magdalena, el aumento hacia el este de los espesores de las unidades maastrichtianas se debe al basculamiento al este de la Cordillera Central (Lamus *et al.*, 2013).

- **Formación Guaduas (Bloque colgante Falla de Honda)**

El nombre de Guaduas se debe a Hettner (1892), quien se refirió así a los estratos lodolíticos y carbonosos que suprayacen a las arenitas del Guadalupe. Según Hubach (1957), en la parte baja del sinclinal de Guaduas, se encuentra una sucesión de arcillas oscuras con carbón que pasan a gredas abigarradas y rojas. Esta parte es la misma que Hubach consideró como Formación Guaduas en el área de Bogotá, teniendo en cuenta que su uso se hallaba muy arraigado entre los mineros del carbón (Guerrero y Sarmiento, 1996).

Autor: Hettner (1892) introdujo el término Guaduas como “*Stufe der Guaduasschichten*” que procede de la población de Guaduas al este de Bogotá. El nombre se extendió por una amplia geografía, principalmente por la Sabana de Bogotá. Una detallada historia de las acepciones que se han dado al término se encuentra en el Léxico Estratigráfico de Colombia (Solé de Porta en Porta, 1974).

Edad: Los datos palinológicos indican una edad Maastrichtiano-Paleoceno (Van Houten y Travis, 1968).

Descripción: En general la Formación Guaduas presenta predominio de facies finas de arcillolitas y lodolitas color gris café a gris oscuro, maciza y lodolitas con laminación horizontal, como facies subordinadas se presentan intercalaciones de arenita con laminación ondulosa y es común la ocurrencia de capas de carbón hacia la parte media inferior de la unidad. El contacto en la base es concordante y su espesor varía entre 500 y 1000 m.

Ambiente de Depósito: El predominio de facies finas de lodolitas y arcillolitas con laminación horizontal reflejan transporte y depósitos en suspensión en ambientes de baja energía como una unidad continental de paleosuelos. La presencia de fantasmas de raíces y de carbón indica ambientes continentales, principalmente de pantanos. Las facies subordinadas de arenitas con laminación cruzada y ondulada en fase y desfase –*ripples*– indican cercanía a la costa y/o canales fluviales (Amaya *et al.*, 2010).

2.1.4 Paleógeno

- **Formación Hoyón (Bloque colgante Falla de Honda)**

Entre el Paleoceno Medio al Eoceno Temprano se presenta una alta deformación y una disminución del vulcanismo de la Cordillera Central, debido a cambios en la geometría de la

convergencia de las placas (Bayona *et al.* (2011); Lamus *et al.* (2013)) esto origina una gran discordancia entre la Formación Guaduas y Formación Hoyón.

Autor: Esta unidad fue establecida originalmente como una unidad principalmente conglomerática (Porta, 1966). La ocurrencia de la Formación Hoyón está restringida mayormente a la zona sur del VMM. La Formación Hoyón se adelgaza hacia el flanco este del Sinclinal de Guaduas y se acuña hacia el sur. La Formación Hoyón sólo se ha encontrado en el sinclinal de Guaduas, entre Pulí y La Paz (Díaz Poveda, 2016).

Edad: De acuerdo a su posición estratigráfica se le otorga clásicamente una edad Eoceno Superior (Porta, 1966). Sin embargo la descripción como una unidad posdiscordancia en trabajos más recientes con análisis de proveniencia (Bayona *et al.*, 2011; Caballero *et al.*, 2013; Lamus *et al.*, 2013) le dan una edad Eocena Temprana a Media.

Descripción: La Formación Hoyón es una serie de conglomerados y areniscas con intercalaciones de arcillas y lutitas rojas violáceas. Los conglomerados y areniscas son en general de color verdoso, y las arcillas y lutitas de color rojo-violáceo; escasamente se encuentran lutitas gris-oscuras. Los conglomerados contienen principalmente guijarros de cuarzo y de lidita. Se encuentran también troncos de árboles silicificados. El espesor en la localidad tipo es de unos 600 metros.

Ambiente de depósito: La parte basal de la Formación Hoyón representada por arenitas y lodolitas se reporta interdigitación con paquetes de conglomerados de la Formación Guaduas asociado al registro distal de abanicos procedentes de la Cordillera Central (Gómez *et al.*, 2003; Lamus *et al.*, 2013).

- **Formación San Juan de Río Seco (Bloque colgante Falla de Honda)**

Esta unidad aflora en la parte Sur del Sinclinal de San Juan de Río Seco-Guaduas, correspondiente a la parte más norte del VSM.

Autor: Porta (1965) definió la unidad en el Sinclinal de Guaduas, comprende todos los sedimentos que se encuentran entre la Formación Hoyón en la base y la unidad suprayacente denominada Formación Santa Teresa (= Formación La Cira) en el sentido de Raasveldt y Carvajal (1957).

Edad: Oligoceno en Porta (1966). Sin embargo la descripción como una unidad posdiscordancia en trabajos más recientes con análisis de proveniencia (Bayona *et al.*, 2011; Caballero *et al.*, 2013; Lamus *et al.*, 2013) le otorgan una edad Eocena Media a Miocena Temprana.

Descripción: La Formación San Juan de Río Seco está dividida en tres miembros que de abajo hacia arriba son: Miembro Armadillos con un espesor de 235 m, consta de una sucesión de areniscas y lutitas rojas con una importante intercalación de gravas y conglomerados. Miembro Almacigos con un predominio de lutitas y con una intercalación en la parte media de areniscas tiene un espesor de 249-300 m. Finalmente el Miembro La Cruz con una sucesión de areniscas y lutitas y en la parte superior arenas y gravas; su espesor es de 202 m. Las areniscas de la Formación San Juan de Río Seco corresponden a subgrauvacas y los conglomerados y gravas están formados en orden decreciente por cantos de cuarzo, chert de tipo porcelanita y lidita. Para la Formación San Juan de Río Seco se ha reportado un espesor aproximado de 700 m (Díaz Poveda, 2016).

Ambiente de depósito: En líneas sísmicas la unidad presenta indicios de geometría de estratos de crecimiento y algunas veces cortando unidades más antiguas hacia el sur y norte del

sinclinal (Gómez *et al.*, 2003; Cortés, 2004) indicando su acumulación coetánea al tiempo de depósito, esta unidad representa llanuras de inundación con desarrollo de ríos meandriformes.

- **Formación Mugrosa (Bloque yacente Falla de Honda)**

Es considerada una de las unidades reservorio en la cuenca del VMM tiene una amplia distribución geográfica, se adelgaza regionalmente hacia el oeste y el sur como consecuencia de un onlap sedimentario sobre la Cordillera Central (Ballesteros y Parra, 2012).

Autor: El nombre fue introducido por Gill en Morales *et al.* (1958) y corresponde a la parte inferior del Grupo Chuspas; su sección tipo se encuentra en la Quebrada Mugrosa.

Edad: La unidad por su posición estratigráfica es considerada del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Díaz Poveda, 2016).

Descripción: La unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de *shales* moteados con algunas intercalaciones de arenisca. Hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas. El espesor varía entre 500 y 800 m. El contacto inferior de la Formación Mugrosa es discordante con las unidades inferiores en el VMM, al igual que el contacto superior con la Formación Colorado (Ballesteros y Parra, 2012).

Ambiente de depósito: Continental fluvial de canales fluviales de tipo meandriforme y planicies de inundación secas a húmedas en alternancia de condiciones climática húmedas a áridas.

2.1.5 Neógeno

- **Formación Santa Teresa (Bloque colgante Falla de Honda)**

La unidad registra la terminación de la sedimentación en el Sinclinal de Guaduas, clásicamente se le ha vinculado con las unidades La Cira y Guamito en el VMM.

Autor: Definida por Porta (1965) en el área del Sinclinal de Guaduas.

Edad: La unidad por su posición estratigráfica es considerada del Mioceno Temprano (Bayona *et al.*, 2011; Caballero *et al.*, 2013; Lamus *et al.*, 2013).

Descripción: Es una sucesión de 430 m de espesor con intercalaciones de lutitas y areniscas. Las lutitas superiores contienen materia orgánica sapropélica como alginita y liptodetrinita de origen lacustre (Hunt, 1996).

Ambiente de depósito: Las unidades lodosas del tope de la sucesión en el Sinclinal de Guaduas representan depósitos lacustres (Ochoa *et al.*, 2012; Porta, 1966).

- **Formación Colorado (Bloque yacente Falla de Honda)**

La unidad se encuentra ampliamente distribuida en el VMM, se adelgaza regionalmente hacia el oeste y al sur como consecuencia de un *onlap* sedimentario sobre la Cordillera Central.

Autor: La Formación Colorado toma su nombre del Río Colorado en cercanías al Campo Cira – Infantas para definir una espesa secuencia de 1.250 m que incluye el Horizonte fosilífero de “La Cira” con 100 m de espesor. Este espesor aumenta en dirección a la Cordillera Oriental llegando a 2.500 m (Morales *et al.*, 1958).

Edad: Oligoceno Superior (Castro y Gordillo 2005).

Descripción: Está conformada litológicamente por areniscas de grano grueso a conglomeráticas y arcillolitas rojas, hacia el tope de la formación se encuentra un horizonte de

lutitas bien estratificadas, carbonaceas de color negro a parda, ese horizonte ha sido conocido bajo el nombre de La Cira. La Formación Colorado se encuentra en contacto concordante hacia la base con la Formación Mugrosa y hacia el tope en contacto discordante con el Grupo Honda. De acuerdo a los registros de pozo, el espesor en este trabajo para esta unidad será de 600 m.

Ambiente de depósito: Continental fluvial de canales trenzados a meandriformes, complejo de desborde y niveles de paleosuelos calcáreos, el horizonte fósil La Cira está compuesto predominantemente por moluscos de agua dulce y pocos elementos de agua salada (Nuttal, 1990).

- **Grupo Honda (Bloque yacente y colgante Falla de Honda)**

El Grupo Honda se encuentra ampliamente distribuido en la cuenca del VSM, donde representa un nivel reservorio y ha sido reportada en pozos en la subcuenca de Honda en el VMM.

Autor: Según Porta (1966), el nombre de Honda lo introdujo por primera vez Hettner (1892), quien la nombro como serie de Honda, nombre derivado de la localidad de Honda, para referirse a una arenisca típica gris verdosa que procede de la desintegración de las rocas ígneas de la Cordillera Central y en menor proporción de la Cordillera Oriental.

Edad: Su edad asignada es Mioceno Medio a Superior según faunas encontradas en el Carmen de Apicala (Stirton, 1951 y Núñez, 2001 en Caballero *et al.*, 2015).

Descripción: El Grupo Honda se superpone discordante sobre la Formación Colorado. Está constituido por areniscas con lentes conglomeráticos y arcillas. Las areniscas son de grano medio a grueso, color gris, verdoso y blanco, en capas gruesas a muy gruesas; compuestas de cuarzo, líticos, feldespatos, biotita y anfíbol; la matriz es arcillosa y la cementación es regular; presenta estratificación cruzada de ángulo bajo, con gradación normal cíclica y están separadas

por niveles de arcillolitas rojas. Se observa lentes conglomeráticos en las areniscas de tono rojizo, compuestos por *chert* negro en gran porcentaje y cuarzo. Como característica general las areniscas presentan la denominada textura sal y pimienta y concreciones del mismo material con cemento calcáreo. Las arcillolitas son plásticas de color rojo, verde y rojo moteado de blanco, estratificadas en capas muy gruesas a potentes; localmente varían a limolitas, con trazas de pirita y moscovita. En algunos sitios se presentan lentes de conglomerados finos entre las limolitas. El espesor promedio para el Grupo Honda es de 3600 m (Gómez *et al.*, 2003).

Ambiente de depósito: Según Porta (1966) por la naturaleza litológica y la ausencia de fósiles marinos el Grupo Honda se depositó en un ambiente continental de tipo lagunar. La existencia de algunas estructuras como la estratificación oblicua, que se da siempre en bancos de arenas de grano fino y medio, es propia de canales con poca pendiente, pero esta sedimentación tranquila cambia a medida que continúa la acumulación del Grupo Honda, donde ocurrió una sedimentación rápida que seguramente está relacionada con la elevación paulatina de la Cordillera Central y Oriental.

- **Formación Mesa (Bloque yacente Falla de Honda)**

Morales *et al.* (1958) agrupan en este conjunto a todos los sedimentos del Mioceno Superior con una geoforma particular en la sur del VMM.

Autor: El nombre de Formación Mesa lo introdujo Weiske, 1982 en Porta (1966). La unidad fue subdividida en tres miembros en el área del camino al cerro Lumbí.

Edad: El estudio palinológico de muestras de arcillas colectadas en el Miembro Las Palmas en Falán permitió establecer asociaciones palinológicas que indican una edad Plioceno inferior para la parte basal de la Formación Mesa (Dueñas y Castro, 1981).

Descripción: Son acumulaciones volcanosedimentarias de areniscas tobáceas, tobas andesíticas, aglomerados e intercalaciones de arcillas, limos, conglomerados y depósitos piroclásticos. Los clastos volcánicos son andesitas, dacitas y los materiales finos pumitas y cenizas. La parte superior de la unidad está compuesta por gravas, bloques, arenas y limos intercalados. Alcanza un espesor de 575 m acumulados discordantemente sobre el Grupo Honda.

Ambiente de depósito: Representan facies de abanicos torrenciales.

2.1.6 Cuaternario

Reportado en la zona como depósitos coluviales y aluviales; los depósitos coluviales fueron formados por fenómenos gravitatorios o de remoción en masa, constituidos de acuerdo con la litología dominante en cada sector. Estos materiales recubren de manera discordante las rocas del Grupo Honda y se distinguen en las fotografías aéreas por presentar un relieve plano a suavemente ondulado. Por la distribución de estos materiales y su posición relativa se les asigna una edad Holocena (Ingeominas, 2005).

Los depósitos aluviales son depósitos no consolidados, que forman terrazas relativamente planas en los valles de ríos y quebradas. Están compuestos, generalmente por capas delgadas de conglomerado polimíctico, lodo arenoso y depósitos de la llanura de inundación que se caracterizan por presentar imbricación, grano selección y pueden variar desde clasto soportados a matriz soportados, producidos durante los sobreflujos principalmente del río Magdalena.

2.2 Rasgos Estructurales

A nivel regional, el basculamiento de la cuenca es evidente en las líneas sísmicas debido al reflector vinculado al basamento. Los pozos perforados reportan una secuencia cretácica cada vez más antigua en sentido este – oeste en el subsuelo, donde el Cretácico Superior está restringido a la parte más oriental. En general, sobre el basamento y las secuencias cretácicas reposan discordantemente unidades del Eoceno hasta el Plioceno que se acuñan hacia el oeste (Velandia *et al.*, 1977).

De acuerdo con la cartografía geológica y la información sísmica regional, en la zona se reconocen los siguientes rasgos estructurales en respuesta a los diferentes episodios tectónicos del área.

Estructuras de tipo compresivo con pliegues y fallas inversas, asociados a diferentes pulsos de deformación reportados desde el Paleógeno hasta la actualidad (Barrero *et al.*, 2007). Una alta estructuración con cambios de niveles base, aporte de material volcánico y diferentes pulsos de levantamiento con erosión, han sido descritos y estudiados con datos de termocronología, edades de U-Pb, zircones detríticos, entre otros en el sistema de faja plegada y corrida al norte de la zona de estudio (Caballero *et al.*, 2013) confirmando la complejidad estructural dentro del frente occidental de la Cordillera Oriental.

Estructuras tipo *wrenching*, asociadas a sistemas de falla de rumbo con su desarrollo paralelo reportadas en algunas áreas (Govea y Aguilera, 1985; Benavente y Burrus, 1988; Acosta *et al.*, 2004) este tipo de estructuras son el resultado de la reactivación de antiguas fallas de basamento con dirección preferencial NW-SE. Está reactivación se asocia a la configuración tectónica en el borde noroccidental de Sudamérica, donde en los últimos 25 Ma han estado interactuando las placas de Nazca, el bloque Panamá, la placa Caribe y el bloque Andino.

En la subcuenca de Honda específicamente en el área de estudio, en el borde occidental de la Cordillera Oriental se encuentra el SFM conformado por las fallas de Honda, Cambao y Bituima (Figura 6), las cuales producen anticlinales en rampa, abanicos imbricados frontales y fallas ciegas.

Los intervalos de despegue corresponden al basamento y a los niveles arcillosos presentes en las unidades cretácicas. A continuación, se realiza una breve descripción de los rasgos estructurales con base en la descripción de Acosta y Obando (1984):

Sistema de Falla de Bituima: Es una falla normal invertida de ángulo alto cerca de la superficie y cuyo ángulo disminuye en profundidad. Dicha falla pone en contacto rocas del Cretácico Inferior con rocas del Cenozoico. Está conformado por una serie de fallas y estructuras sinclinales-anticlinales. A través del tiempo cambia a una falla oblicua, sinestral con componente de rumbo como resultado de la indectación del bloque Panamá (Acosta et al. 2004).

Sinclinal de Guaduas: Limitado al este por la Falla de Bituima y al oeste por la falla de Cambao. Es una estructura asimétrica, su flanco este presenta buzamiento hasta de 70°, y el flanco oeste mucho más suave con buzamientos menores a 30°.

Falla de Cambao: Se trata de un sistema de fallas inversas con componente oblicuo que buzanan hacia el este y convergen en profundidad; cerca de la superficie presenta buzamientos altos y en profundidad disminuyen notablemente. Pone en contacto rocas del Cretáceo Superior con rocas del Mioceno.

Falla de Honda: Última falla al oeste del área, objeto de este estudio. Su mayor desplazamiento se considera en cercanías a La Dorada, donde pone en contacto unidades del Oligoceno con los estratos de la Formación Mesa (Plio-Pleistoceno).

Falla de Viani: Tiene un rumbo N60E con movimiento de rumbo dextral cortando rocas del Cretácico, tiene una longitud de 36 km (Llanos y Camargo, 1997).

Falla de Puerto de Boyacá: Representa una falla de desgarre lateral derecha, hace parte del sistema de fallas de Palestina, corta rocas metamórficas e ígneas de la Cordillera Central, tiene una dirección N60E.

3. Marco Teórico

3.1 Geometria de Falla

Los rasgos estructurales de un área determinada son visibles desde escala microscópica hasta megascópica, permitiendo tener una serie de datos de diferentes fuentes. Una falla a nivel regional en un mapa es inferida porque hay una interrupción en la continuidad de las unidades geológicas. En general, una falla es una ruptura a lo largo de la cual se presenta un desplazamiento en respuesta a un esfuerzo (Groshong, 2006).

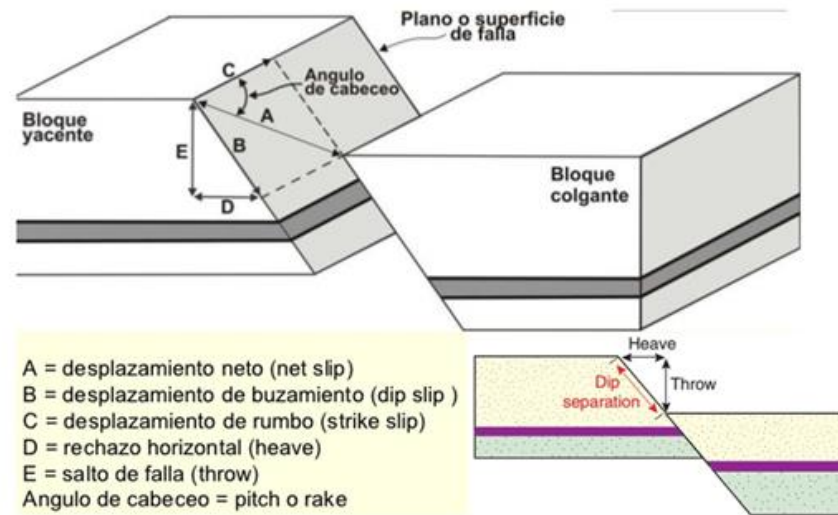
Las fallas tienen un plano con orientación y dirección de deslizamiento, un bloque colgante y un bloque yacente; además presenta unos elementos medibles como el desplazamiento neto, desplazamiento de buzamiento, desplazamiento de rumbo, rechazo horizontal (*heave*), salto de falla (*throw*) y el ángulo de cabeceo (*rake*) (Figura 7).

De acuerdo a los elementos geométricos, las fallas tienen múltiples clasificaciones, en este trabajo se describirá la Falla de Honda por: (1) la geometría del plano de falla por rampa o despegue (Shaw, Connors y Suppe, 2004) (2) el ángulo de inclinación de la falla que puede ser de bajo o alto con referencia en 45° (Angelier, 1994), (3) orientación del desplazamiento como falla normal, inversa o de rumbo (Bates and Jackson, 1987) y (4) fallas con pliegues asociados como flexión, propagación o despegue (Dahlstrom, 1970) un resumen de esta clasificación se encuentra en la Figura 8.

Adicionalmente, la geometría de una falla es compleja una sola falla es a menudo una red de segmentos de múltiples cadenas por lo tanto es necesario conocer el rumbo, buzamiento y sentido del movimiento de las fallas presentes, así como su desplazamiento en superficie a través

de mapas de contornos estructurales, imágenes de radar, DEM, y en imágenes sísmicas (Groshong, 2006; Ragan, 2009).

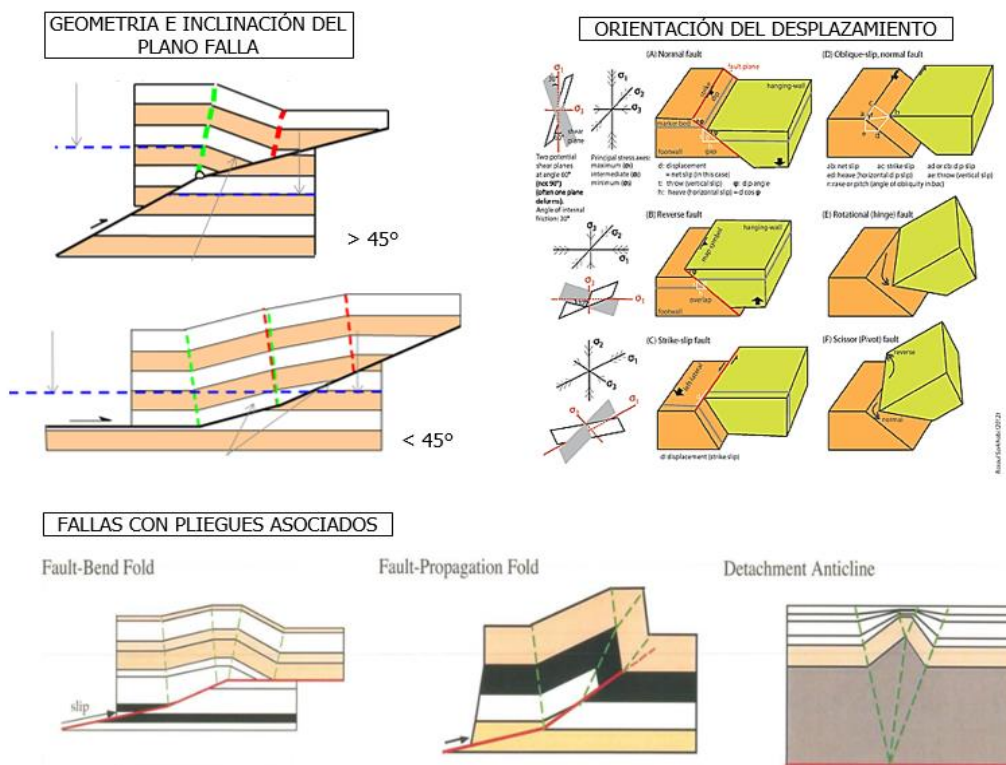
Figura 7. Elementos de una falla en general, para describir la orientación de un plano geológico matemáticamente se necesita conocer la dirección de inclinación, el rumbo y el buzamiento (modificado de Griem, 1997).



En este trabajo los siguientes componentes son usados para describir la geometría de la falla:

- Rumbo y buzamiento del plano de falla.
- Orientación del vector de deslizamiento.
- Magnitud del vector de deslizamiento.
- Sentido del movimiento.

Figura 8. Clasificación de fallas de acuerdo a diferentes elementos geométricos (modificado de Shaw, Connors y Suppe, 2004; Sorkhabi, 2012).

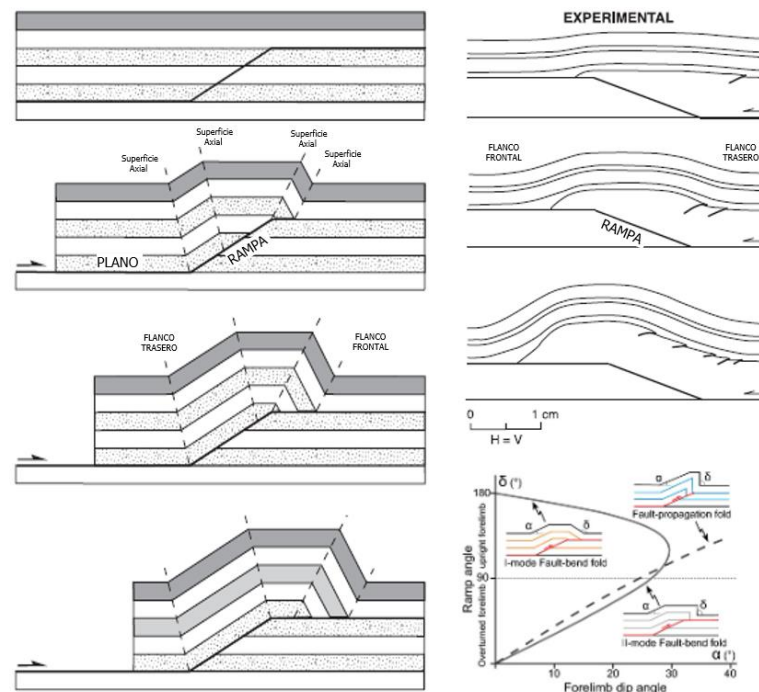


Considerando las imágenes sísmicas y trabajos previos reportados en la zona, la Falla de Honda es una falla inversa de cabalgamiento asociada a un pliegue de flexión de falla, a continuación se presenta una compilación breve de los pliegues de flexión de falla (*fault bend fold*). Los pliegues por flexión de falla se forman como resultado del movimiento del bloque colgante a lo largo de una superficie de falla no planar, lo cual causa la flexión del bloque y formación del pliegue.

Modelos teóricos cuantitativos y experimentales se han realizado para describir la geometría y cinemática de los pliegues por flexión de falla (Figura 9) en el caso más sencillo en un estado inicial con capas horizontales de espesor constante, la longitud y el espesor se

conservan durante todo el desarrollo del pliegue, garantizando la conservación del área (Poblet, 2004).

Figura 9. Pliegue de flexión de falla con sus elementos de plano, rampa y superficies axiales. Evolución cinemática de un pliegue de flexión de falla teórico propuesto por Suppe (1983) y una propuesta experimental tomada de Chester et al., (1991). Las variaciones se encuentran en los cambios del buzamiento de las capas en el flanco frontal con la amplificación del pliegue (modificado Poblet, 2004; Pace y Calamita, 2015).

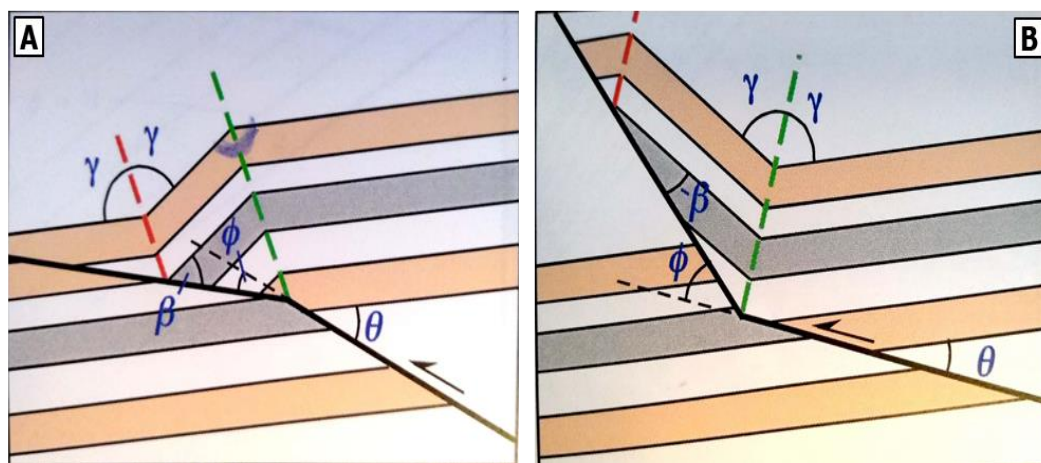


Las capas se deforman por deslizamiento paralelo a las capas (*flexural slip*) y las superficies axiales bisectan el ángulo entre los flancos del pliegue. Para un buzamiento de la rampa determinada hay dos soluciones llamados Modo I y Modo II, donde los flancos frontales son más suaves en el Modo I, mostrándose más razonables con la realidad geológica.

Considerando las asunciones sobre la conservación de la longitud y el espesor de las capas durante el plegamiento, la forma de los pliegues de flexión tanto anticlinal como sinclinal

está relacionado a la forma de la falla y se presentan algunos elementos geométricos claves en el presente trabajo (Figura 10): el ángulo de corte (Θ), el cambio en el buzamiento de la falla (Φ), el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) y el ángulo interlimbo (γ) (Shaw *et al.*, 2005).

Figura 10. Pliegue por flexión de falla y elementos geométricos. A. Anticlinales por flexión de falla donde el pliegue es cóncavo hacia la falla. B. Sinclinales por flexión de falla con el pliegue convexo hacia la falla (modificado de Shaw *et al.*, 2005).

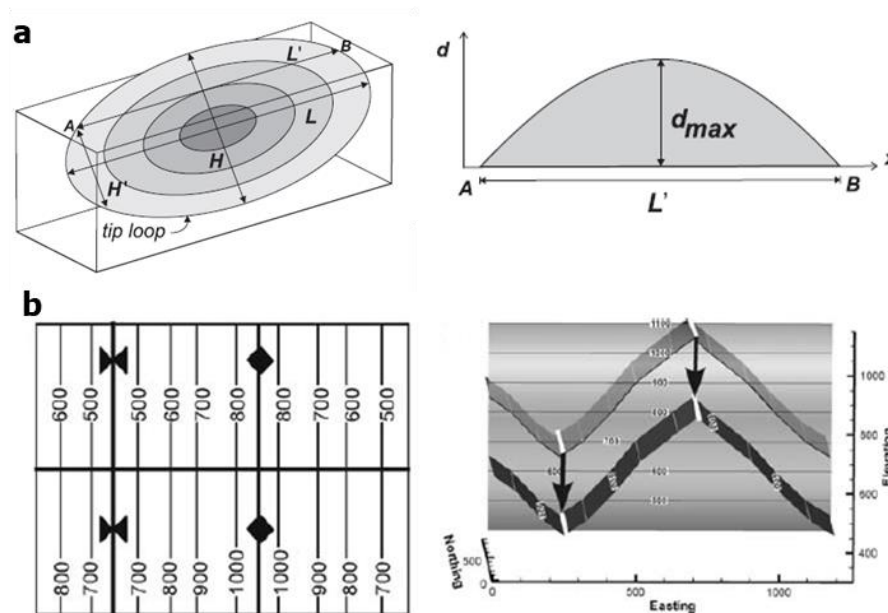


El desplazamiento de la falla es un término general para describir el movimiento relativo de los dos sectores (bloque yacente y colgante) de una falla en cualquier dirección, los componentes del desplazamiento dependen de cinco atributos medibles: la aptitud de la falla, la magnitud de la separación estratigráfica, la aptitud de las capas en ambos lados de la falla y la dirección del vector de slip en el plano de la falla. El salto de la falla y *heave* de las fallas son los componentes de separación más usados en los mapas de contornos (Groshong, 2006).

El desplazamiento de las fallas varía a través de la superficie de la falla, el desplazamiento es cero en los extremos de la falla e incrementa hasta un valor máximo en el centro de la superficie de la falla (Boyer y Elliot, 1982). El tamaño de la falla puede medirse de

diferentes formas, usualmente asociado a su máximo desplazamiento (d_{max}) o a sus máximas dimensiones en longitud (L) y en altura (H) (Figura 11a). Estos valores pueden extraerse de una superficie topográfica, secciones estructurales, mapas de contornos u horizontes geológicos (Kim y Sanderson, 2005) (Figura 11b).

Figura 11. Desplazamiento en fallas. **A.** Diagrama para ilustrar la distribución del desplazamiento sobre una superficie elíptica de una falla, los tonos más oscuros indican el incremento del desplazamiento hacia el centro de la falla y los elementos de desplazamiento. **B.** Mapa de contornos estructurales de una falla vertical con un slip vertical y una vista en tres dimensiones de esta falla tomando los elementos de localización y elevación (modificado de Kim y Sanderson, 2005; Groshong, 2006).



3.2 Cinemática de una Falla

El análisis cinemático en las zonas de falla nos permite determinar la dirección de desplazamiento de los bloques yacente y colgante, establecer el estilo estructural y la historia de estructuración dentro de un sistema de deformación.

Las herramientas en el análisis cinemático (Rowland *et al.*, 2007) incluyen una amplia serie de datos y actividades: (I) Recopilación de datos estructurales de estrías, huellas de presión, diaclasas, fallas, etc. (II) Compilación de datos de mecanismos focales reportados en las fallas activas de la zona. (III) Análisis geomorfológico con imágenes satelitales y/o DEM de las estructuras a nivel local. (IV) Construcción y validación estructural de transectas a lo largo del frente de deformación de la falla y/o sistema de fallas. (V) Cálculos de acortamiento en las transectas o recopilación bibliográfica de esta información.

Los datos estructurales relacionados a la Falla de Honda tienen tres fuentes: Información de campo recolectada de los diferentes mapas geológicos anteriormente publicados, información bibliografía recopilada de trabajos realizados sobre la zona, datos derivados de la interpretación geológica de las líneas sísmicas e información de diferentes rasgos estructurales del DEM.

3.3 Estilos Estructurales en una Faja Plegada y Corrida

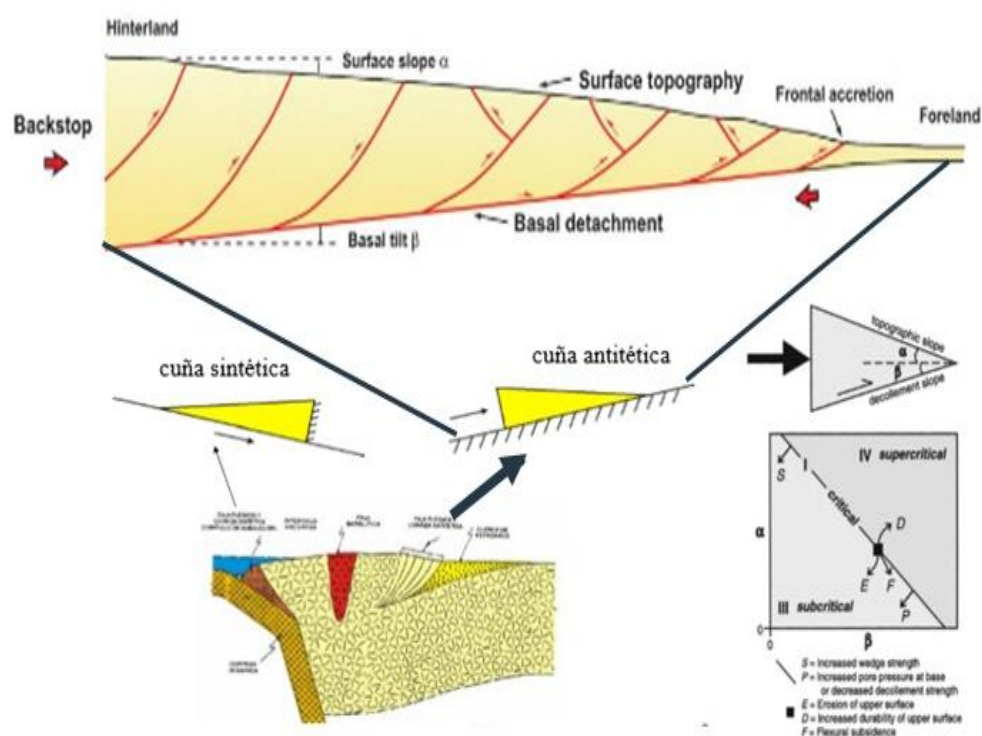
Los sistemas de fajas plegadas y corridas se forman en respuesta a la deformación por procesos tectónicos regionales asociados a subducción y locales de inversión tectónica con formas típicas de cuñas (Poblet, 2004). La respuesta de la cuña al avance de la deformación, está relacionada con la pendiente topográfica, el ángulo crítico, la superficie de despegue y los procesos de erosión (Horton 1999; Wu y McClay, 2011). En la Figura 12 se observa la posición de la cuña antitética en el sistema detrás del arco con la relación entre la topografía y el despegue del sistema de fallas.

El sector de la FPC cercano al frente orogénico se denomina zona frontal y está caracterizado por una deformación activa donde se desarrollan pliegues y corrimientos. El sector más alejado hacia el retropais se denomina zona de transporte con una deformación pasiva y se desplaza casi sin deformación interna sobre el despegue basal de la FPC. En la zona frontal, las

diaclasas o fracturas suelen disponerse en forma paralela al sentido de transporte tectónico indicando una posición subhorizontal al esfuerzo principal (Cristallini, 1998).

El estilo estructural de una FPC se clasifica teniendo en cuenta el nivel de despegue involucrado, este puede estar en zonas profundas con el basamento o en niveles someros de naturaleza plástica en la sección sedimentaria (Pfiffner, 2017). Típicamente se le denomina bloque autóctono a la zona no deformada dentro del sistema y bloque colgante a la zona deformada, donde puede estar involucrado el basamento o niveles de despegue dentro de secuencias sedimentarias tipo arcilla, *shale* o evaporitas (Rowland *et al.*, 2007).

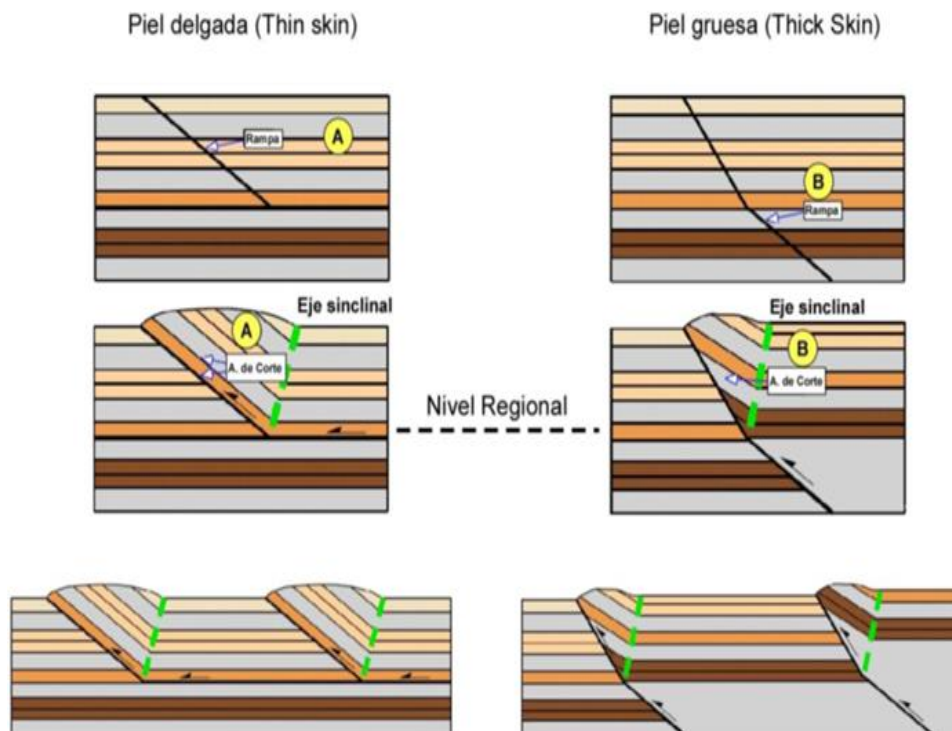
Figura 12. Los sistemas de fajas plegadas y corridas se forman en ambientes tectónicos de subducción y tienen forma típica de cuña. El desarrollo del sistema depende de la combinación de la topografía, la superficie de despegue y los procesos de erosión (modificado de Horton, 1999).



El estilo estructural de piel delgada (*thin-skinned*) es aquel donde no se involucra el basamento en la deformación y solo participa la secuencia sedimentaria, adicionalmente las fallas se encuentran conectadas en profundidad compartiendo un mismo nivel de despegue. La característica principal de este estilo es la conservación del nivel regional de los estratos en el bloque colgante por encima de la falla.

El estilo estructural de piel gruesa (*thick skinned*) involucra el basamento, los niveles de despegues no son paralelos a las capas, el buzamiento de las fallas disminuye en profundidad (Figura 13) y puede existir conectividad con otros despegues, sin embargo, el nivel regional va elevándose de un bloque estructural a otro desde el bloque autóctono.

Figura 13. Comparación estilos estructurales de piel delgada vs piel gruesa (modificado de Shaw et al., 2005).



Es importante resaltar que en un sistema de FPC es posible que se presenten ambos estilos estructurales, a esto se le denomina un estilo híbrido. Su presencia está estrictamente relacionada a la historia tectono-sedimentaria de la cuenca.

Los estilos híbridos también se presentan de procesos de inversión tectónica, término utilizado para definir cambios geométricos en las estructuras debido a cambios en las condiciones tectónicas de una zona específica, por ejemplo, un sistema de fallas normales formado en un régimen extensivo pasa a comportarse como fallas inversas al presentarse un cambio a régimen de subducción con un alto grado de compresión (Cooper *et al.*, 1989). En términos generales el acortamiento absorbido por el estilo de piel delgada es mucho mayor, pero las elevaciones estructurales alcanzadas son algo menores.

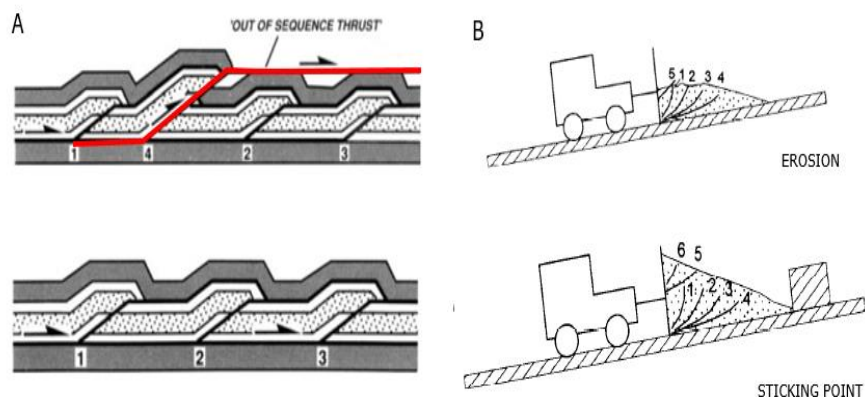
- **Falla fuera de Secuencia (out-of-sequence-thrust OST)**

En los sistemas de FPC, al presentarse cambios en los niveles de base por procesos erosivos o por la presencia de obstáculos por cambios abruptos en la geología como un bloque de basamento o un cordón montañoso, se pueden formar fallas fuera del orden respecto a un sistema general (Figura 14a), estas representan una anomalía de la tercera ley de Dahlstrom y se denominan fallas fuera de secuencia (OST) out of sequence thrust (Morley, 1988; Wu y McClay, 2011).

El mecanismo de formación se presenta cuando la deformación se interrumpe momentáneamente en el frente orogénico, comienza desde atrás el desarrollo de la falla fuera de secuencia que puede cortar estructuras previamente desarrolladas o en el caso de encontrarse un obstáculo (*sticking point*), la deformación se traslada a la zona interna de la FPC. A diferencia de los corrimientos comunes que siempre cortan secuencia arriba, una falla fuera de secuencia puede cortar secuencia arriba o abajo (Figura 14b). Una vez reestablecidas las condiciones

previas del ángulo crítico, los corrimientos fuera de secuencia se desactivan y se retoma la deformación del frente orogénico.

Figura 14. Falla fuera de secuencia. **A.** En la figura inferior, la secuencia de corrimientos tiene fallas nucleadas en los bloques yacentes de las fallas anteriores y el dominio tectónico está en la misma dirección de los corrimientos previos, los números indican la secuencia de fallamiento. En la figura superior, la falla fuera de secuencia corta el sistema de cabalgamiento (modificado McClay, 1992) **B.** Ejemplo gráfico de la formación de las estructuras fuera de secuencia, en la parte inferior por interposición de un obstáculo y en la parte superior por erosión en la zona trasera (modificado de Cristallini, 1998).

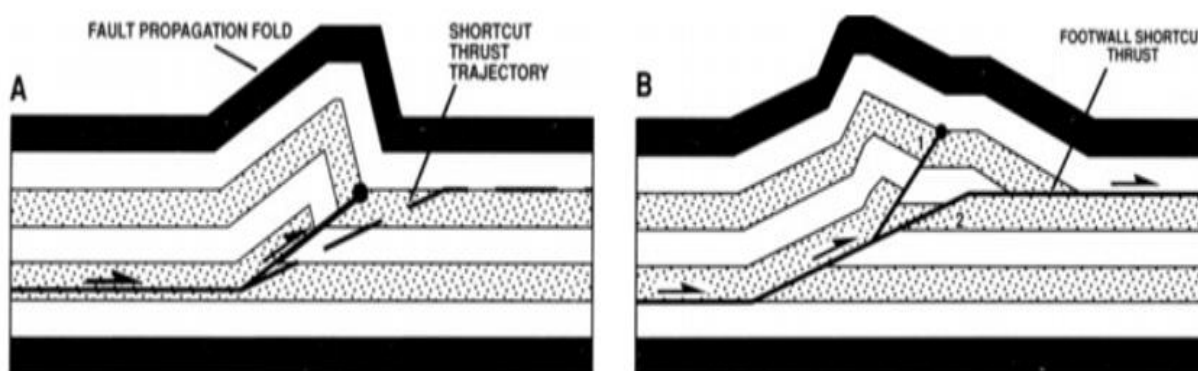


- **Falla de atajo (shortcut)**

Es una falla de bajo ángulo desarrollada en el bloque yacente de una falla de alto ángulo (Figura 15). La trayectoria de la falla de bajo ángulo es cinemáticamente y mecánicamente más factible en respuesta a grandes deformaciones que la creación de una falla de alto ángulo (McClay, 1992). Este término de falla de atajo es ampliamente utilizado para inversión tectónica, donde la geometría de esas fallas de atajo están vinculadas a las fallas extensionales creadas durante la apertura de la cuenca.

Figura 15. Falla de atajo **A.** Pliegue de propagación de falla con una trayectoria incipiente de la falla de atajo. **B.**

Configuración final después del desplazamiento sobre la falla de atajo (modificado McClay, 1992).



3.4 Configuración Tectónica y Estructural en el Sur del VMM

Los Andes del Norte en Colombia y las diversas cuencas asociadas son el producto de una compleja fragmentación, acreción e historias de subducción de placas oceánicas y deformación intracontinental registrada desde el Proterozoico (Etayo Serna *et al.*, 1983; Gómez *et al.*, 2015; Díaz Poveda, 2016). En la actualidad, el arreglo de las placas tectónicas incluye la interacción de la placa de Nazca, placa Caribe y placa Suramericana (Figura 16a), esta interacción con una placa en subducción produce el levantamiento de los Andes durante el Neógeno a través de un proceso de inversión tectónica.

En línea con el objetivo del presente trabajo, la Cordillera Oriental es un sistema de doble vergencia de FPC vinculado a la subducción de la placa de Nazca (Figura 16b) con trenes en dirección NE-SW siguiendo la dirección de las estructuras previas del basamento, a nivel local se presentan una serie de cambios en las orientaciones principales.

En las últimas dos décadas una serie de trabajos utilizando tomografía sísmica, sismos, mecanismos focales, modelos geoestadísticos y reconstrucción de paleoesfuerzos han sido

llevados a cabo para mejorar el entendimiento sobre la configuración tectónica actual, en la figura 17 se presenta a modo de resumen el modelo manejado por Cortes y Angelier (2006) donde hay una placa Nazca y una placa paleo-Caribe subduciendo debajo del bloque Andino y el modelo de Vargas *et al.* (2011) donde la placa de Nazca subduce al oeste la placa Sudamericana, además reporta la presencia del *Indenter* de Panamá con el *Caldas Tear* alineado al nido sísmico de Bucaramanga.

Estos modelamientos permiten entender los cambios locales en las orientaciones de los trenes y la respuesta de las estructuras a los cambios en los regímenes tectónicos. Las placas de Nazca y Caribe generan sobre la placa Sudamericana un régimen tectónico traspresivo, donde los trenes estructurales cambian significativamente hacia el NE (Ego *et al.*, 1996).

Los modelos tectónicos generados para los Andes Colombianos integrando datos de diferentes sectores a lo largo del frente del SFM indican que las fallas no solo están asociadas a movimientos de deslizamiento de falla, también hay una componente de movimiento oblicuo involucrada.

Figura 16. Configuración tectónica y estilo estructural **A.** Mapa tectónico actual de los Andes del Norte donde interactúan las placas de Nazca y Caribe de afinidad oceánica con la placa Sudamericana (modificado de Mantilla-Pimiento et al., 2009) el cuadro negro corresponde al área de estudio. **B.** Corte geológico a través de la Cordillera Oriental (línea roja) desde el Sinclinal de Guaduas a los Llanos Orientales mostrando las características de doble-vergencia en un estilo estructural de piel gruesa considerando un basamento Precámbrico a Paleozoico (modificado de Tesón et al., 2013).

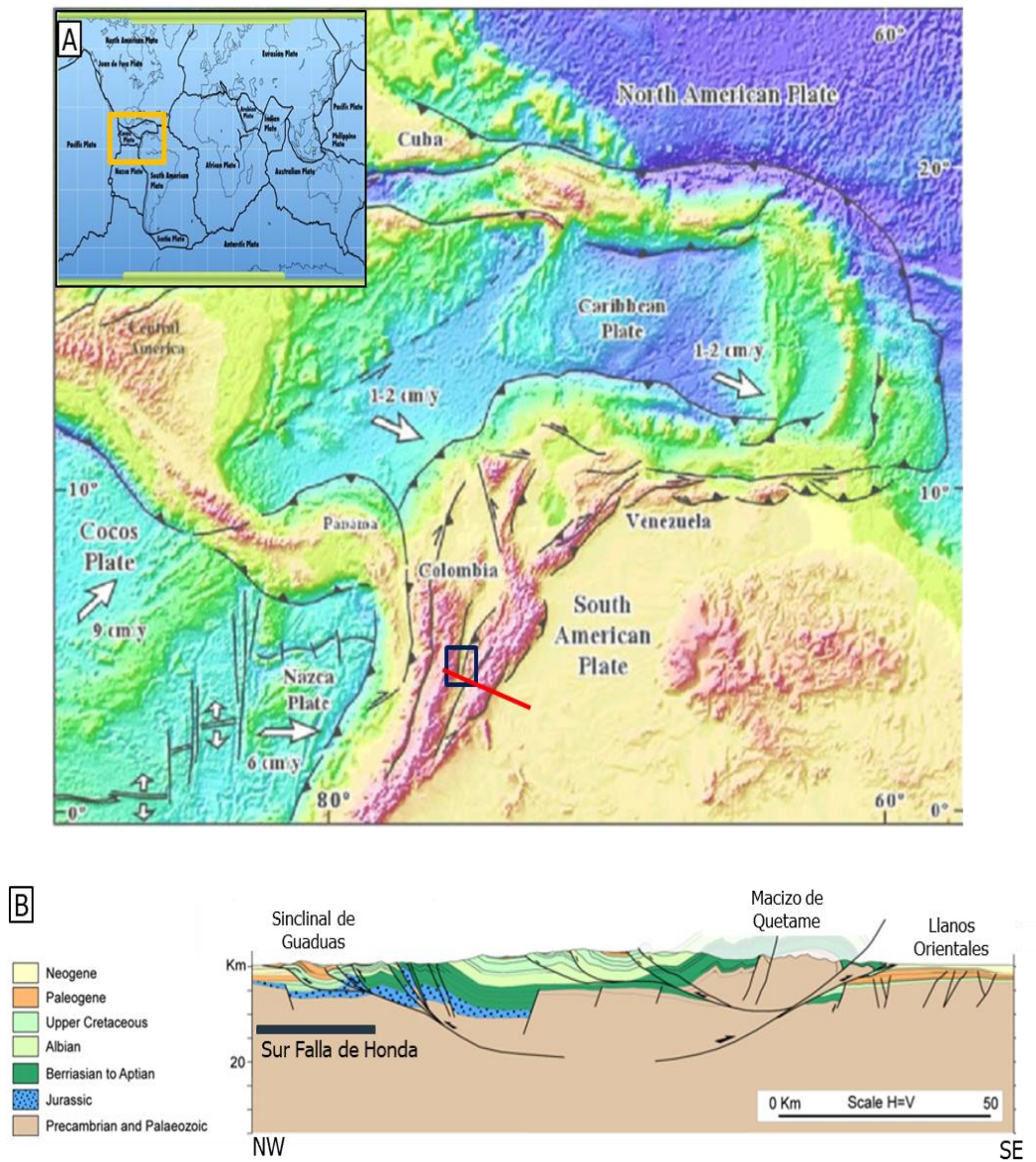
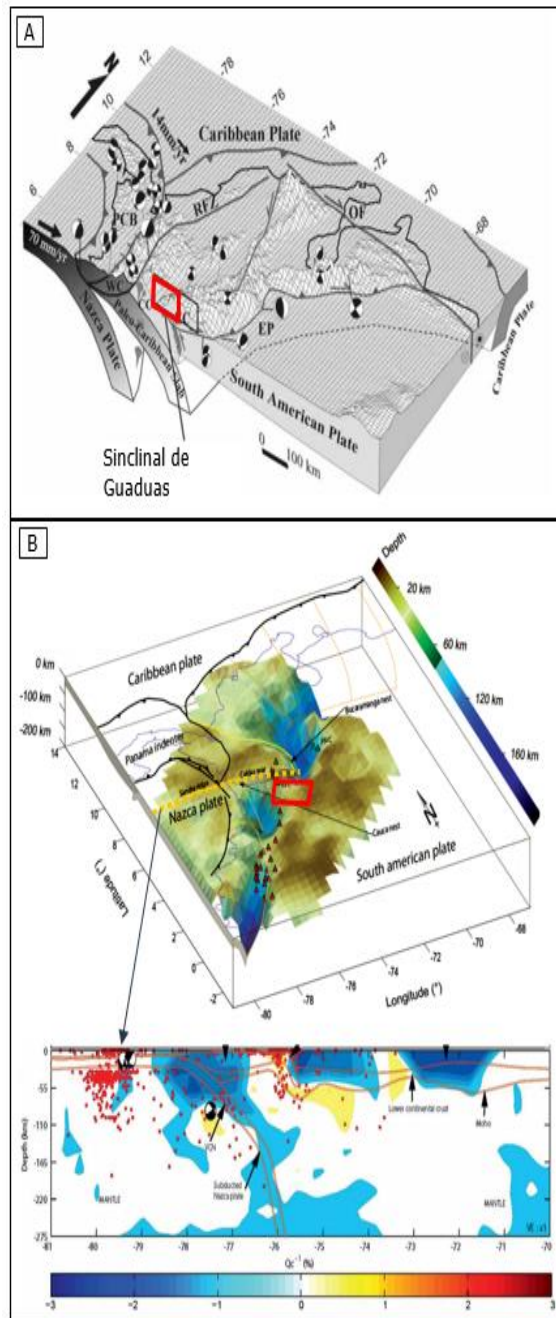


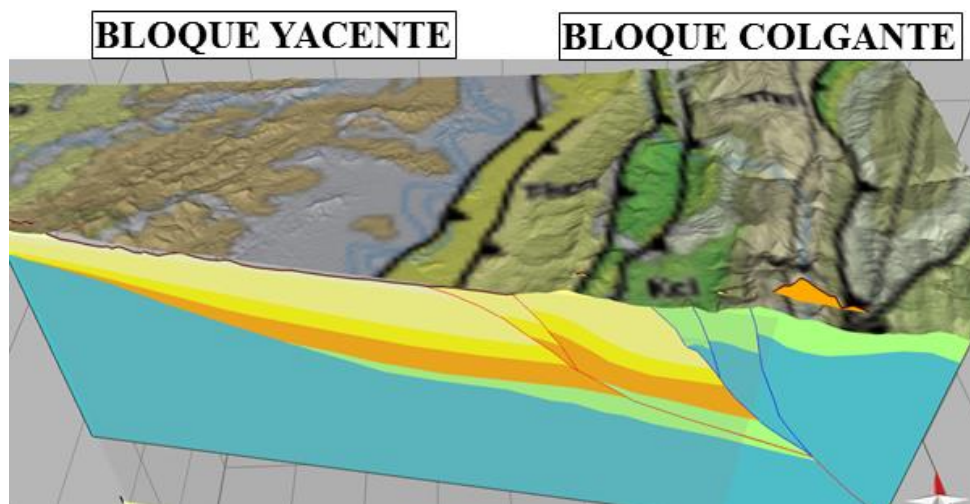
Figura 17. Modelos de configuración tectónica propuestos en la zona de Cordillera Central, VMM y Cordillera Oriental. **A.** Presencia de la placa de Nazca y la paleo placa Caribe subduciendo bajo el bloque Andino (modificado de Cortes y Angelier, 2005) **B.** Placa de Nazca en subducción de alto ángulo, presencia del *Intender* de Panamá y el *Caldas Tear* con sus respectivos nidos sísmicos. La imagen de tomografía presenta a través de las anomalías de atenuación la geometría de subducción (modificado de Vargas *et al.*, 2011).



La cinemática de estas fallas es el resultado del movimiento conjugado de rotación en contra de las manecillas del reloj y la expulsión del bloque Andino. Esta rotación induce un sentido dextral a lo largo de las fallas principales Ibagué, Palestina y Guaicaramo (Acosta *et al.*, 2004). El esfuerzo a lo largo del frente occidental de la Cordillera Oriental es particionado a lo largo de las fallas de rumbo de Bucaramanga y La Salina-Bituima con trenes NNW-SSE. La falla La Salina-Bituima es una falla normal invertida, la cual a través del tiempo cambio de inversa a oblicua como resultado de la indentación del bloque Panamá. Las fallas de Cambras, Dos Hermanos y Honda son cabalgamientos y fallas oblicuas con una dirección de transporte del SE al NW, ramificadas de la falla de Bituima como resultado de la traspresión durante el cambio de desplazamiento cinemático a lo largo del sistema La Salina-Bituima (Acosta *et al.*, 2004).

En este trabajo, el bloque yacente corresponde a la subcuenca de Honda con una forma homoclinal desde las estribaciones de la Cordillera Central y el bloque colgante está asociado al flanco occidental de la Cordillera Oriental (Figura 18), donde se encuentra el sistema de fallas del Magdalena (SFM).

Figura 18. Estilo estructural de piel gruesa en el SFM en el bloque colgante asociado a la Cordillera Oriental y un estilo de piel delgada para la Falla de Honda como una falla fuera de secuencia en el bloque yacente.



3.5 Conversión a Profundidad

Es un procedimiento indispensable para llevar a profundidad los datos de subsuelo y su interpretación que provienen de perfiles sísmicos en tiempo. Para esto es necesario conocer y tener claridad de las velocidades de los cuerpos litológicos involucrados en el modelo. Infortunadamente no existe un procedimiento directo que derive en un perfil sísmico en profundidad a partir del perfil sísmico en tiempo.

Esto se debe a que la distribución de la velocidad a lo largo de un perfil sísmico varía y depende directamente de la distribución de los cuerpos de roca involucrados en las estructuras (Francis, 2018). Teniendo en cuenta esto, si se cambia la interpretación o el modelo geológico planteado, la distribución de la velocidad debe cambiar y el resultado de la conversión será diferente en cada escenario interpretado.

El uso principal de las medidas de velocidad es poder llevar a cabo la conversión de tiempo a profundidad. La forma directa para obtener las velocidades sísmicas provienen de un pozo y las mediciones que tengan lugar dentro de éste como los tiros de pozo o mejor llamados “*checkshots*”, los cuales dan mediciones discretas de la velocidad y del registro sísmico del cual se obtienen medidas continuas de velocidad.

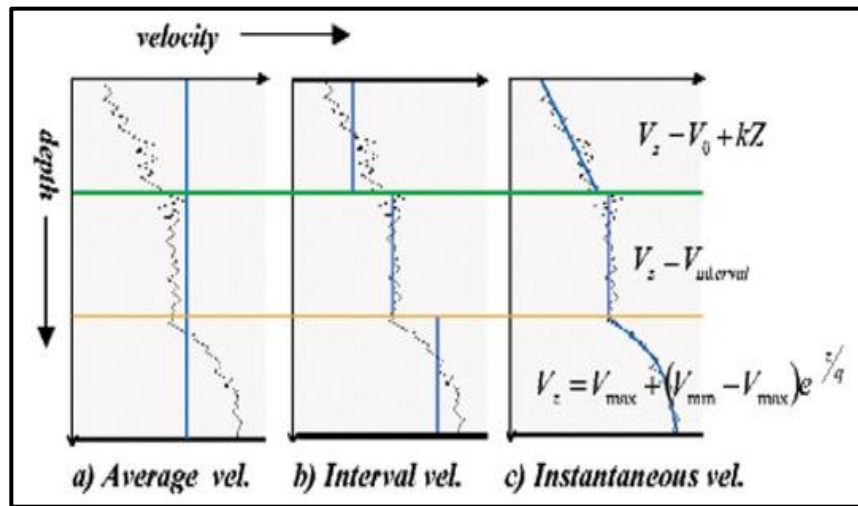
En la figura 19 se muestra que hay tres niveles de detalle en un modelo de velocidad, dependiendo de cómo se comporte la velocidad con la profundidad. El nivel más simple es el de velocidad media (Figura 19a) donde se dejan de lado las capas y vamos directamente al horizonte de interés, este método es simple y fácil de implementar pero no da una descripción a detalle del subsuelo.

En cambio el método de velocidades de intervalo (Figura 19b) permite entender la variación espacial entre la velocidad y la ubicación de pozos que garantiza un modelo de mejor

detalle pero indudablemente si todavía necesitamos mayor detalle, es decir, que nuestro modelo de capa incluya la variación de la velocidad con la profundidad.

Para el caso de que las velocidades aumenten con mayores grados de compactación debido a una sobrecarga mayor, está el modelo de velocidad instantánea (Figura 19c) que es una variación de la velocidad en muy pequeños incrementos de profundidad y puede ser descrita por una función de velocidad (Hernández López, 2011).

Figura 19. Modelo teórico en las relaciones de velocidad promedio, velocidad intervállica y velocidad instantánea (modificado de Schultz, 1999).



En este trabajo se va a utilizar la metodología de “*Layer Cake*” a través del método de velocidad por horizontes, donde la conversión tiempo/profundidad se realizará con una función simple a partir de un datum sísmico y la función lineal entre velocidad y profundidad están basados en el trabajo de Marsden (1992).

El método de velocidad por horizonte asume que la velocidad de una capa se mantiene igual a cierta profundidad, donde usamos una velocidad inicial en el tope del horizonte de interés

(V_0) y una tasa de cambio de velocidad dentro de la capa (k). La función implementada corresponde a:

$$Z = V_0(e^{kt} - 1)/k$$

Z : Espesor de la capa en metros.

V_0 : Velocidad al tope de la capa en metros por segundo (m/s).

k : Tasa de cambio de la velocidad con respecto al incremento en la profundidad.

t : Tiempo sencillo para la capa de interés en segundos.

3.6 Construcción de Secciones Balanceadas

Una sección geológica debe cumplir dos requisitos, ser “admisible” y “viable”. Una sección admisible es aquella donde la configuración geológica dibujada respeta el estilo estructural que se observa en el área de interés. Una sección viable es aquella sección geológica que cumple con el requisito de ser retrodeformable, es decir, a las estructuras se les puede retirar los efectos de la deformación (fallas y pliegues) hasta una posición inicial dentro de una cuenca, sin que aparezcan anomalías.

Es muy importante resaltar que una sección geológica balanceada no representa la realidad, es sólo un modelo que tiene mayor posibilidad de ser correcto porque satisface las limitaciones geométricas. Una vez el concepto regional es entendido, la construcción de secciones balanceadas con su retrodeformación permite confirmar la geometría de la falla y la correcta relación del acortamiento a través del frente de deformación.

Existen varios métodos para restituir una sección geológica y comprobar si la sección efectivamente está balanceada (Groshong, 2006), donde se considera la premisa de conservación en la longitud de líneas y áreas, aparte de esto se asume que no hay deformación fuera de la sección.

- **Restitución por longitud de línea:** este tipo de restitución considera la premisa de que se conserva la longitud de líneas y por ende el espesor de los estratos antes y después de la deformación.
- **Restitución por áreas:** se asume que no hay cambio de volumen o área, si se considera una sección bidimensional durante la deformación de la secuencia.
- **Método combinado:** se combinan los dos tipos de restituciones, en este tipo de balanceo se restituye la porción estratificada mediante longitud de líneas y el basamento por áreas. Cada escama separada por una falla se trata individualmente, debe tener la misma área y longitud en los estratos, antes y después de la deformación.
- **Flujo Paralelo a la Falla (Fault Parallel Flow):** Es un algoritmo implementado en el software Move que está basado en el trabajo de Kane *et al.* (1997). El algoritmo hace que los bloques colgantes se muevan a una misma velocidad y con una dirección paralela a la superficie de falla. Este algoritmo es el más empleado para restauración estructural de fallas inversas y pliegues por flexión de falla. Es de gran utilidad para validar una sección por partes.

3.7 Cálculo de Acortamiento

Una vez realizada la retrodeformación de las secciones estructurales, el cálculo de acortamiento (Means, 1990) se obtiene como el resultado de la diferencia de longitud entre la sección sin restituir y la sección deformada.

$$S = ((l_o - l_f) \times 100) / l_o$$

l_o : longitud inicial previa a la compresión

l_f : longitud después de la compresión.

3.8 Potencial de Hidrocarburos

La cuenca del VMM es una cuenca madura a nivel exploratorio localizada entre la Cordillera Central y Oriental, concentra su producción en la subcuenca de Barrancabermeja, en general tiene reservas de petróleo estimadas en 1.900 MMBO y reservas de gas de 2.5 Gcf (Barrero *et al.*, 2007). Debido a los diferentes procesos geológicos que dieron origen a la cuenca del VMM, se encuentran diferentes tipos de estructuras; al sur un área poco deformada y al norte se encuentran fallas y pliegues que alcanzan a afectar toda la secuencia sedimentaria (Lozano y Zamora, 2014).

En la subcuenca de Honda, localizada en el extremo sur del VMM con características geológicas propias (Figura 20a) se han reportado en el Geoportal de la ANH (2020) la presencia de rezumaderos con diferentes calidades de crudos, asociados a fallas y en las estribaciones de la Cordillera Central (Figura 20b).

A nivel exploratorio desde 1921 hasta 2017, se han perforado 90 pozos exploratorios (A3) y cuatro pozos estratigráficos (Figura 20c; Tabla 1). Los campos descubiertos en la

subcuenca de Honda (Figura 20b) son de grandes a pequeños con OOIP menor a 100 MMBO (*API Clasification* en Frank *et al.*, 2008) en línea con el objetivo del presente estudio, en la Tabla 2 se resume la información de los campos y su posición en relación al bloque yacente o colgante.

3.8.1 Sistema Petrolífero en la subcuenca de Honda

Los sistemas petrolíferos están definidos como un conjunto natural de elementos que funcionan de forma interactiva con los procesos esenciales geológicos para que una acumulación de hidrocarburo pueda existir (Magoon y Dow, 1994).

En los sistemas petrolíferos convencionales la roca de sobrecarga sepulta a la roca generadora hasta profundidades en las que alcanza una madurez suficiente para generar el petróleo.

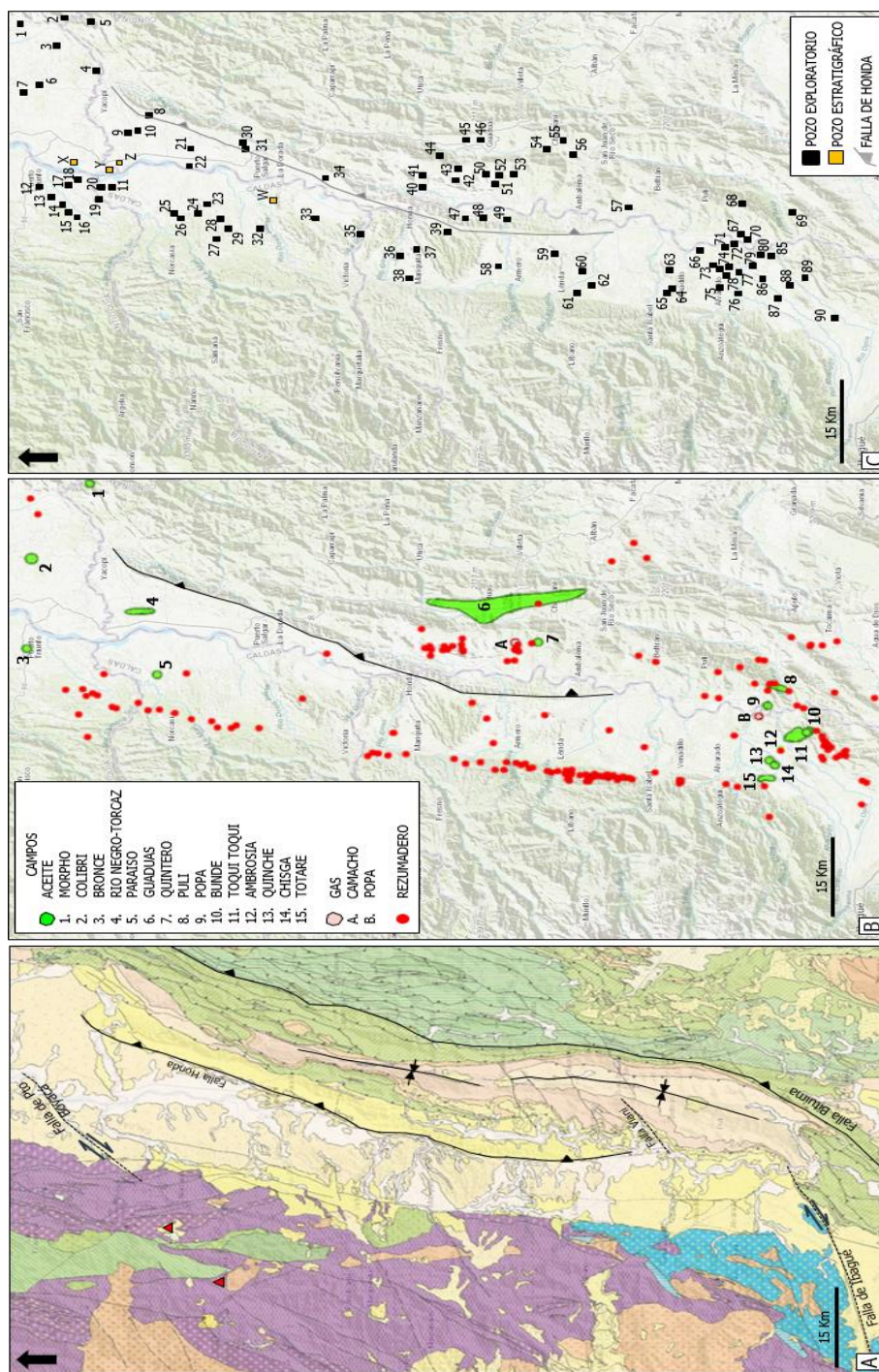


Figura 20. Subcuenca de Honda, sur del VMM. **A.** Mapa Geológico Regional (SGC, 2020) con los elementos estructurales principales y la posición de la Falla de Honda. **B.** Localización de los rezumaderos de aceite y campos de aceite y gas reportados en la base de datos de la ANH (2020). **C.** Localización de los pozos exploratorios y estratigráficos perforados (ANH, 2020).

Tabla 1. Lista de pozos exploratorios y estratigráficos perforados en la subcuenca de Honda, sur del VMM referenciados en la Figura 20 (modificado ANH, 2020). EsPo (Estructural Posición) BC: Bloque Colgante BY; Bloque Yacente.

POZOS EXPLORATORIOS	COMPAÑÍA	AÑO	TD (ft)	EsPo	POZOS EXPLORATORIOS	COMPAÑÍA	AÑO	TD (ft)	EsPo
1 DOS HERMANOS-1	TEXACO	1961	12896	BY	49 MENDEZ-1	INTERCOL	1958	9608	BC
2 AGATA-1	TEXACO	1998	6201	BC	50 JUAN PABLO-1	COCODRILL	1994	1314	BC
3 LA FIEBRE-1	TEXACO	1954	13580	BY	51 MADRIGAL-1	LASMO	1987	3494	BC
4 GUANEGRO-1	TEXACO	1955	13920	BY	52 PRIMAVERA-1	BROWN	1937	7405	BC
5 MORPHO-1	ECOPETROL	2010	12665	BC	53 QUINTERO-1	COCODRILL	1989	1885	BC
6 DIAMANTE-1	TEXACO	1964	11823	BY	54 OCOBO-1	PETROMINERALES	1984	7515	BC
7 BRONCE-1	TEXACO	1998	11030	BY	55 QUINA-1	AIPCC	1992	6981	BC
8 TOPAZ-1	TEXACO	1961	13185	BY	56 LAS PALMAS-1	PETROMINERALES	1987	3225	BC
9 TORCAZ-1	HARKEN	1996	8488	BY	57 BELTRAN-1	ELF	1980	12518	BC
10 RIO NEGRO-1	TEXACO	1961	7820	BY	58 POTOSI-1	HOCOL	1984	1871	BY
11 ANDES-1	HERITAGE	1991	3075	BY	59 CARRIZALES-12	C&C	2011	8707	BY
12 COLIBRI-1	TEXACO	1987	2304	BY	60 ARMERO-1	HOCOL	1983	3478	BY
13 TOMINEJA-1	TEXACO	1988	2307	BY	61 LA SIMA-1	VAROSA	2007	967	BY
14 PERDIZ-1	TEXACO	1985	1927	BY	62 ARMERO-2	HOCOL	1988	1953	BY
15 WOLF-1	CONEQUIPOS	2017	1725	BY	63 AMBALEMA-1	TEXACO	1970	5806	BY
16 SOFIA-1	CONEQUIPOS	2017	1315	BY	64 LA SIERRA-1	PETROMINEROS	1991	1817	BY
17 CISNE-1	TEXACO	1985	2735	BY	65 RECIO-1	RANCHO HERMOSO	2010	1812	BY
18 FLORIDA-1	CONEQUIPOS	2017	3000	BY	66 SANTUARIO-1	TOTAL	1988	8501	BY
19 GUTIERREZ-1	RICHMOND	1946	1675	BY	67 POPA-1	GRANTTIERRA	2006	9282	BY
20 GUTIERREZ-2	RICHMOND	1946	2125	BY	68 PULI-1	INTEROIL	1990	3090	BC
21 RIO NEGRO-5	AMOCO	1986	9337	BY	69 GUATIQUEI-1	TRANSCONT	1921	3310	BC
22 CHORREMANTECA-4	RICHMOND	1945	7046	BY	70 CANEYES-1	GRANTTIERRA	2007	2704	BY
23 GUACA-1	HERITAGE	1991	4715	BY	71 POPA-2	GRANTTIERRA	2008	8635	BY
24 RIO LA MIEL-1	HERITAGE	1990	3616	BY	72 CANTARANA-1	GRANTTIERRA	2008	9400	BY
25 SANTAGUEDA-1	HERITAGE	1990	2684	BY	73 SALTO NUEVO-1	NS RES	1989	4875	BY
26 PARAISO-1	DOREAL	2000	2638	BY	74 LERIDA-1	TEXACO	1972	5750	BY
27 CHORREMANTECA-1	RICHMOND	1944	1260	BY	75 TOTARE-1	HOCOL	1986	1541	BY
28 CHORREMANTECA-2	RICHMOND	1945	1262	BY	76 MACONDO-1	PETROMINERALES	1990	1700	BY
29 CHORREMANTECA-3	RICHMOND	1945	2100	BY	77 CHISGA-1	AIPCC	1995	3046	BY
30 LOMA VIUDA-1	TEXACO	2009	4900	BC	78 QUINCHE-1	AIPCC	1994	3585	BY
31 SAN ANTONIO-1	TEXACO	1969	9596	BC	79 AMBROSIA-1	MERCANTILE	2004	5300	BY
32 CAÑO RICO-1	PETROMINEROS	1992	2605	BY	80 TOQUI TOQUI-1	MERCANTILE	2005	4328	BY
33 PURNIO-1	PETROMINEROS	1990	4950	BY	81 TONOLO-1	PETEX	1989	3775	BY
34 BUFALO-1	ECOPETROL	2017	8000	BC	82 SAMAN-1	AIPCC	1995	8000	BY
35 RIO GUARINO-1	HERITAGE	1991	3863	BY	83 HALCON-1	AIPCC	1994	3329	BY
36 RIO GUALI-1	HERITAGE	1991	2405	BY	84 VENADILLO-1	CAN WEST	1999	3250	BY
37 LUMBI-1	SINOCO	2009	2998	BY	85 BUNDE-1	ELF	1978	5023	BY
38 MARIQUITA-1	TEXPET	1986	4225	BY	86 ESCONDIDO-1	INTEROIL	2007	4534	BY
39 YAGUALI-1	HERITAGE	1991	6400	BY	87 PENOSA-1	TRANSCONT	2003	4809	BY
40 PENARANDA-1	TANSCO	1918	3111	BC	88 MONTMELO-1	AVALON	2009	6030	BY
41 PENARANDA-2	TROCO	1925	2290	BC	89 PIEDRAS-1	ELF	1977	3205	BY
42 CAMACHO-1	TRANSCOT	1920	3111	BC	90 TALLO-1	OXY	2008	5388	BY
43 JUANITA-1	COCODRILL	1989	1716	BC					
POZOS EXPLORATORIOS	COMPAÑÍA	AÑO	TD (ft)	EsPo	POZOS ESTRATIGRAFICOS	COMPAÑÍA	AÑO	TD (ft)	EsPo
44 CIMARRONA-3	SIPETROL	2000	4761	BC	W STRAT XS-12	INTERCOL	1961	7435	BY
45 EL SEGUNDO-1	GHK	1996	6294	BC	X STRAT-22	TEXACO	1959	3794	BY
46 ALCON-1	ALPHA	2005	2195	BC	Y STRAT-23	TEXACO	1959	4429	BY
47 CHIRIPA-2	INTERCOL	1964	2664	BC	Z STRAT-24	TEXACO	1959	5328	BY
48 CHIRIPA-1	INTERCOL	1964	9549	BC					

Tabla 2. Lista de campos productores de aceite reportados en la subcuenca de Honda, sur del VMM (modificado ANH, 2020).

NOMBRE CAMPO	AÑO DESCUBRIMIENTO	OIIP (MMBO)	AREA (km)	FACTOR RECOBRO (%)	BLOQUE YACENTE	BLOQUE COLGANTE
GUADUAS	1996	75	82	20		
TOQUI TOQUI	2005	61	9.3	28		
PULI	1990	10	4.1	20		
AMBROSIA	2004	3.5	2.1	30		
RIO NEGRO	1961	3.2	5.7	20		
MORPHO	2010	2.5	2.2	20		
BRONCE	1998	2.5	3.8	20		
POPA	2006	1.5	2.1	25		
TOTARE	1986	1.5	3.3	20		
COLIBRI	1987	1.2	2.1	10		
PARAISO	2000	0.8	2.1	10		
QUINTERO	1989	0.5	2.1	10		
QUINCHE	1994	0.5	2.1	10		
CHISGA	1995	0.3	1.1	10		
BUNDE	1978	0.2	2.1	10		

El petróleo generado por la roca térmicamente madura es expulsado hacia el interior de una capa porosa y permeable, y luego migra hacia una roca en la que es entrampado estructural o estratigráficamente por debajo de un sello impermeable (McCarthy *et al.*, 2011). Usualmente se describen con el nombre de la roca fuente seguido del nombre de la roca reservorio. Los elementos del sistema petrolífero en el sur del VMM, subcuenca de Honda (Figura 21) y el norte del VSM han sido reconocidos y estudiados por diferentes autores, en este estudio se seguirán los trabajos de Barrero *et al.*, 2007; Moretti *et al.*, 2010; Sarmiento, 2011 y ANH, 2014.

- **Fuente:**

Los *shales* y calizas de edad Cenomaniano a Santoniano (Formación La Luna: Grupo Villeta) son la principal roca fuente de la cuenca del VMM. El TOC es alto (>1%) y la materia orgánica es esencialmente tipo II, el Ro alcanza los valores de 0.6-1.2 % (Sarmiento, 2011). Los

tiempos de generación y expulsión de hidrocarburos varían a lo largo de la cuenca, ocurriendo muy temprano en la zona de Cordillera Oriental (± 70 Ma) donde actualmente la expulsión permanece en algunos sectores y posteriormente en la zona Central a Sur donde la expulsión comenzó ± 50 Ma (Garcia *et al.*, 2003).

La Formación Cimarrona de edad Maastrichtiano (también conocida como Formación Umir) ha sido reconocida como una roca fuente potencial (Ramon *et al.*, 1997), los estudios de pirolisis presentados en Moretti *et al.* (2010) confirman el potencial de este nivel y aportan nuevos datos: la unidad es inmadura a madura en el flanco oriental del Sinclinal de Guaduas (T_{max} 420°; R_o : 0.49 – 0.53). La madurez incrementa hacia el oeste del Sinclinal de Guaduas debido al cabalgamiento bajo el sistema de fallas de Cambao y la generación de hidrocarburos se presenta durante la última fase compresiva asociada al levantamiento de la Cordillera Oriental.

- **Reservorio:**

El principal reservorio en el bloque yacente donde se han reportado diferentes campos está asociado a los cuerpos arenosos continentales de la Formación Mugrosa y el Grupo Honda del Eoceno al Mioceno Temprano, tienen un origen fluvial con porosidades de 10 a 20% y permeabilidades de 10 a 1000 md (Sarmiento, 2011). En el bloque colgante los reservorios explorados en los campos Guaduas y Pulí son sistemas fracturados de la Formación Cimarrona (Formación La Tabla en nomenclatura del VSM).

- **Sello:**

Los intervalos lodolíticos intraformacionales de la Formación Mugrosa, San Juan de Río Seco y el Grupo Honda, tienen el espesor y la continuidad lateral para ser sellos funcionales de los cuerpos arenosos reservorio (Sarmiento, 2011). En el bloque colgante, la Formación Cimarrona tiene como sello vertical a la Formación Guaduas e intraformacionalmente diferentes niveles de lodolitas.

- **Trampa:**

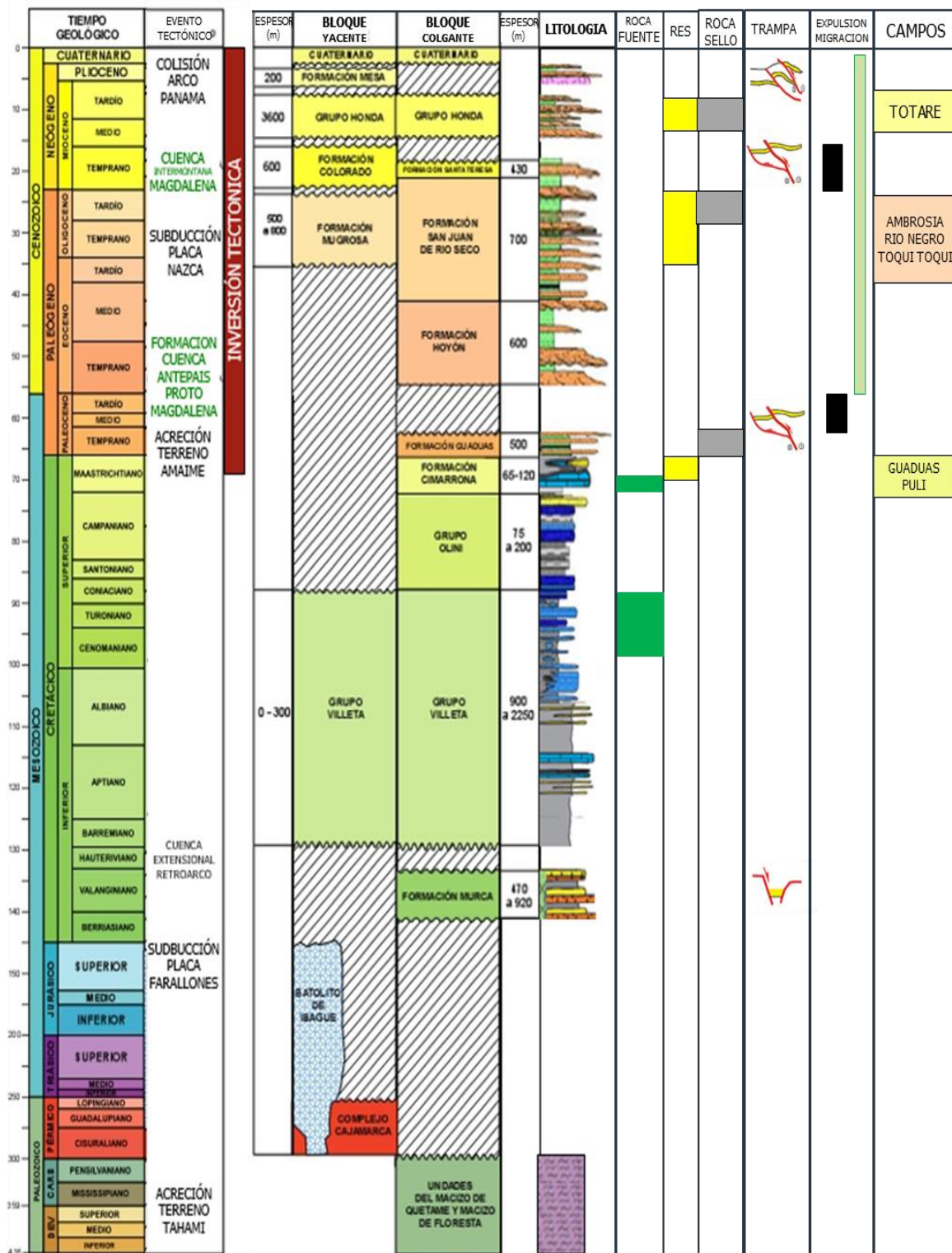
Bloque Colgante: Estructural. Pliegues asociados a cabalgamientos en la Cordillera Oriental, constituyen cierres en tres direcciones localizados en el flanco oriental de la cuenca y formados durante los diferentes pulsos de levantamiento.

Bloque Yacente: Estructural. Cierres estructurales en tres direcciones en posición debajo del cabalgamiento. Estratigráfico. Cuerpos de arenitas pinchándose contra las rocas sellos intraformacionales.

- **Migración:**

Una serie de eventos marcan la historia de generación y expulsión de hidrocarburos en la cuenca del VMM de acuerdo a Garcia *et al.* (2003). En resumen, se presenta un continuo enterramiento de la roca fuente en la zona por diferentes pulsos de cabalgamiento y diferentes procesos de erosión vinculados a *hiatus* estratigráficos debido a la alta actividad tectónica en el área. La migración es de tipo lateral y dos momentos críticos han sido identificados para las rocas del Cenomaniano al Coniaciano (Fm Luna: Grupo Villeta), uno al final del Oligoceno y el otro al final de Mioceno.

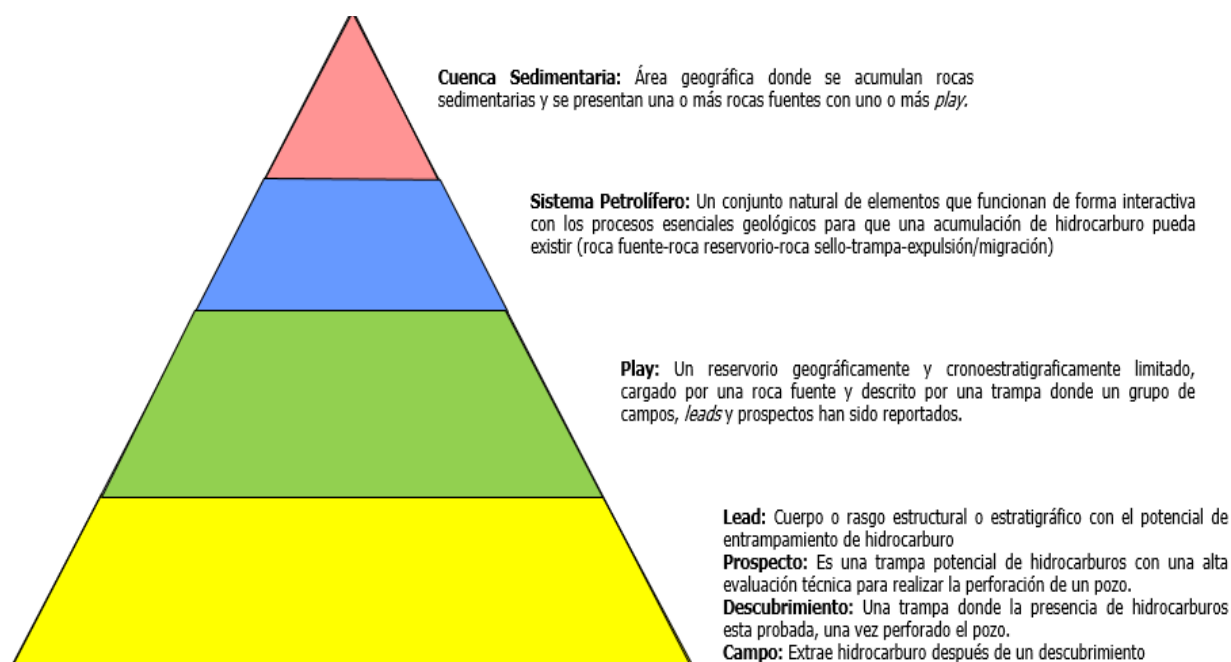
Figura 21. Elementos del sistema petrolífero de la subcuenca de Honda, sur del VMM (modificado de Moretti et al., 2010).



3.8.2 Conceptos De Evaluación De Play Fairway

Antes de entrar a la evaluación del potencial exploratorio algunos conceptos sobre la jerarquía de clasificación debe ser clarificada (cuenca – sistema petrolífero – *play* – *leads* y prospectos), en este trabajo estos conceptos son resumidos en la figura 22, siguiendo los lineamientos de Magoon y Dow (1994). Una evaluación Play Fairway (PFE: Play Fairway Evaluation por sus siglas en inglés) es una forma de evaluar el potencial exploratorio de un *play* en un área geográfica determinada a escala regional, donde básicamente los elementos del sistema petrolífero son mapeados y el riesgo es cuantificado (Seubert, 2012). La metodología fue desarrollada y publicada inicialmente por la compañía BP como parte de la evaluación exploratoria del mar del Norte, donde todos los *plays* potenciales fueron analizados en términos de riesgos relativos y limitados geográficamente por la extensión del reservorio asociado a cada *play* potencial (Grant *et al.*, 1996).

Figura 22. Diagrama y conceptos de jerarquía de clasificación cuenca-sistema petrolífero-play-campo descubrimiento-prospecto-lead (modificado de Magoon y Dow, 1994).



En principio, un mapa es una matriz en dos dimensiones donde las coordenadas x, y se asocian a una localización geográfica, mientras la z, representa un valor variable como elevación, profundidad, porosidad, etc., para un punto dado. Una vez un mapa es construido, la probabilidad de la presencia o ausencia de cualquier dato puede expresarse asignando valores de probabilidad de cero a uno, donde cero (0) no existe y uno (1) donde la presencia está confirmada, si estos valores se expanden de cero a cien, se puede hablar de porcentaje de probabilidad en forma cuantitativa.

Los datos también pueden expresarse cualitativamente como: ausente, puede o no estar y presente usualmente asociados a una escala de colores tipo semáforo (rojo, amarillo, verde) en la figura 23 modificada de Seubert (2012) se resume este análisis de valoración del dato, el cual es la base dentro de los mapas en la evaluación Play Fairway. –

Figura 23. Concepto de la forma de clasificación y su representación probabilística junto al semáforo de colores (Seubert, 2012).



El primer paso para la evaluación de Play Fairway es construir una base de datos apoyada en un sistema GIS de topografía, hidrografía, batimetría, mapa geológico, localizaciones de los pozos y campos presentes en el área de interés, así como áreas donde no se ha reportado actividad. Paralelamente, una vez determinado el sistema petrolífero en la cuenca con sus respectivos elementos, se definen los *plays* con sus límites geográficos, información con la cual se define el área de interés y se integra a la base de datos GIS (Forum, 2018).

Los elementos del sistema petrolífero son analizados con la información disponible como una tabla de resultados de los pozos, mapa de la estructura, mapas asociados al reservorio potencial, la roca fuente y el sello, un análisis del proceso de carga, entre otros, en la figura 24a modificada de Kristoffersen (2010) una síntesis de los datos claves para cada uno de los elementos del sistema petrolífero se utiliza como guía, el objetivo es determinar si cada uno de estos elementos está ausente, puede o no estar o está presente. El análisis de los resultados de los pozos se utiliza también para evaluar cada elemento y determinar las razones de fallo en una forma cualitativa como se observa en la figura 24b. Así los productos finales tienen un riesgo asociado con las regiones donde hay potencial bajo, medio o alto de reservorio, roca fuente y sello.

A

Area of Interest (AOI)
Open acreage
Cultural data

Source map
Maturity Charge Ro Quality
Slicks Seeps Temperature
Inversion timing Fetch

Top/lateral Seal
Isopach Rheology Pressure analysis
Timing

Reservoir
Facies Isopach AVO Porosity
Permeability Amplitudes Net Net/Gross
Provenance

Structure of reservoir
Tectono-stratigraphic timing Fault analysis
Velocity sensitivity

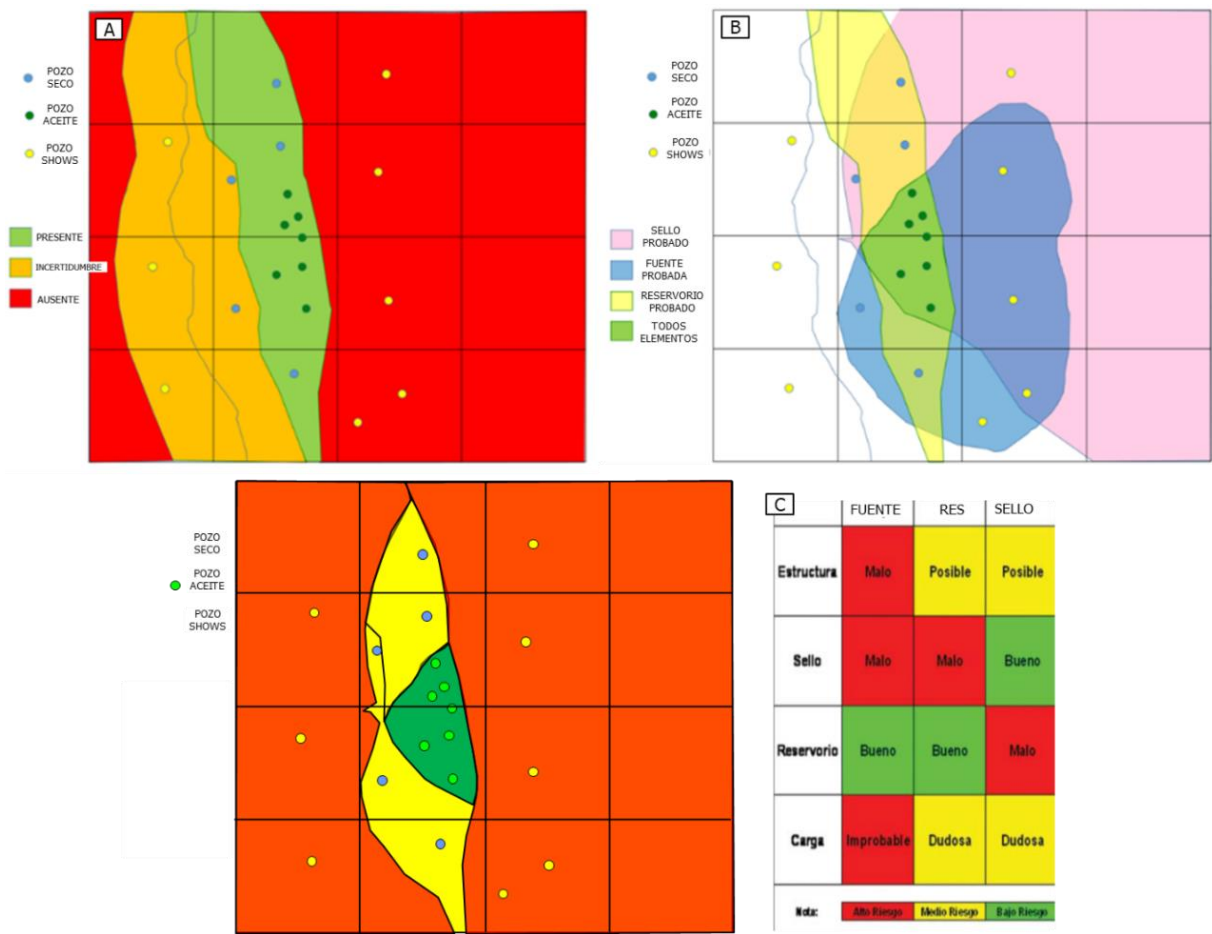
Database
Key wells well analysis Risk statistics
Field analogs Creaming curves
Future Field Size Distribution (FSD)

B

Well	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3D	n	n	n	n	n	n	y	y	n	n	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Trap	y	y	a	y	a	y	y	y	a	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
Seal	y	y	y	y	y	y	y	y	a	y	a	y	a	y	y	a	y	a	y	y
Reservoir	y	y	a	y	y	y	y	y	a	y	a	a	a	y	m	a	a	a	y	y
Source	y	m	y	y	m	y	a	m	m	m	y	m	a	y	y	y	m	m	a	a
Charge	y	a	m	y	m	y	a	y	m	m	y	a	m	y	y	y	m	m	a	a
Discovery	y			y		y		y			y			y		y				
commercial	y			y							y			y						

Con la información de los pozos y otros datos se generan mapas semáforo para cada uno de los elementos del sistema petrolífero (Figura 25a) donde se integra la localización de los pozos y los límites geográficos estipulados, al tener todos los mapas semáforo se realiza una sobreposición, a estos se le llaman mapa de segmentos de riesgo (*CCRS: Combined common risk segments*) y destaca la zona donde todos los elementos están presentes llamada *sweet pot* con una alta probabilidad de tener hidrocarburo (Figura 25b). Finalmente se realiza una matriz combinando todos los elementos con sus probabilidades de forma cualitativa (Figura 25c) y en el mapa final queda valorado el play de interés (Forum, 2018).

Figura 25. Evaluación Play Fairway. **A.** Mapa semáforo ejemplo en un reservorio. **B.** Mapa de segmentos de riesgo (CCRS: Combined common risk segments). **C.** Mapa final del play de interés con la matrix cualitativa asociada, donde hay una alta probabilidad de encontrar hidrocarburo en la zona de color verde (modificado de Forum, 2018).



4. Metodología

La base de datos obtenida para la realización de este trabajo consta de datos de superficie y datos de subsuelo. Cada set de datos se ha trabajado de manera independiente en los software Globalmapper 16, Canvas 14, SeiSee 2.13.2, 2DMove 2013.1 y DecisionSpace Geoscience 10ep 4.04 para llevarlos a una misma escala y generar los productos principales de este estudio. A nivel de licencias, se cuenta con acceso estudiantil para el caso de Globalmapper y 2DMove; la compañía Halliburton me ha facilitado la licencia de DecisionSpace Geoscience 10ep 4.04 para la realización de este trabajo de maestría.

Los datos de superficie conformados por el modelo digital de terreno (DEM 30 x30 m), mapas geológicos en diferentes escalas y datos de buzamiento fueron integrados con el objetivo de generar un mapa geológico único para el área de interés. Inicialmente, los datos se transformaron al sistema de coordenadas Colombia Bogotá Zone donde se unificaron en un mismo ambiente georreferenciado. En este primer paso se utilizaron los software Globalmapper 16, Canvas 14 y 2DMove 13.1, donde también se unificaron las escalas de colores acorde con la carta estratigráfica oficial de la IUGS (International Commission on Stratigraphy, 2018).

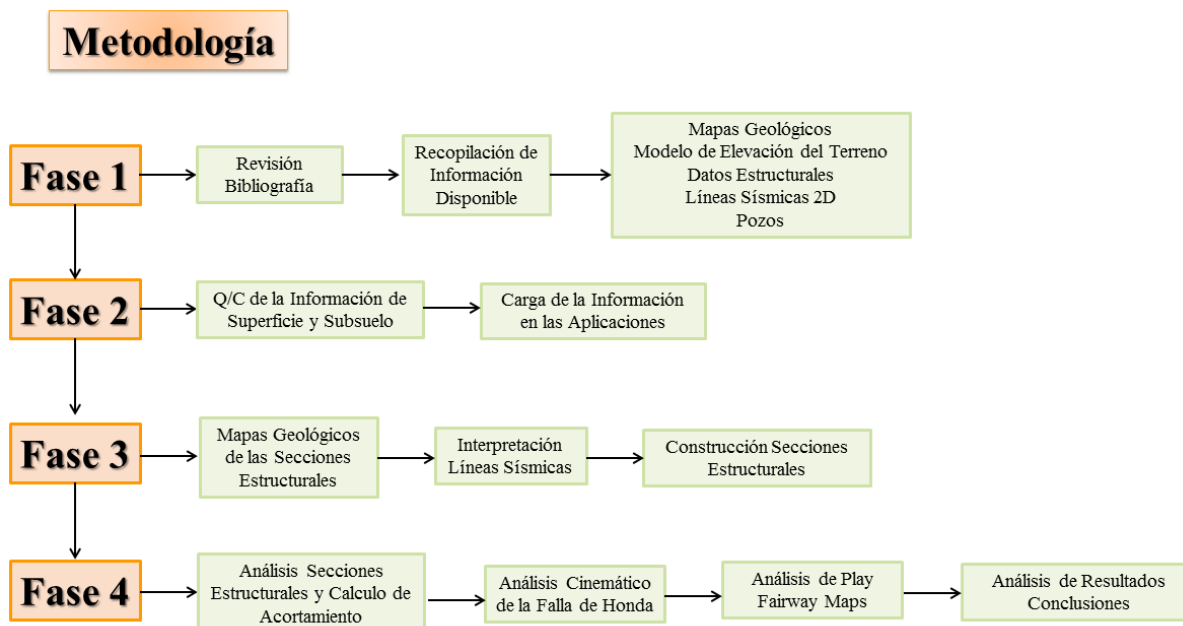
En relación a los datos de subsuelo, se utilizó una base de datos de Ecopetrol S.A. suministrada al inicio de la propuesta de este trabajo de maestría en el año 2012, la cual corresponde a siete pozos (registros y topes) perforados antes de 1991 y ocho líneas sísmicas 2D adquiridas entre los años 1983 y 1997, las cuales fueron revisadas en el software SeiSee 2.13.2. A nivel de superficie se utilizó el sistema de coordenadas Colombia Bogotá Zone y a nivel de subsuelo se utilizó un sistema de referencia vertical conocido como “Datum del Proyecto” a 1400 m.s.n.m., el cual está por encima de la máxima elevación topográfica (1340 m.s.n.m) sobre

la sección geológica y las líneas sísmicas. En este trabajo se realizaron tres secciones geológicas denominadas Sección Norte, Sección Central y Sección Sur.

Una vez definida, integrada y cargada la base de datos se procedió a la interpretación geológica de datos sísmicos teniendo en cuenta los controles geológicos de superficie e información de pozos en el dominio del tiempo. Utilizando los registros de velocidad como tablas TZ y los espesores en tiempo/profundidad se generó un modelo de velocidad para su posterior uso en la conversión a profundidad.

Posteriormente, la interpretación sísmica es nuevamente ajustada a los puntos de control en superficie y convertida a profundidad. La sección en profundidad es restituida al estado no deformado por medio de técnicas de restauración denominado retrodeformación, así se generó una sección base para un mejor control del análisis cinemático de la falla. En línea con el objetivo del análisis de la geometría y cinemática de la Falla de Honda se realizaron una serie de diagramas y análisis gráficos, para definir rumbo/orientación del plano de la falla, segmentación de la falla y definir el vector de deslizamiento.

Finalmente, utilizando la herramienta de *Play Fairway Map* para toda la zona cubierta por la Falla de Honda se generaron una serie de mapas y tablas de probabilidad en cada uno de los elementos del sistema petrolífero para evaluar el potencial exploratorio. En la figura 26 se encuentra un resumen visual de la metodología implementada.

Figura 26. Diagrama de la metodología usada en este trabajo de investigación.

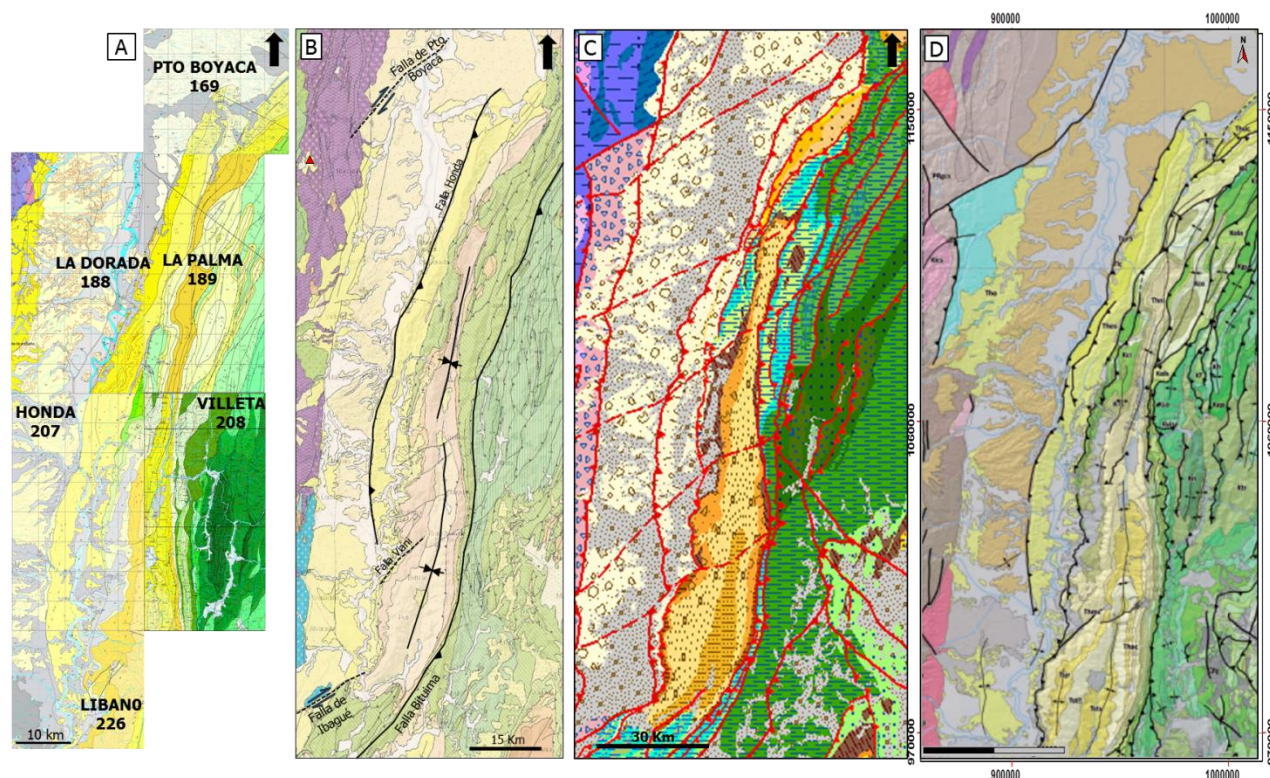
4.1 Datos Disponibles

Para el sur del VMM en donde se desarrolla este trabajo se contó con una base de datos descargada de internet de uso libre del SCG y el portal de la ANH, otros datos fueron proporcionados por Ecopetrol S.A.

▪ Acondicionamiento de la información de superficie:

La información geológica corresponde a mapas escala 1:100.000 de la base de datos del SCG, mapa geológico escala 1:250.000 presentado por Caballero *et al.* (2013) y el mapa geológico regional de Ariadna (2009). Posteriormente se procedió a la carga y unificación del mapa geológico escala 1:250.000 en el software Globalmapper 16 y se proyectó en el modelo de elevación del terreno (DEM 30x30 m) descargado de la NASA (2007). En la figura 27 se encuentra la base de datos de mapas geológicos utilizada.

Figura 27. Base de datos mapas geológicos. **A.** Mapas y planchas geológicas escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano. **B.** Mapa geológico escala 1:250.000 del portal web Servicio Geológico Colombiano. **C.** Mapa regional Ariadna escala 1:250.000. **D.** Mapa final integrando DEM y mapa geológico final escala 1:250.000.



Adicionalmente en el software 2DMove 2013.2 se cargaron los datos estructurales encontrados en mapas y fuentes bibliográficas, resumidos en la Tabla 3 y en la Figura 28.

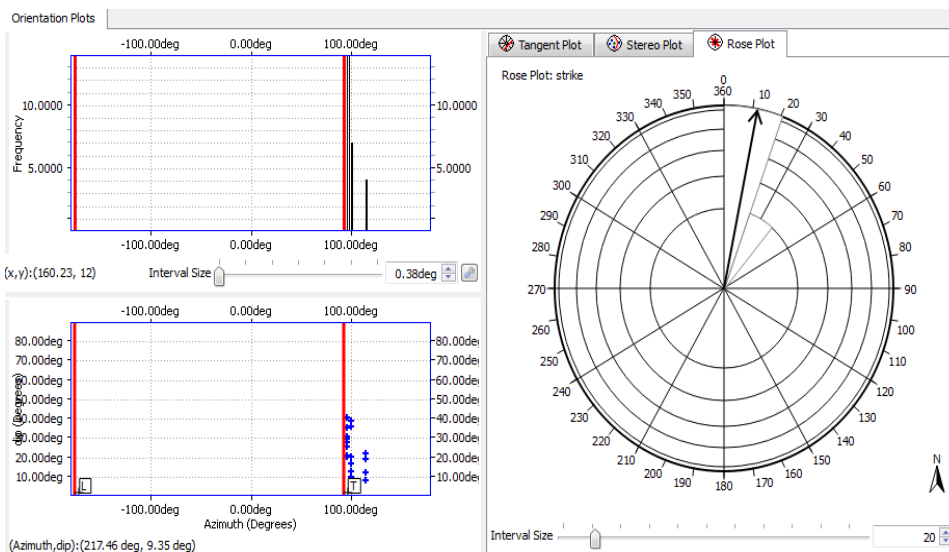
▪ Acondicionamiento de información de subsuelo:

Para realizar las tres secciones estructurales en la Falla de Honda se contó con una base inicial de 50 líneas sísmicas 2D públicas, la localización geográfica de la información sísmica y de pozos se encuentra referenciada en la figura 29. a las cuales se les hizo un control de calidad en el software SeiSee 2.13.2 (2015) y se eligieron las ocho líneas sísmicas 2D referenciadas en la Tabla 4.

Figura 28. Modelo digital de terreno en la zona de la Falla de Honda con la localización de los buzamientos reportados, así como el diagrama de rosas donde hay una marcada orientación N10E. En azul Sección Norte, en verde Sección Central y en rojo Sección Sur.

Tabla 3. Datos de buzamientos en unidades aflorantes en cercanías a la Falla de Honda.

ID	X	Y	Rumbo	Buzamiento	ID	X	Y	Rumbo	Buzamiento
1	956249	1132610	32	37	36	949450	1118717	14	20
2	957670	1132943	14	15	37	950056	1116690	16	20
3	957301	1132049	10	15	38	947795	1114266	14	20
4	958687	1132470	349	20	39	948471	1112681	35	30
5	959214	1131522	344	15	40	952247	1116503	12	25
6	959371	1130680	340	18	41	944374	1109227	10	35
7	956459	1130926	355	15	42	945137	1108980	24	30
8	957863	1129663	357	20	43	945162	1108212	7	40
9	956600	1129750	2	10	44	945538	1108051	9	40
10	957301	1127522	345	25	45	947591	1108226	2	30
11	955810	1130908	356	18	46	946450	1107273	10	20
12	955372	1130838	356	25	47	946692	1106669	8	20
13	954705	1130610	337	12	48	949805	1108266	2	20
14	955986	1129294	4	15	49	950127	1107756	6	30
15	954284	1128171	2	15	50	940825	1095990	24	20
16	954529	1127645	11	20	51	942808	1094912	4	40
17	955354	1127171	4	16	52	942886	1092773	30	40
18	955757	1127540	2	20	53	942527	1091820	34	45
19	954582	1126470	0	25	54	943261	1095912	23	36
20	952810	1126364	4	25	55	933617	1081017	51	12
21	953828	1126347	2	20	56	936578	1079134	14	16
22	955582	1125470	2	30	57	935605	1076786	22	20
23	956336	1126119	2	25	58	930571	1077231	21	12
24	958950	1126400	354	25	59	929492	1072598	12	15
25	958792	1157900	352	28	60	927990	1067330	26	30
26	958161	1124715	8	35	61	929026	1066632	44	30
27	954336	1122575	48	30	62	923230	1057155	14	22
28	958143	1126277	40	40	63	923383	1050137	2	8
29	955424	1120347	7	40	64	923928	1051250	8	12
30	955424	1124382	34	35	65	922568	1034755	2	20
31	949775	1121698	25	30					
32	949494	1120470	23	35					
33	951214	1120470	15	15					
34	952494	1122663	6	35					
35	950779	1118974	13	20					



Los pozos exploratorios y estratigráficos perforados en el sur del VMM, se encuentran referenciados en la Tabla 1 del capítulo 4; para este trabajo se contó con la información completa de registros eléctricos e información de velocidad de siete pozos (Tabla 5). Para el desarrollo de la metodología implementada en este trabajo de investigación se mostrara sistemáticamente la construcción de la Sección Estructural Norte.

Figura 29. Mapa de localización geográfica de las tres secciones estructurales (Líneas azules) con las líneas sísmicas 2D (Líneas amarillas) reportadas en la página web de la ANH con las líneas sísmicas 2D facilitadas por ECOPETROL (líneas rojas) y los pozos utilizados en la evaluación de la Falla de Honda.

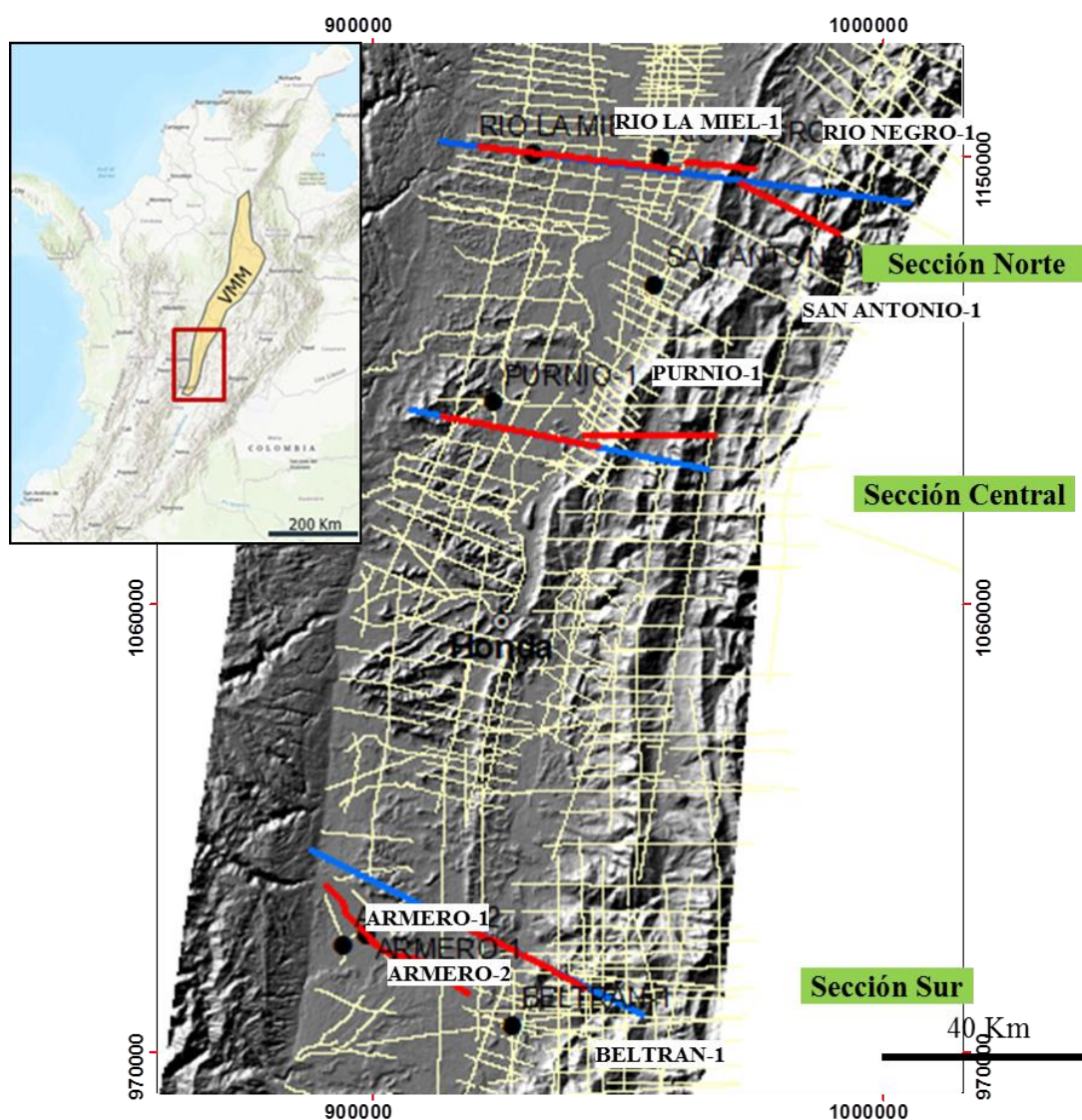


Tabla 4. Líneas sísmicas disponibles en el área de trabajo.

SECCION	SURVEY	LINEAS SISMICAS AREA DE ESTUDIO	LONGITUD (mts)
NORTE	COCORNA SUR-85	DC-1985-1825	120937.7
	BOCACHICO-97	HCBO-1997-11	9958.9
	PUERTO BOYACA-95	TPB-1995-28	10372.5
CENTRO	COCORNA SUR-85	DC-1985-1270	159784
	BOCACHICO-97	HCBO-1997-06	34545.4
	ARMERO-83	AV-1983-15	10399
SUR	SANTUARIO-86	NSS-1986-02	12337.3
	LAGUNILLAS-92	AL-1992-102	17108.3

Tabla 5. Pozos con información de registros disponibles en el área de trabajo.

POZOS	AÑO	TOTA DEPTH (Feet)	GR	RES	RHO	CHCK
RIO LA MIEL-1	1990	3616	X	X	X	X
RIO NEGRO-5	1986	9350	X	X	X	X
SAN ANTONIO-1	1969	9595	X	X	X	X
PURNIO-1	1990	4950	X	X	X	X
ARMERO-1	1983	3481	X	X	X	X
ARMERO-2	1988	1953	X	X	X	X
BELTRAN-1	1980	12520	X	X	X	X

4.2 Interpretación Geológica de Datos Sísmicos

El flujo de trabajo para la interpretación geológica de datos de líneas sísmicas 2D se realizó a través de horizontes y fallas, una vez cargada toda la base de datos en los software 2DMove 2013.1 (Figura 30) y DecisionSpace Geoscience 10ep 4.04 se procedió a realizar el control de calidad y la integración de los datos con los siguientes pasos:

1. Carga de pozos con sus respectivos topes, verificación en superficie de la coordenada y proyección ortogonal en la sección estructural de interés.

2. Generación de tablas TZ en los pozos, preámbulo a la conversión tiempo – profundidad utilizando diferentes gráficos de Excel.
3. Carga de líneas sísmicas con su respectivo balanceo para llevar la sísmica al mismo nivel
4. Generación de un perfil de litología con un extracto de la línea sísmica para amarrar los topes del pozo con eventos geológicos para proceder a la interpretación de los datos sísmicos. En el bloque yacente se utilizó el pozo Rio La Miel-1 (Figura 30c: Figura 31a) y para el bloque colgante el pozo San Antonio-1 (Figura 31b). Anotación: El sismograma sintético es el procedimiento ideal, sin embargo, no se contaba con registro sísmico en ningún pozo.
5. Para efectos de la interpretación sísmica se han agrupado las secuencias de interés bajo períodos de tiempo iguales entre el bloque yacente y colgante de la Falla de Honda con los siguientes horizontes entre secuencias (Figura 30d):

BLOQUE YACENTE

- Tope Basamento
- Tope Cretácico
- Tope Formación Mugrosa
- Tope Formación Colorado
- Tope Grupo Honda
- Tope Formación Mesa

BLOQUE COLGANTE

- Tope Basamento
- Tope Cretácico Basal (Formación Murca)
- Tope Grupo Villeta
- Tope Formación Hoyon/San Juan de Rio Seco
- Tope Formación Santa Teresa
- Tope del Grupo Honda

FALLAS

- Falla de Honda (Bloque Yacente y Colgante)
- Sistema de Fallas de Cambao (Bloque Colgante)
- Sistemas de Fallas de Bituima (Bloque Colgante)
- Otras fallas

6. Verificación de los datos interpretados en tiempo y control de calidad con los topes de las unidades en las líneas sísmicas, considerando la proyección de los datos de pozos que puede llegar a 3 km y la imagen sísmica.

Figura 30. Carga de datos Software 2DMove 2013.1 **A.** Vista de planta de la Sección Norte, integrado el mapa geológico, DEM, datos estructurales y los pozos Rio La Miel-1, Rio Negro-5 y el pozo San Antonio-1 proyectado 800 m al NW. **B.** Vista en corte de la Sección Norte con los pozos y líneas sísmicas balanceadas al Datum Sísmico 1400 msnm. **C.** Unión eventos de pozo y datos de sísmica 2D. Registro GR (azul), RES (rojo), TZ (amarillo y Tabla Excel) del pozo Rio la Miel-1 con una sección sísmica de la línea DC-1985-1825 y los eventos sísmicos asociados. Nótese la fuerte impedancia entre el basamento y las rocas del Cenozoico. **D.** Horizontes sísmicos interpretados en la Sección Norte.

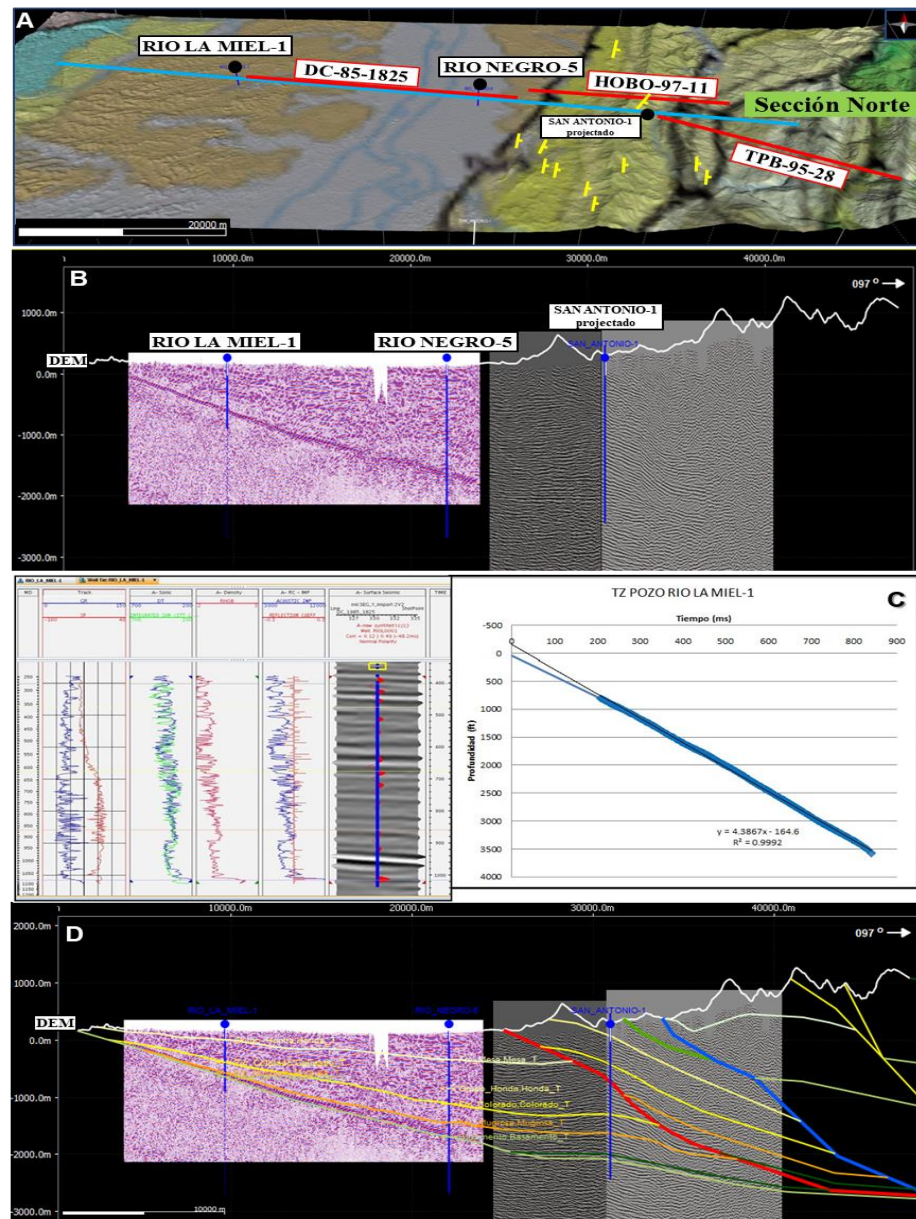
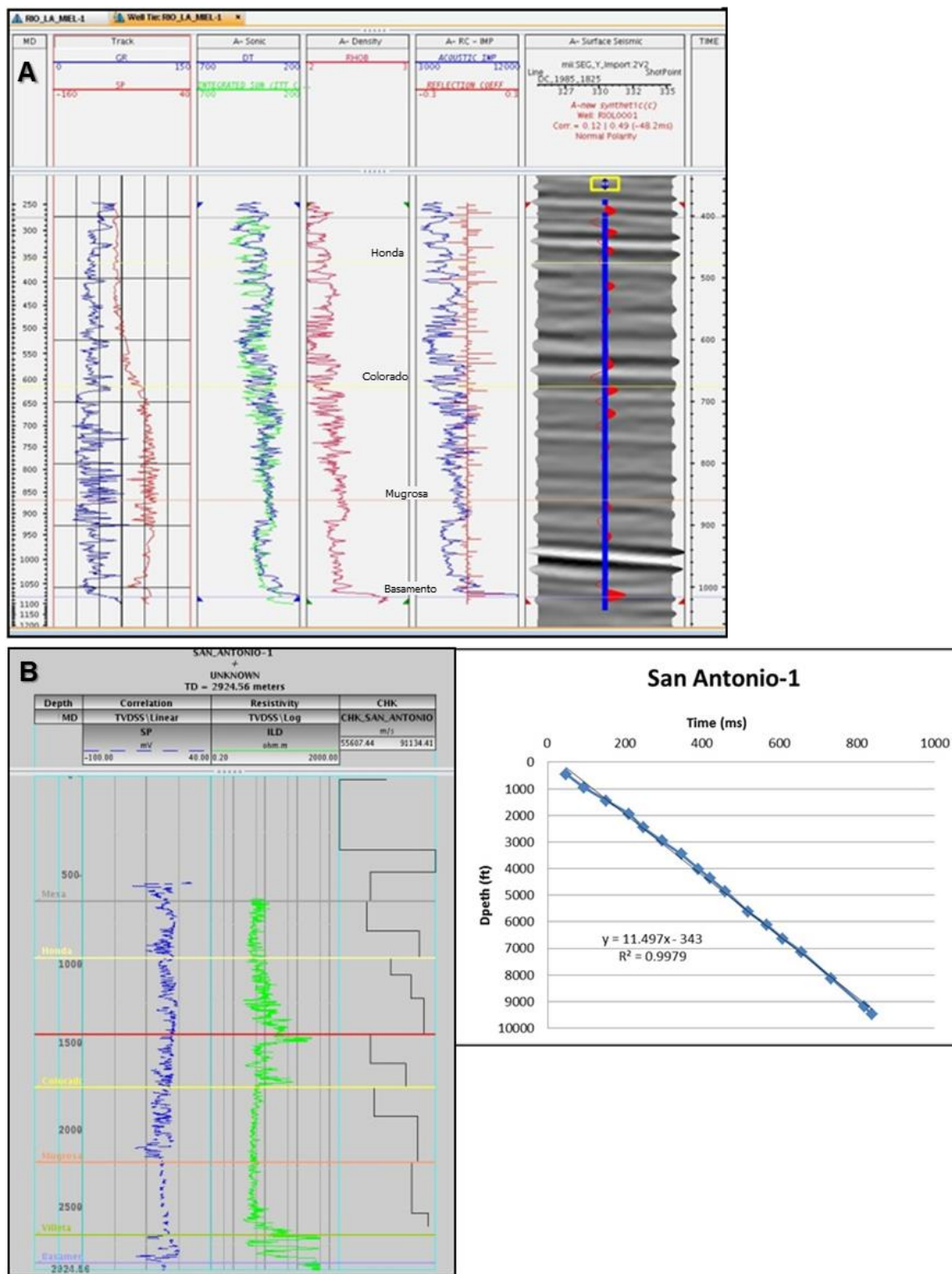
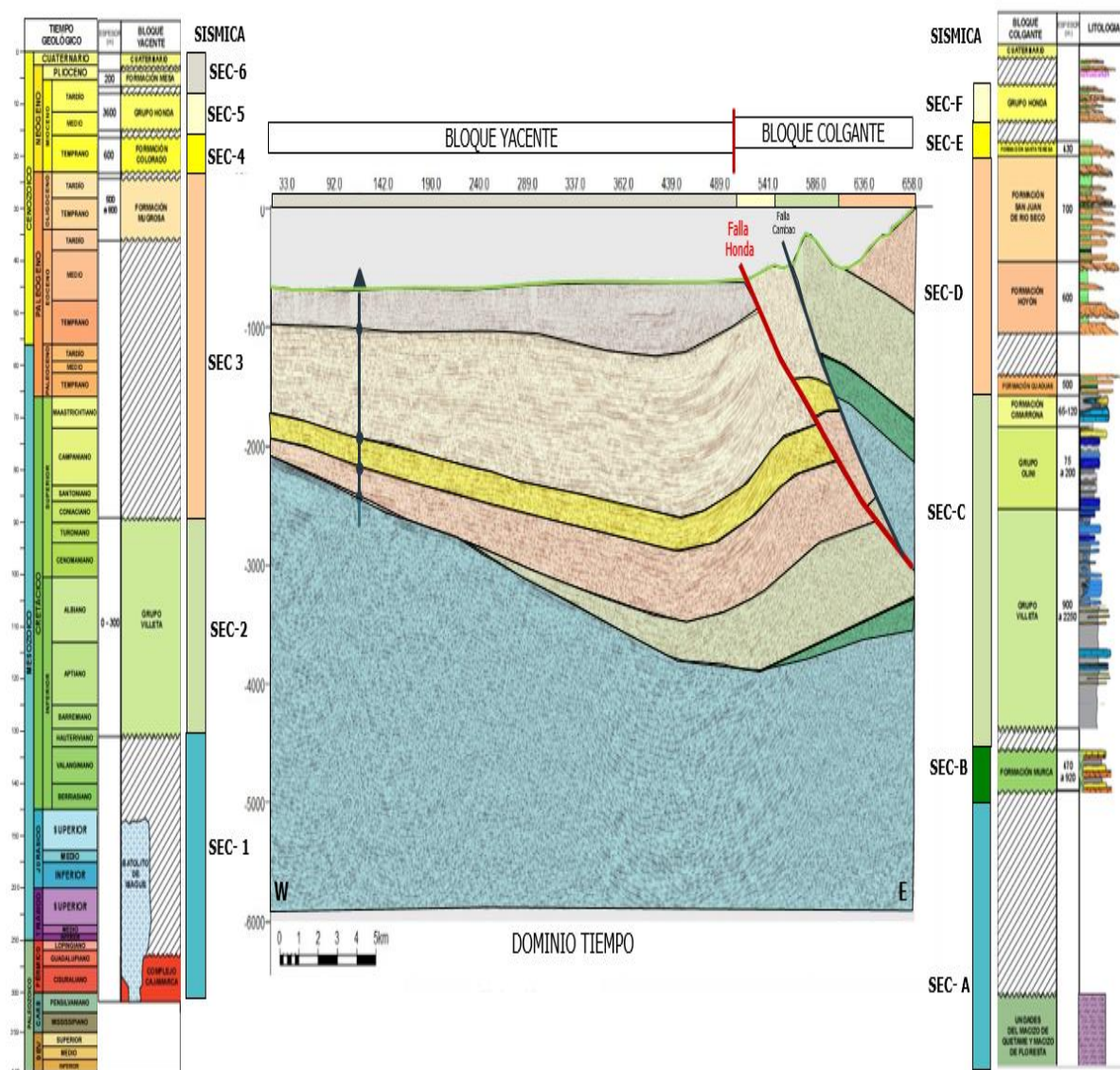


Figura 31. Registros de pozos. **A.** Rio La Miel-1 GR (azul) ILD (rojo) CHECKSHOT (amarillo y Excel) perfil de la línea sísmica. **B.** San Antonio-1 GR (azul) ILD (rojo) y CHECKSHOT (amarillo y Excel).



Para efectos de la interpretación sísmica y las secciones estructurales, se han agrupado las secuencias sísmicas de interés bajo períodos de tiempo iguales entre el bloque yacente y colgante de la Falla de Honda, los cuales serán descritos a continuación y se resumen en la figura 32. Esta clasificación está basada en la historia tectonoestratigráfica del área.

Figura 32. Línea sísmica TP-95-1402 con un resumen de las secuencias sísmicas 1 – 6 del bloque yacente y A – F en el bloque colgante de la Falla de Honda elegidas para el trabajo de interpretación geológica del presente trabajo.



Bloque Yacente de la Falla de Honda**Secuencia 1 – Base Línea Sísmica al Tope Basamento**

El tope del basamento está representado por un fuerte reflector sísmico debido a la presencia de una fuerte discordancia, en pozos se ha registrado la presencia del Batolito de Ibagué y rocas metamórficas del Grupo Cajamarca.

Secuencia 2 – Tope Basamento al Tope Cretácico

En la zona por debajo del cabalgamiento del SFM algunos pozos han reportado la presencia del Grupo Villeta, en las líneas sísmicas esta secuencia está representada por un paquete de reflectores acunándose en relación *onlap* hacia el oeste contra el tope del basamento. El tope Cretácico puede identificarse con un reflector sísmico debido al cambio en la litología y la presencia de una discordancia.

Secuencia 3 – Tope Cretácico al Tope Formación Mugrosa

Corresponde a una serie de reflectores sísmicos continuos con tendencia homoclinal hacia el este, los cuales se estrellan con la Falla de Honda. La base está asociada a la discordancia con el tope del basamento o el tope del Cretácico. Esta secuencia representa la acumulación entre el Eoceno Superior y el Oligoceno.

Secuencia 4 – Tope Formación Mugrosa al Tope Formación Colorado

La base y tope de esta secuencia están definidas por la información de pozos, representa la acumulación de material durante el Mioceno Temprano. La secuencia se caracteriza por reflectores continuos con tendencia homoclinal, los cuales terminan en la Falla de Honda.

Secuencia 5 - Tope Formación Colorado al Tope Formación Honda

Asociado a una serie de reflectores sísmicos discontinuos a caóticos en algunos sectores, los cuales terminan en la Falla de Honda. Representa la acumulación del Mioceno.

Secuencia 6 – Tope Formación Honda al Tope Formación Mesa

La Formación Mesa se encuentra aflorando en esta zona del bloque yacente de la Falla de Honda, a su vez este rasgo estructural limita su presencia al este. Es una secuencia delgada, la cual representa la acumulación del Plioceno.

Bloque Colgante de la Falla de Honda**Secuencia A – Base Línea Sísmica al Tope Basamento**

En el área de estudio no hay afloramientos cercanos o registro en pozos sobre el basamento presente en la Cordillera Oriental. Sin embargo, debido al objetivo de este trabajo es necesario anotar una referencia sobre el basamento para el bloque colgante en la Falla de Honda, el término unidades del Macizo de Quetame y Floresta se utilizó para hacer referencia al basamento conformado por las unidades paleozoicas registradas a lo largo de la faja occidental de la Cordillera Oriental.

El tope de Basamento hace énfasis en el tope de estas unidades asociadas a una discordancia, las características sísmicas de esta secuencia son caóticas con alto ruido, donde su definición no es clara en las líneas sísmicas. Por lo tanto, se realizó un control de espesores de las unidades cretácicas aflorantes para determinarlo (Fm Murca: 410 m + Grupo Villeta: 900 m).

Secuencia B – Tope Basamento al Tope Cretácico Basal (Formación Murca)

En el bloque colgante los procesos tectónicos fueron diferentes en el Cretácico Inferior, la presencia de la Formación Murca al este de la falla de Bituima con un espesor de 410 m, es la guía para incluirla en las secciones estructurales y es importante considerarla en la geometría de las fallas, así como un posible nivel de despegue, por estas razones se incluyó como una secuencia independiente. La imagen sísmica permite observar algunos reflectores sísmicos

continuos aislados, sin embargo la imagen en general es caótica, su estimación se realizó por un control de espesores de las unidades cretácicas aflorantes.

Secuencia C – Tope Cretácico Basal al Tope Formación Guaduas

Debido al control de afloramientos y datos estructurales en superficie se determina el tope de la secuencia en el tope de la Formación Guaduas. La base de la secuencia está determinado por los espesores de las diferentes unidades estratigráficas: 900 m para el Grupo Villeta, 75 m para el Grupo Olini y 65 m para la Formación Cimarrona. En esta secuencia, algunos reflectores sísmicos pueden seguirse, sin embargo la imagen en general es caótica. Esta secuencia representa la depositación durante el Cretácico Superior.

Secuencia D – Tope Formación Guaduas al Tope Formación San Juan de Rio Seco

Los límites fueron definidos por los afloramientos y los datos estructurales, los reflectores sísmicos tienen una mejor continuidad, terminan con buzamientos fuertes hacia el este, chocándose con las fallas de Cambao y Bituima. Esta secuencia representa la depositación durante el Eoceno a Oligoceno.

Secuencia E – Tope Formación San Juan de Rio Seco a Formación Santa Teresa

Los límites fueron definidos por los afloramientos y los datos estructurales. Esta secuencia presenta unos reflectores sísmicos continuos. Esta secuencia representa la depositación durante el Mioceno Temprano.

Secuencia F – Tope Formación Santa Teresa al Tope del Grupo Honda

Los límites fueron definidos por los afloramientos y los datos estructurales. El intervalo sísmico presenta diferentes reflectores continuos con algunas truncaciones entre ellos, los reflectores terminan hacia el este abruptamente contra las fallas de Cambras y Bituima. Esta secuencia representa la depositación durante el Mioceno Medio a Superior.

4.4 Conversión A Profundidad

El método *Layer Cake* basado en los polígonos en tiempo de las secuencias sísmicas interpretadas en las secciones estructurales se utilizara para la conversión de tiempo a profundidad en el programa 2D Move, el objetivo final es tener en escala 1:1 la Falla de Honda para realizar un buen control geométrico.

Este proceso tiene dos pasos, el primero definir las velocidades intervalicas de las secuencias sísmicas partiendo de las velocidades de los pozos y el segundo, la metodología en el programa 2D Move para la conversión a profundidad.

- **Definición de Velocidades Interválicas en las secuencias sísmicas:**

A partir de las tablas TZ de los pozos San Antonio-1 y Beltran-1 en el bloque colgante de la Falla de Honda y los pozos Rio La Miel-1, Armero-1, Purnio-1, Armero-2 y Rio Negro-5 en el bloque yacente de la Falla de Honda se definieron las velocidades intervalicas para usar en las secuencias sísmicas.

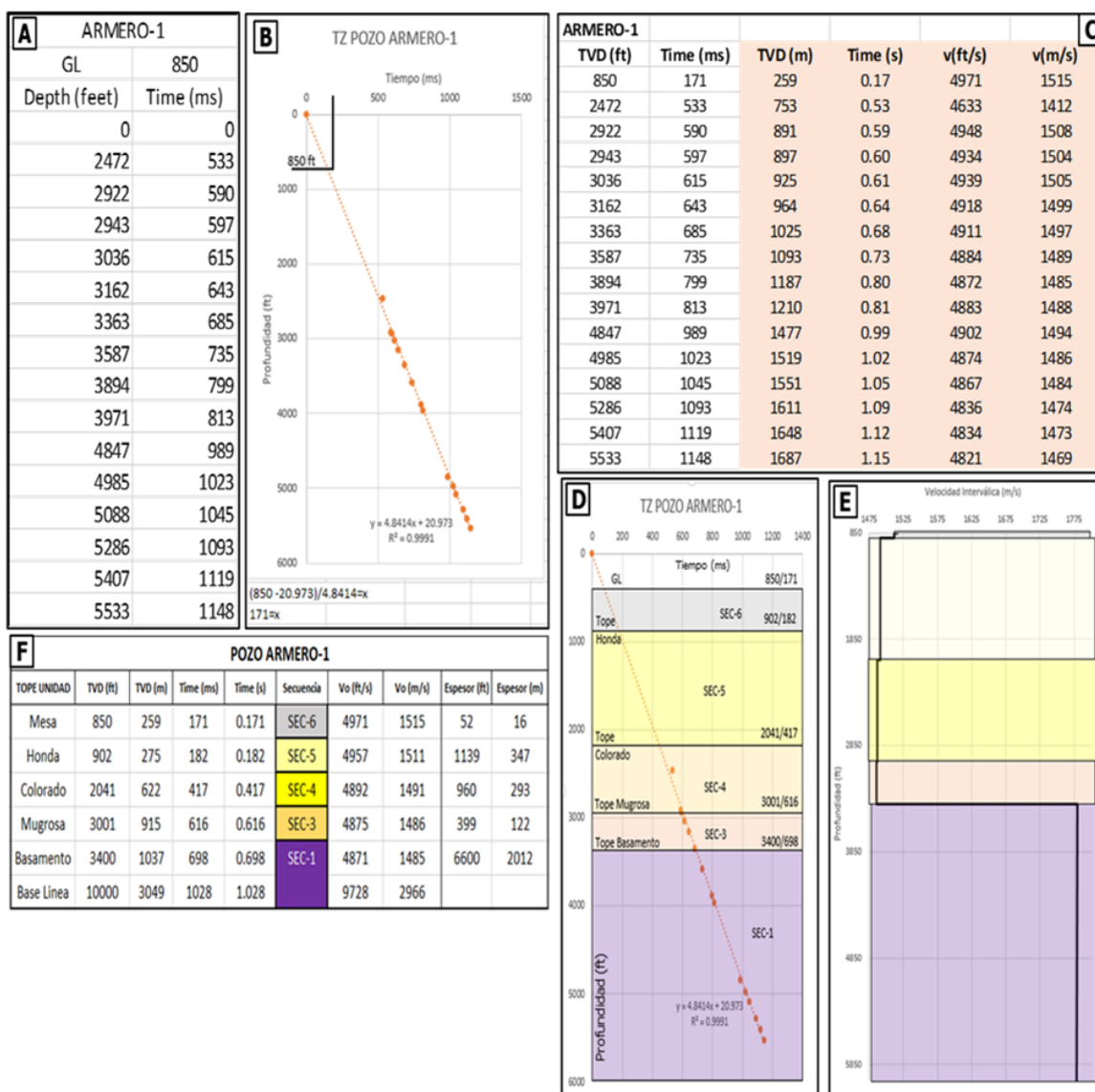
A continuación se describe la metodología para obtener las velocidades interválicas, utilizando como ejemplo el pozo Armero-1 (Figura 33):

- Para llegar a las TZ de los pozos, inicialmente se verifico la calidad de la información en los archivos de *checkshots* de los pozos disponibles; en algunos casos corresponde a un Excel con toda la información asociada a la adquisición del registro de velocidad con información de coordenadas, RT, GL, Datum sísmico, velocidad de reemplazamiento, posición de la fuente, datos del muestreo, velocidad promedio, velocidad interválica, etc. En otros casos solo se tenía un archivo Excel con dos columnas, una asociada al tiempo (OWT o TWT) y otra en profundidad (MD: *Mesure Depth*).

- Generar la tabla Tiempo (ms) – Profundidad (ft) en Excel considerando el GL y la topografía, si es necesario realizar una corrección al Datum (Figura 33a).
- En una gráfica de dispersión de datos partiendo de cero se pone en la abscisa X: variable tiempo (ms) y en la abscisa Y: variable profundidad (ft). Debido a los efectos de compactación en la secuencia siliciclástica las variables deben asociarse a una ecuación lineal con una correlación (R) superior a 0.75 como control de calidad. El primer punto de dato real equivale al GL en profundidad y tiempo (Figura 33b).
- Utilizando la ecuación $v \text{ (velocidad)} = x \text{ (profundidad)} / t \text{ (tiempo sencillo)}$ se calculan las velocidades para cada punto de la tabla TZ original. La velocidad se expresa en ft/s y m/s, la profundidad en ft y m, el tiempo debe ser OWT (*One Way Time*) en segundos (s).
- Estos datos se exponen y calcula en una tabla Excel con todas las unidades para control de calidad (Figura 33c).
- En la gráfica tiempo vs profundidad previamente creada se agregan las secuencias y los topes de las unidades en tiempo (ms) y profundidad (ft) como control de calidad para mirar anomalías de puntos en las secuencias (Figura 33d).
- Gráfica de la velocidad intervalica (m/s) vs la profundidad (ft) donde se incluyen las secuencias de acuerdo a los topes (línea negra gruesa) y se determina la velocidad intervállica promedio para cada secuencia (Figura 33e).
- En una tabla final (Figura 33f) se definen por topes de unidades, los espesores en profundidad (ft/m) y velocidad intervalica promedio (ft/s – m/s) en las secuencias sísmicas.

Este flujo de trabajo se implementó para los diferentes pozos en los bloques yacente y colgante de la Falla de Honda.

Figura 33. Definición de Velocidades Interválicas pozo Armero-1 para conversión tiempo a profundidad. **A.** Tabla TZ al GL. **B.** Gráfica T vs Z con ecuación linear y el factor de correlación 0.99 **C.** Tabla valores de velocidad. **D.** Gráfico T vs Z con las secuencias sísmicas y los topes en tiempo y profundidad. **E.** Gráfico de velocidad interválica. **F** Tabla final con los valores de velocidad interválica para cada secuencia en el pozo.



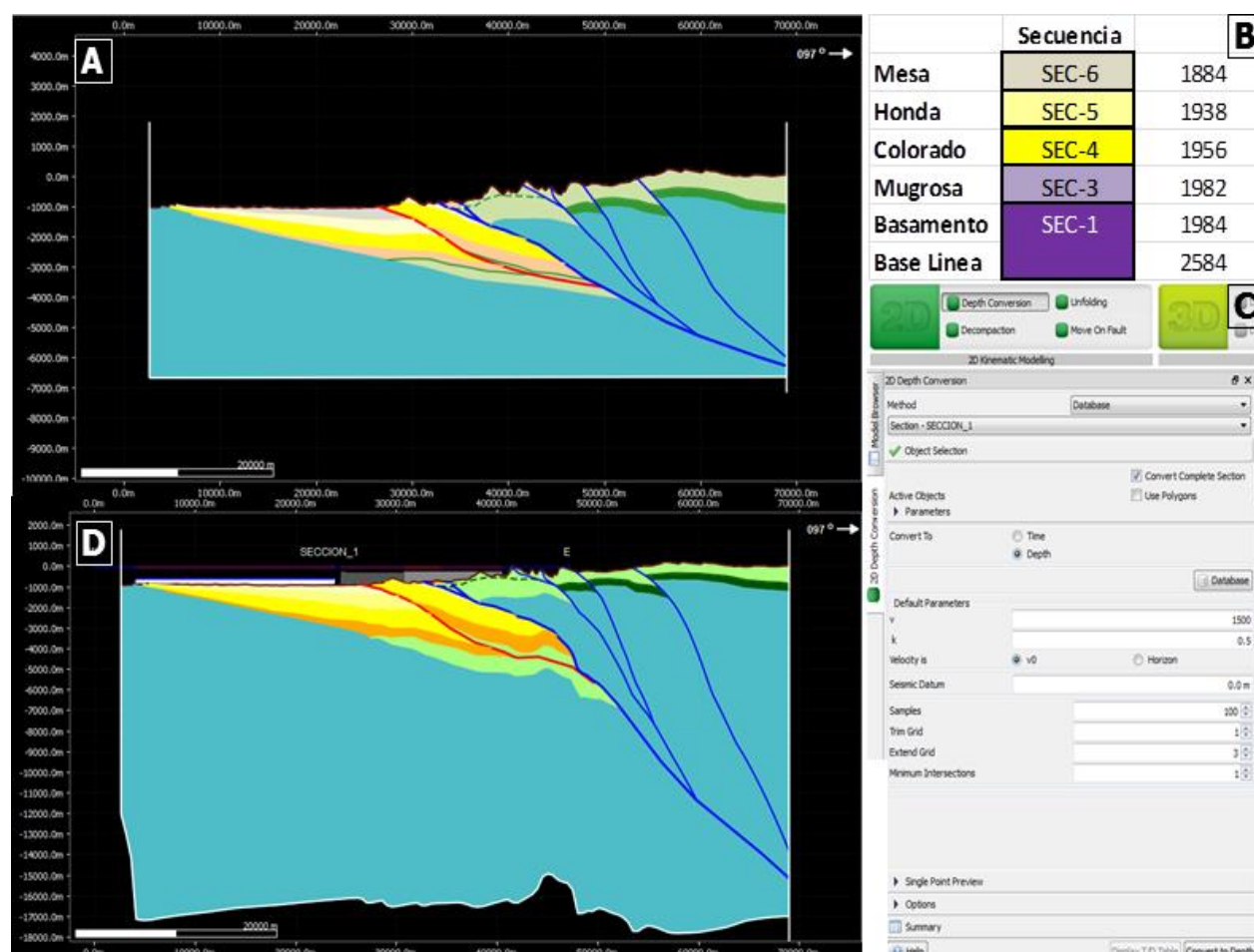
- **Metodología Conversión a Profundidad en 2D Move:**

La conversión a profundidad de las secciones estructurales en el software 2D Move partió de las velocidades interválicas calculadas a partir de los pozos para cada secuencia sísmica. A continuación se describirá la metodología utilizando como ejemplo la Sección Norte (figura 34). Este flujo de trabajo se implementó para las tres secciones Norte, Central y Sur.

- El primer paso es determinar los límites de la conversión, para esto se definen los postes en los límites laterales, así como la base y el tope en las secciones, en la zona entre el tope y el perfil topográfico se utilizara la velocidad de reemplazamiento o la velocidad del aire, si es necesario en la conversión.
- Se generaron polígonos para todas las secuencias sísmicas de la Sección Norte en el dominio del tiempo, partiendo de los límites dados por los horizontes, el perfil topográfico, los postes y la base (Figura 34a). Una alta interacción con Zoom In y Zoom Out junto a la herramienta *Tidy* en el software 2D Move fue implementada para controlar los bordes de los polígonos.
- En la columna estratigráfica del programa se asignaron las velocidades intervalicas de cada secuencia sísmica determinada en el trabajo previo (Figura 34b).
- En el módulo *Depth Conversion* de la aplicación 2D Move, se seleccionó el método *Database*, este método toma los datos incluidos a mano de la columna estratigráfica para cada secuencia sísmica. A continuación el *Object Selection* se realizó habilitando la opción de *Convert Complete Section*. Luego en el tabla de *Parameters* se habilito la opción en *Conver To Depth* y se seleccionó el tab *Convert to Depth* (Figura 34c).
- Al final se obtiene la Sección Norte convertida a profundidad (Figura 34d) y se verifica que todos los objetos se encuentren en el dominio de la profundidad. Las líneas sísmicas

se deforman como parte de la metodología de conversión a profundidad, en estas zonas debajo del área de cabalgamiento es normal observar una zona de *pull-up* generando un falso cierre en cuatro dimensiones o en tres direcciones. Adicionalmente, no deben presentarse picos o anomalías en la forma de los objetos.

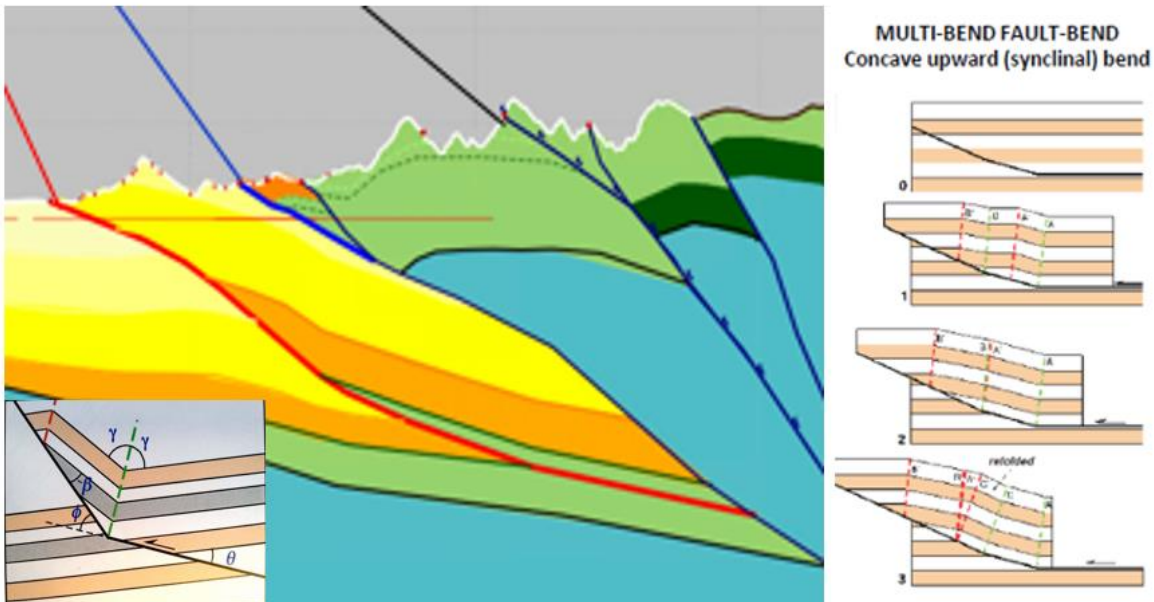
Figura 34. Conversión a profundidad en el software 2DMove de la sección norte a partir de las velocidades interválicas. **A.** Sección norte con polígonos en tiempo. **B.** Tabla de velocidades interválicas para cada sección sísmica. **C.** Módulo Depth Convert en el software 2DMove. **D.** Sección norte convertida a profundidad.



4.5 Retrodeformación de las Secciones Estructurales

La geometría del plano de la Falla de Honda corresponde a un despegue (*detachment*) donde la superficie de bajo ángulo separa al bloque colgante de un bloque yacente no deformado, a nivel de clasificación por su orientación del desplazamiento es una falla inversa y en función al buzamiento del plano de la falla inferior a 45° corresponde a una falla de bajo ángulo (Figura 35a). La falla está asociada a un pliegue de flexión de tipo *multi bend fault bend concave upward* (*syncline*) bend (Shaw, 2005) estos rasgos están resumidos en la Figura 35b.

Figura 35. Elementos geométricos de la Falla de Honda. **A.** Sección Norte escala 1:1 con los datos de ángulo de corte (Θ), el cambio en el buzamiento de la falla (Φ), el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) y el ángulo interlimbo (γ). **B.** De acuerdo a la clasificación de pliegues asociados a flexión de falla, la Falla de Honda tiene un sinclinal asociado y se clasifica como un multi pliegue de flexión de falla, en esta figura se ilustra la cinemática para su formación.



A partir de las secciones estructurales convertidas a profundidad y haciendo control de calidad con el DEM, el mapa geológico y el amarre de los horizontes con los topes se procede a realizar la retrodeformación de las secciones específicamente para la Falla de Honda.

- A. Establecer el pin regional, los niveles de despegue, conservación de espesores en el bloque yacente y colgante. Estilo estructural y tipo de pliegues y fallas para definir el algoritmo mejor adaptado a la geometría de la falla, en este caso es *2D Move on Fault* con el método *Fault Parallel Flow*.
- B. En escala 1:1 se posiciona la sección original con la sección retrodeformada para establecer los parámetros del cálculo de acortamiento; lo: longitud inicial previa a la compresión y lf: longitud después de la compresión.
- C. Cálculo del acortamiento para cada sección y comparación con los datos bibliográficos.

4.6 Geometría de Falla de Honda

En este trabajo la Falla de Honda a nivel regional tiene una extensión de 103 Km, los datos iniciales sobre su geometría provienen de las secciones sísmicas donde puede interpretarse en las tres secciones estructurales en escala 1:1. Los datos corresponden al ángulo de corte de la falla, la orientación y dirección del plano de falla, en la Figura 34a se describen los elementos medidos para la Sección Norte. Adicionalmente se tiene el diagrama de rosas de los valores de buzamiento de las capas en el bloque colgante de la Falla de Honda con una dirección N10E.

Las fallas son reconocidas por causar discontinuidades en los trazos de los horizontes sobre mapas, las secciones estructurales y las secuencias estratigráficas. La yuxtaposición de diferentes litologías a lo largo de una falla puede ser representada en los perfiles topográficos debido a que las rocas no responden de la misma forma a la erosión y meteorización, formando

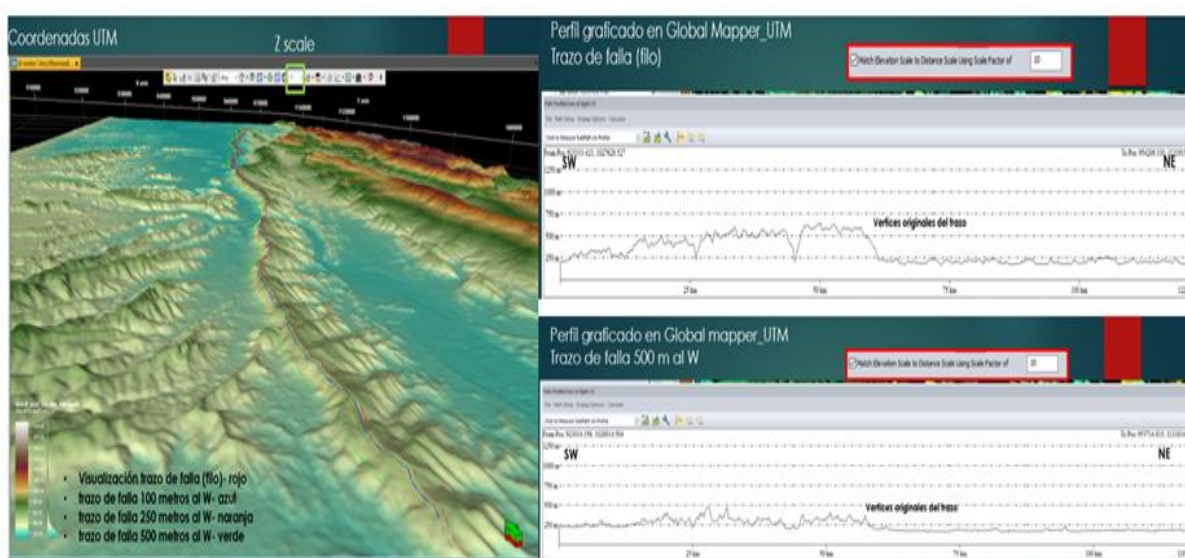
valles o altos a lo largo de la falla. El trazo de la falla, el ancho y la inclinación se utilizan a menudo para definir la geometría de falla a través del vector de deslizamiento (*slip*), así como su orientación, magnitud y sentido. Para determinar el *slip* de la falla en un mapa de contornos usualmente se correlacionan puntos en el bloque yacente y el bloque colgante, siendo especificados con coordenadas xyz.

El salto y *heave* de las fallas son los componentes de separación más usados en los mapas de contornos, los cuales se generan a partir de un mapa o una imagen digital de terreno (Groshong, 2006). Este elemento de las variaciones en los perfiles topográficos en la Falla de Honda tiene la siguiente metodología:

- A. Carga en el Globalmapper 16 de la imagen digital de terreno (DEM) con una resolución de 30 x 30 m, verificar en una proyección 3D la posición de la falla y determinar una escala de colores eficientes para ver las variaciones en altura y trabajar en escala 1:1 (Figura 36).
- B. Definir el perfil topográfico en el bloque colgante, en este caso corresponde a la zona del filo de la falla como máxima expresión topográfica, para esto se realiza un trazado de puntos equidistantes cada 500 m a lo largo del perfil de la falla, generando una tabla Excel con las coordenadas xyz.
- C. Definir el perfil topográfico en el bloque yacente a lo largo del trazado de puntos equidistantes con un trazo a 100 m, 250 m, 500 m y 1000 m hacia el oeste, generando una tabla Excel con las respectivas coordenadas xyz.
- D. En Excel sustraer el perfil topográfico del bloque colgante y el perfil topográfico representativo del bloque yacente dándonos una idea del salto de la falla a lo largo del perfil de la Falla de Honda.

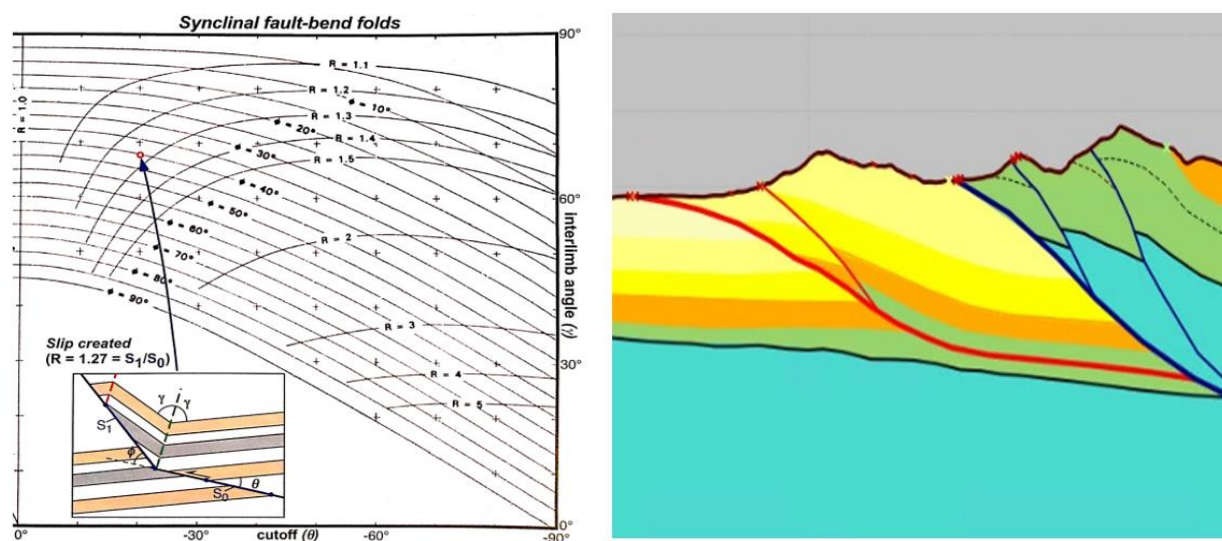
E. Resumir en una vista 2D el salto de la Falla de Honda a lo largo de su extensión en superficie e ilustrar los lugares con anomalías en los datos y determinar si hay segmentación.

Figura 36. Expresión topográfica de la Falla de Honda y extracción de información de elevación del terreno partiendo del DEM. Los trazos en el filo como QC del punto máximo de expresión topográfica y 500 metros al oeste sobre el bloque yacente denota un cambio en las elevaciones vinculadas a los cambios geomorfológicos de la falla.



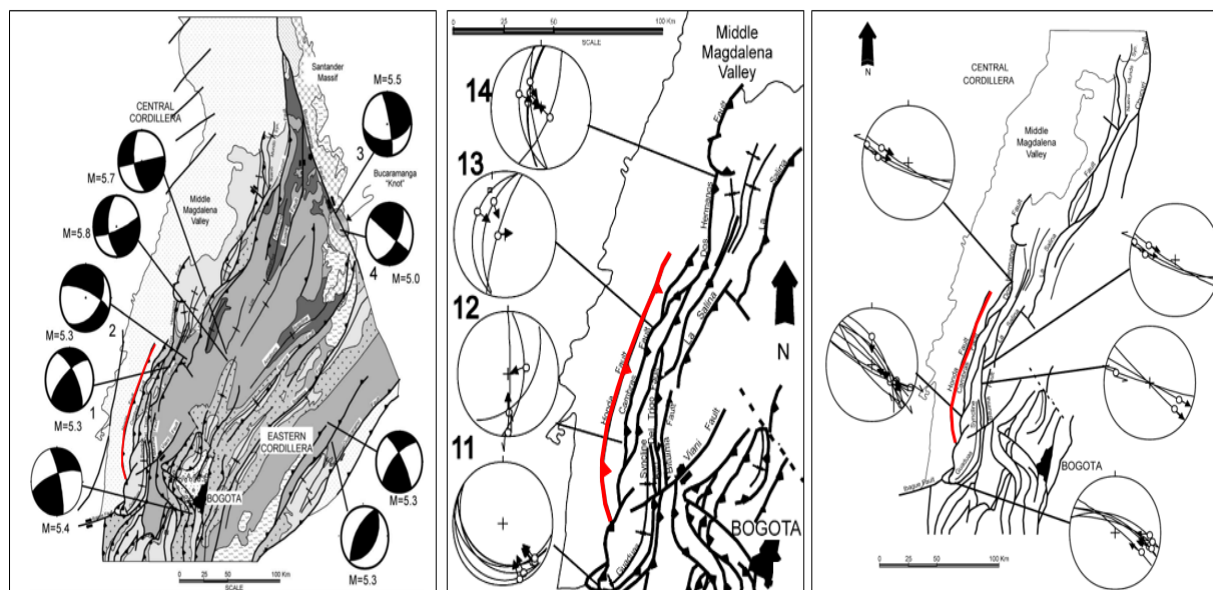
Para determinar la magnitud del deslizamiento de la falla (*slip*) a lo largo de pliegues de flexión asociado a un sinclinal se utiliza el parámetro R , el cual es el radio de la magnitud de deslizamiento bajo la posición de las líneas S1 y S2 a lo largo de la falla (Shaw, Connors y Suppe, 2005). Los valores de R varían de acuerdo a lo apretado que se encuentre el pliegue, esto puede ser calculado de acuerdo a la relación del ángulo de interlimbo y el ángulo de corte de la falla (Figura 37a). La Sección Norte es utilizada a modo de ejemplo en este cálculo gráfico (Figura 37b).

Figura 37. Magnitud del deslizamiento de la falla (dip slip). A. Relación del ángulo de corte y el ángulo interlimbo (Suppe, 1992). B. Valores geométricos de la Falla de Honda en la sección Norte.



En relación al sentido del movimiento de la Falla de Honda, hay un componente de cabalgamiento y transpresión involucrada dada la configuración tectónica regional, los datos en la Figura 38 provienen de información bibliográfica de Acosta *et al* (2004) donde se encuentran los mecanismos focales en el SFM, así como lineamientos y fallas de rumbo localizadas sobre las fallas de Cambras y Dos Hermanos, cabalgamientos localizados inmediatamente al este de la Falla de Honda. Estos datos son integrados en un modelo de Riedel (Figura 38) para determinar el sentido de la falla con todos los elementos recopilados y la información del mapa geológico dentro del contexto regional (pliegues, lineamientos, fallas, etc.).

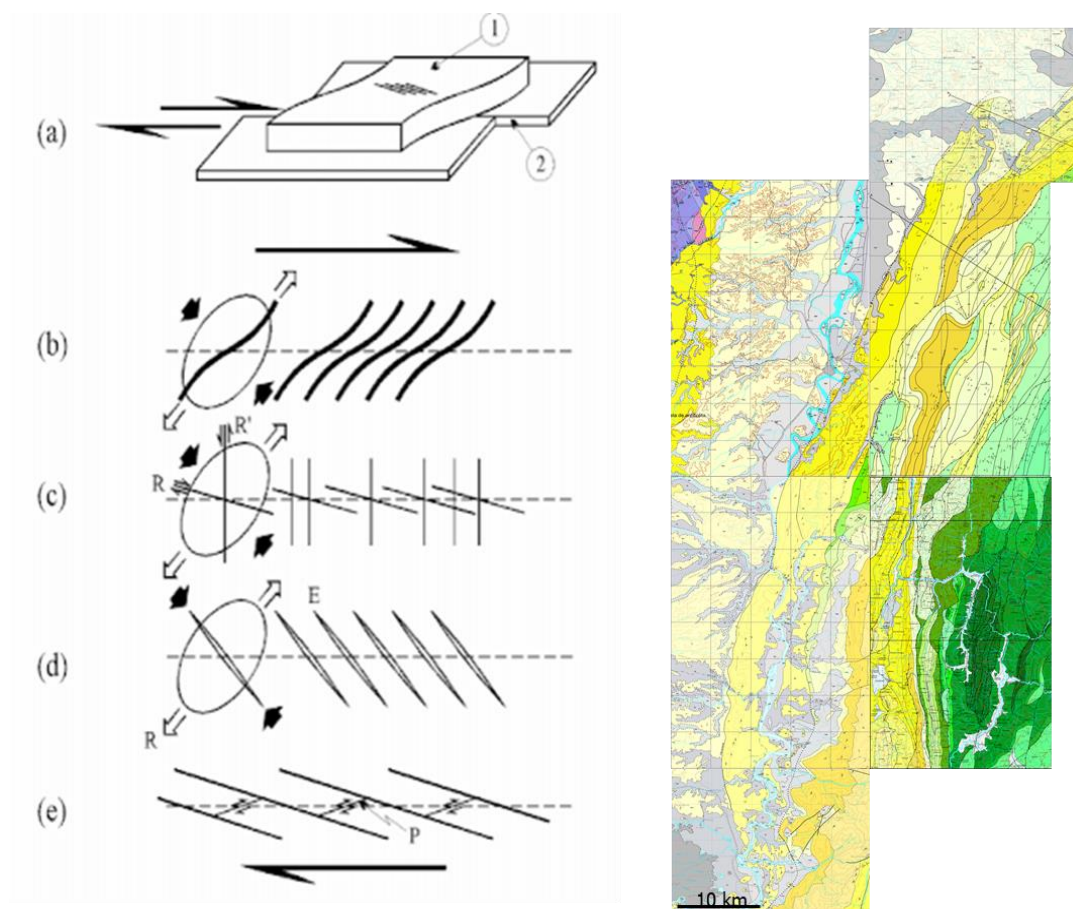
Figura 38. Sentido del movimiento y elementos de referencia bibliográfica en la zona del SFM ubicados en la red de Schmidt, hemisferio inferior. A la izquierda solución de mecanismos focales, en el centro datos de lineamientos sobre las fallas de Cambras y Dos Hermanos, a la derecha datos de fallas de rumbo, en rojo la Falla de Honda (modificado de Acosta et al., 2004).



Como dato importante para considerar en los resultados, la Falla de Honda tiene geomorfología caracterizada por prominentes escarpes continuos, drenajes alineados, monturas de fallas, crestas y valles lineales, valles hundidos, escarpes degradados y levantamientos localizados.

La Falla de Honda tiene una tasa de movimiento de <1 mm/año, basado en desplazamiento de algunas características geomorfológicas y terrazas cuaternarias datadas, la mitad sur de la falla tiene una taza de deslizamiento entre baja y muy baja <0.2 mm / año y la mitad norte esta entre baja a media 0.2 a 1 mm / año. La edad del último movimiento de la falla esta reportado en el Holoceno / post glacial donde las terrazas del Holoceno están compensadas por la falla (Ingeominas, 2005).

Figura 39. Sentido de la falla considerando elementos de transcurrencia. A la derecha experimentos de Riedel mostrando la relación de diferentes estructuras como pliegues, fallas R y R', fracturas y fallas, las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo (modificado Cristallini, 1998). A la izquierda mapa geológico escala 1:250.000 de donde se extraerán los diferentes ejes de pliegues sinclinales y anticlinales identificados en este borde oriental del SFM, las fallas de rumbo y los cabalgamientos.

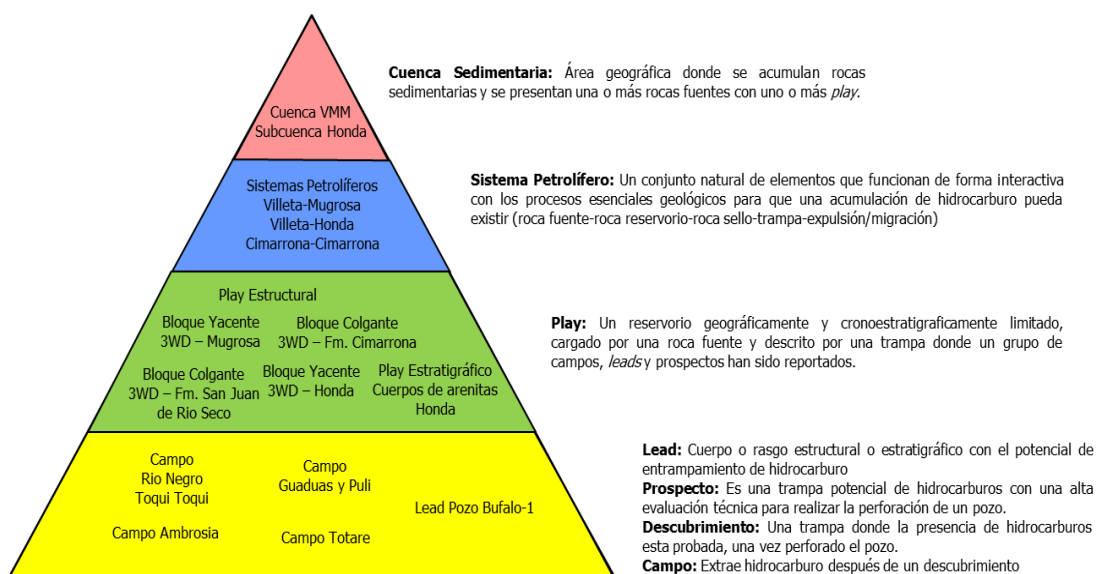


4.7 Análisis de Play Fairway Map

El potencial exploratorio asociado a la Falla de Honda con la información disponible es evaluado teniendo la jerarquía de clasificación siguiendo los lineamientos de Magoon y Dow (1994) resumidos en la Figura 40, donde los play estructurales del bloque colgante en la

Formación Mugrosa y bloque yacente en la Formación Honda serian evaluados dentro del sistema petrolífero Villeta-Mugrosa y Villeta-Honda. El área de interés corresponde a un rectángulo asociado a la Falla de Honda. La siguiente metodología es implementada para la realización de los mapas:

Figura 40. Diagrama y conceptos de jerarquía de clasificación cuenca-sistema petrolífero-play-campo/descubrimiento-prospecto-lead con los datos del área de estudio en la subcuenca Honda (modificado de Magoon y Dow, 1994).



- Una vez definida el área de interés geográfico se procede a la localización de los pozos en el mapa escala 1:250.000 y se establecen los pozos claves considerando su estatus de descubrimiento o un pozo abandonado.
- Hay dos sistemas petrolíferos Villeta-Mugrosa en el bloque colgante de la Falla de Honda y Villeta-Honda en el bloque yacente, cada uno se tratara como independiente. El paso a seguir consiste en determinar el semáforo de probabilidad con la información disponible

para cada uno de los elementos del sistema petrolífero (fuente, reservorio, trampa, sello, migración) para agregarlo a una tabla Excel donde se compile la matriz para los pozos.

Fuente: El área de interés es sobrepuesta sobre el mapa de la anomalía gravimétrica, el mapa de subsuelo del Cretácico roca fuente (Formación Villeta/Formación Luna), el mapa de la posición de las cocinas de la cuenca del VMM y el mapa de hidrocarburo expulsado para la roca fuente cretácica (Sarmiento, 2011). La generación y expulsión de hidrocarburo se genera en el depocentro del SFM y migra lateralmente hacia las zonas más someras. En este trabajo se le asignara a todos los pozos una probabilidad alta (verde) en este elemento.

Reservorio: Presencia de Reservorio. Verde, nivel de reservorio descrito en el pozo. Amarillo, nivel reservorio amarrado a un horizonte sísmico. Rojo, el nivel reservorio no está descrito en el pozo y no aparece en la sección sísmica. Un mapa se realiza para cada reservorio Formación Mugrosa y Grupo Honda.

Trampa: Presencia de Trampa, en este caso se evalúa la posibilidad de un cierre en tres direcciones contra la falla de Honda en el bloque yacente y el bloque colgante. Verde, zonas donde la falla de Honda tenga mayor salto estratigráfico en las secciones sísmicas y en el perfil del salto de falla. Amarillo, zonas donde el salto de falla es apenas perceptible dando opción a su presencia por la resolución sísmica 2D. Rojo, lugar donde el perfil del salto de falla es cero en superficie y se truncan diferentes rasgos estructurales.

Sello: Presencia de sello. Verde, capa sello reportada en el pozo con un espesor superior a 100 m para tener sello efectivo en el tope. Amarillo, capa sello amarrada a un horizonte sísmico. Rojo, no hay presencia de sello descrita o la unidad se encuentra aflorando.

Migración: Migración Efectiva y presencia de Hidrocarburo. Verde, pozos con acumulaciones comerciales, pozos descubridores y pozos perforados con *oils shows* reportados y

soportados en cualquier nivel reservorio. Amarillo, pozos con manchamiento de aceite reportado sin especificación de nivel. Rojo, pozos reportados como secos sin manifestación de petróleo.

- C. Una vez realizado el Excel, en el área de interés se marcan en círculo blanco los pozos secos, en círculo verde los pozos con shows y en círculo negro los pozos con hidrocarburo.
- D. En el área de interés se genera un mapa con el semáforo de probabilidad para cada elemento del sistema petrolífero.
- E. En un mapa final del área de interés se sobreponen las zonas de los mapas con alta confiabilidad en la presencia del elemento del sistema petrolífero, ruta de migración efectiva, reservorio y sello probado, presencia de salto estratigráfico. La zona donde todos los mapas se intersectan es la zona de bajo riesgo dentro de la evaluación de los *Play fairway Maps*.

5. Resultados

Con base a la metodología propuesta, a continuación se muestran los resultados de este trabajo partiendo de los mapas geológicos definidos para cada sección estructural con la base de datos disponible, la interpretación geológica de las líneas sísmicas disponibles con el amarre de los pozos y la construcción de las secciones estructurales con su respectiva retrodeformación.

En un segundo apartado se exponen los resultados del análisis cinemático de la Falla de Honda incluyendo el contexto regional y local. Y por último, se presentan los resultados del análisis de *Play Fairway Map* considerando los sistemas petrolíferos Villeta-Honda y Villeta-Mugrosa con los plays estructurales Bloque Yacente – 3WD Mugrosa y Bloque Colgante – 3WD Honda.

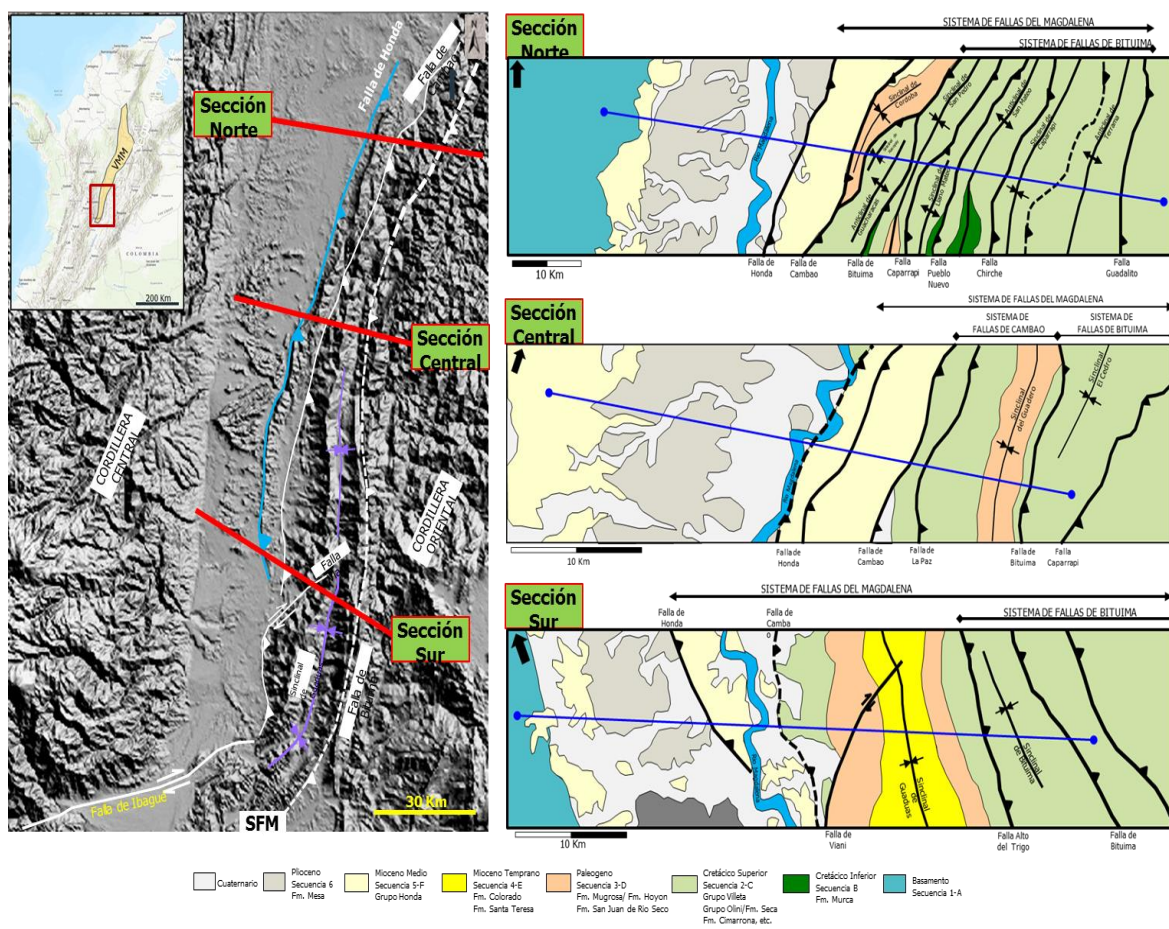
5.1 Mapas Geológicos de las Secciones Estructurales

Debido a la alta cantidad y calidad de información a nivel de mapas geológicos, los cuales se han mostrado a lo largo del presente trabajo, para tener un mejor control en superficie de las secciones estructurales se unificaron bajo un concepto geológico siguiendo la integración del trabajo de la nomenclatura estratigráfica y las secuencias sísmicas expuesto en el marco teórico, así como en la metodología (Figura 32, página 90). Con el objetivo de tener el marco local, los mapas geológicos se crearon con un corredor de aproximadamente 10 km alrededor de la sección estructural.

A nivel de nomenclatura y posición de las fallas principales, también se realizó un trabajo de unificación de la información de mapas geológicos y el DEM. Los rasgos principales son presentados para cada sección en la margen superior los sistemas de fallas principales y los

nombres de las fallas en los márgenes superior e inferior de acuerdo a su presencia. En la figura 41 se presentan los mapas geológicos base de este trabajo para la sección Norte, Central y Sur con su respectivo mapa de localización.

Figura 41. Mapas geológicos base para las secciones estructurales Norte, Central y Sur a lo largo de la Falla de Honda con los conceptos unificados a nivel de nomenclatura estratigráfica, secuencias sísmicas y rasgos estructurales.



5.2 Interpretación de Líneas Sísmicas 2D

El objetivo de este trabajo es analizar la Falla de Honda, sin embargo, el SFM incluye otros rasgos estructurales como el sistema de Falla de Cambao y el sistema de Fallas de Bituima

vinculados estructuralmente, no hay datos sísmicos disponibles por lo tanto las fallas se modelaron con los datos de superficie y los espesores de las secuencias de interés.

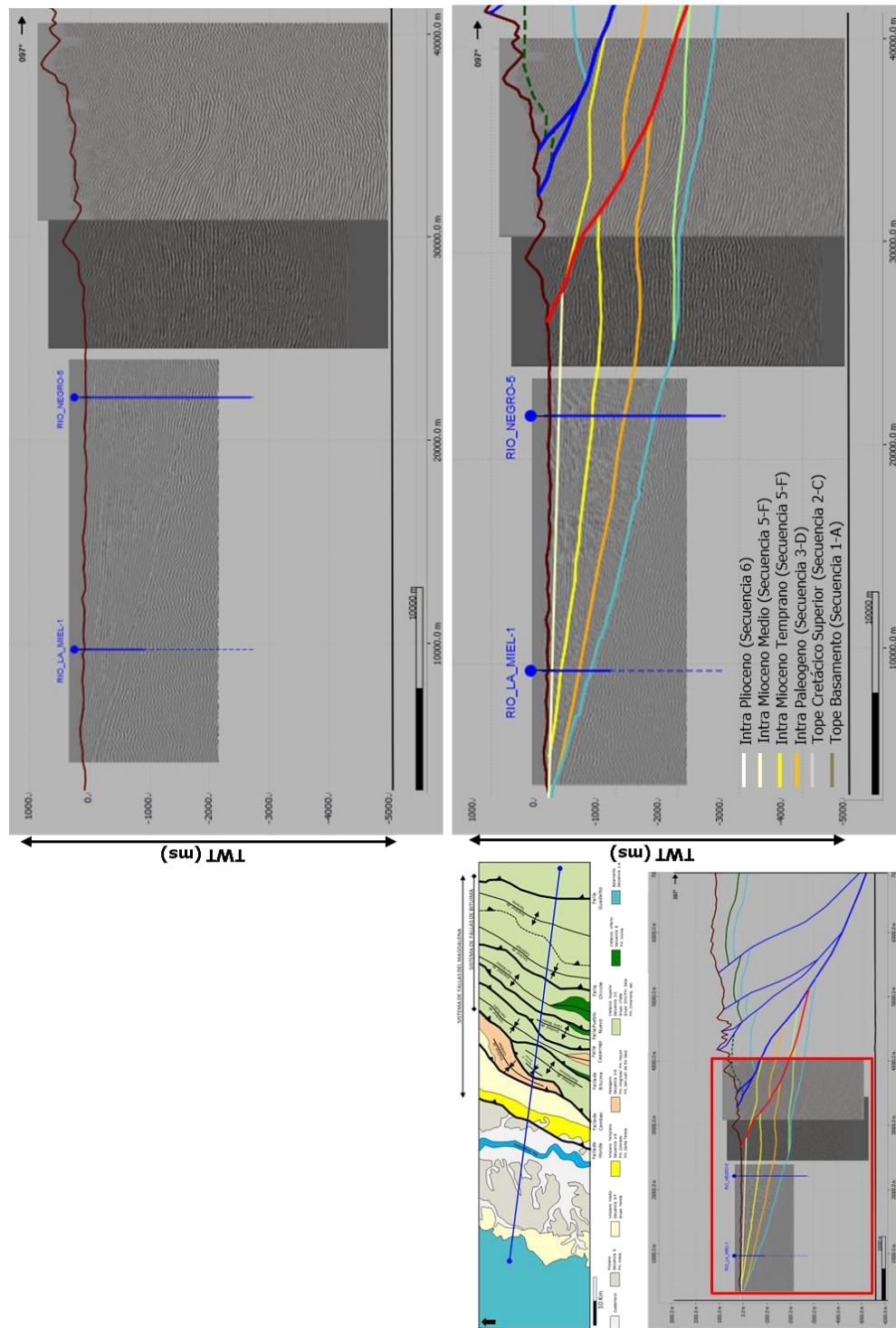
Este modelamiento hace parte de la interpretación geológica de los datos sísmicos y la construcción de las secciones estructurales como control de calidad para entender la geometría de la FPC en el borde occidental de la Cordillera Oriental, sin embargo en el análisis cinemático no se van a tener en cuenta.

A continuación se presenta una descripción del resultado de la interpretación sísmica en el dominio del tiempo para cada una de las secciones estructurales escala 1:1 con el objetivo de resaltar los rasgos geológicos principales. La visualización de la información se divide en dos partes: zona izquierda el mapa geológico unificado y debajo la sección de referencia completa incluyendo las fallas del SFM y con un cuadro rojo se resalta la zona de interés con la sísmica. En la parte superior derecha se encuentra la sección en detalle con las líneas sísmicas, los pozos, perfil topográfico y datos de buzamientos sin ninguna interpretación geológica, debajo la sección con la interpretación geológica (horizontes y fallas).

- **Sección Norte**

En el bloque yacente de la Sección Norte en la línea sísmica DC-1985-1825 se puede observar la secuencia estratigráfica comenzando en el basamento representado por un fuerte reflector sísmico con amarre en los pozos Rio La Miel-1 y Rio Negro-5 (Figura 42) asociado al tope de la secuencia sísmica 1, el cual se va profundizando debajo de la zona de cordillera hasta los 2630 ms como puede apreciarse en la línea sísmica TP-1995-28.

Figura 42. Interpretación sísmica Sección Norte **A.** Ubicación Sección Norte con líneas sísmicas y pozos. **B.** Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Norte. **C.** Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.



Se observa también que la Falla de Honda no está asociada al basamento a diferencia del sistema de fallas de Cambao y Bituima que si lo están. En la línea HBCO-1997-11 a 2040 ms se observa un reflector truncándose contra el basamento, no hay información de pozos cercanos disponible sin embargo, debido a la profundidad y las características geofísicas se pueden asociar al tope de la secuencia cretácica vinculado a la secuencia sísmica 2.

Continuando con la descripción de las características sísmicas en el bloque yacente, tenemos las unidades terciarias representadas en las secuencias sísmicas 3 – 4 - 5 con amarre en los pozos Rio La Miel-1 y Rio Negro-5, las cuales pueden seguirse claramente a través de los reflectores sísmicos en las líneas DC-1985-1825 y TP-1995-28, estos se pinchan y acuña en relación *onlap* hacia el NW y en la zona de cordillera se truncan contra la Falla de Honda. En la imagen sísmica debajo de la Falla de Honda se crea una estructura subthrust de tipo anticlinal, la cual no es real. La Formación Mesa (secuencia sísmica 6) cubre discordantemente el área, aflora y se encuentra en capas horizontales.

El bloque colgante de la Sección Norte se interpreta en las líneas sísmicas TP-1995-28 y HBCO-1997-11, donde se delimita muy bien el cambio en la expresión topográfica. En esta zona se encuentra aflorando la secuencia sísmica F (Grupo Honda) con algunos datos de buzamientos *in situ* los cuales pueden seguirse en la imagen sísmica.

Las características sísmicas pueden definirse a través de puntos de guía en la línea TP-1995-28, sin embargo en la línea HBCO-1997-11 los reflectores sísmicos no son muy claros, para definir las secuencias involucradas se utilizó el trazo claro de la Falla de Honda y el espesor de las secuencias sísmicas controlado en el bloque yacente. Los sistemas de fallas de Cambao y Bituima están asociados a una serie de sinclinales y anticlinales con algunos buzamientos reportados, los cuales se usaron para el contexto general de la sección.

La Formación Murca, secuencia sísmica B (Cretácico Inferior) se encuentra aflorando en cercanías a la sección en los sinclinales de San Pedro y Llano Mateo, su presencia nos permite controlar los espesores en las secciones, la profundidad del despegue y la naturaleza de inversión tectónica en las fallas del basamento.

- **Sección Central**

Esta sección está cubierta por las líneas sísmicas DC-1985-1270 y HCBO-1997-06 junto a los datos del pozo Purnio-1. La sísmica en esta Sección Central representa la mejor calidad en imagen donde los reflectores son claros en el bloque yacente y colgante (Figura 43). El basamento se sigue a través de la fuerte reflexión, llegando a los 2800 ms en la zona de cordillera.

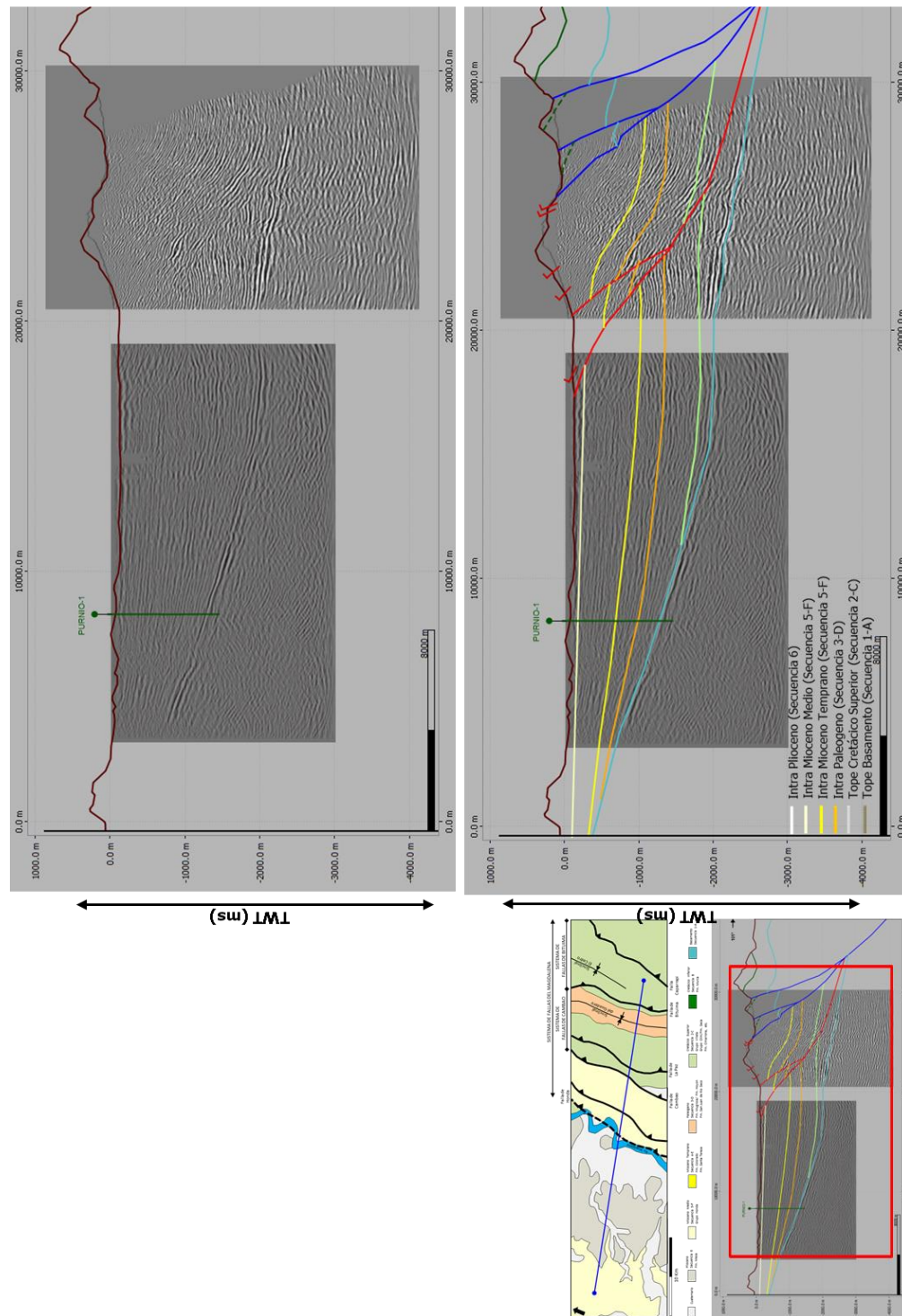
Unas reflexiones sísmicas asociadas en este trabajo a la secuencia cretácica con el tope a 1945 ms en la línea HCBO-1997-06 pueden seguirse hasta el oeste del río Magdalena donde se truncan contra el basamento a los 1602 ms en la línea DC-1985-1270.

El amarre con el pozo permite definir las secuencias sísmicas 3-4-5, las cuales se van pinchando al oeste y se truncan contra la Falla de Honda. En el bloque colgante se encuentra aflorando la secuencia sísmica F (Grupo Honda) y una falla intra Formación Honda, los reflectores en la línea HCBO-1997-06 permiten seguir los horizontes sísmicos con control en los datos de buzamiento de superficie.

El SFM en la Sección Central está vinculado a fallas de basamento con la secuencia cretácica superior aflorando, la formación del sinclinal del Guadero está asociada a una falla ciega de basamento con rocas de la Formación Hoyon en su núcleo.

Figura 43. Interpretación sísmica Sección Central **A.** Ubicación Sección Central con líneas sísmicas y pozos. **B.**

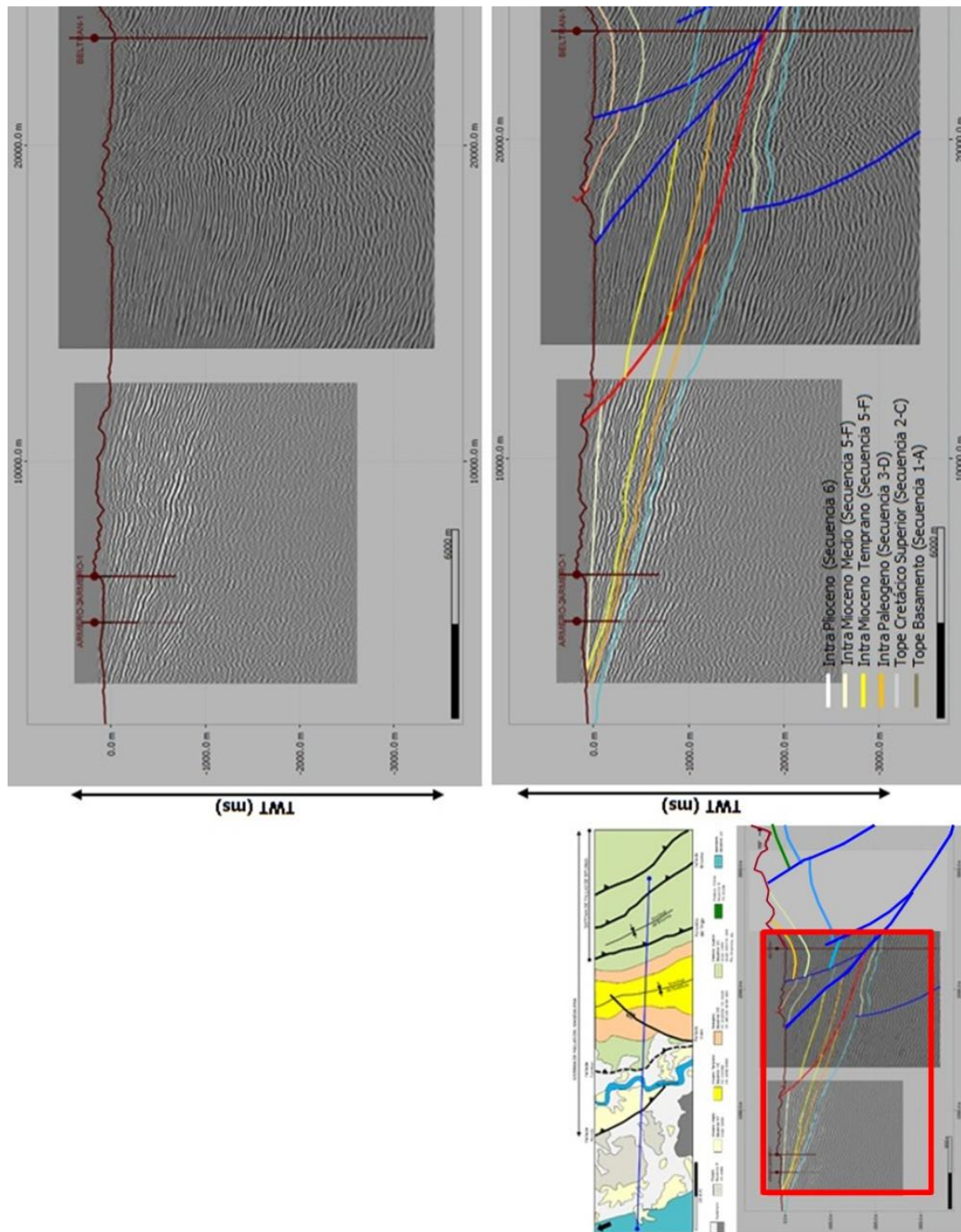
Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Central. **C.** Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.



- **Sección Sur**

En este trabajo, para la Sección Sur (Figura 44) se utilizaron las líneas sísmicas AV-1983-15 y AL-1992-102 con una buena calidad en la imagen sísmica, en el bloque yacente se usaron los pozos Armero-1 y Armero-2 separados 1.6 km; en el bloque colgante el pozo Beltran se encuentra proyectado 3 km sobre la sección al NW. En el bloque yacente el reflector característico del basamento se determinó por amarre de pozo debido a la calidad sísmica, siguiendo el horizonte desde los 320 ms en la línea AV-1983-15 hasta los 2384 ms en la zona de piedemonte en la línea AL-1992-102. En esta última, a la altura del CDP 900 a 2200 ms se presenta una serie de reflexiones fuertes con 396 ms de espesor en tiempo, las cuales se asociaron a la secuencia cretácica con una aparente falla normal fosilizada, la presencia de la secuencia sísmica 3 o C (Cretácico Superior) en la parte profunda de la zona de cordillera esta reportada en el pozo Beltran-1. Las secuencias sísmicas terciarias 3-4-5 están amarradas a los pozos en el bloque colgante y yacente, pinchándose al oeste y se truncan contra la Falla de Honda. En el bloque colgante se encuentra aflorando la secuencia sísmica F (Grupo Honda), la Falla de Honda cambia su nivel de despegue del techo de la secuencia cretácica reportado en las secciones Norte y Central a un nivel intra-Formación Mugrosa. El río Magdalena se encuentra sobre este sector en el bloque colgante. La imagen sísmica y los buzamientos permiten delimitar horizontes sísmicos claramente. El sistema de fallas de Cambao pone a las unidades superiores (Formación Cimarrona) de la secuencia sísmica 2 (Cretácico Superior) en contacto con el Grupo Honda, la falla de rumbo de Viani podría vincularse a la estructuración del basamento, posiblemente en una estructura de flor positiva y la estructura del sinclinal de Guaduas con rocas de la secuencia sísmica 4 (Formación Santa Teresa) en su núcleo se vincularía a una falla de basamento ciega.

Figura 44. Interpretación sísmica Sección Sur. **A.** Ubicación Sección Sur con líneas sísmicas y pozos. **B.** Vista en sección de las líneas sísmicas y pozos de la Sección Sur. **C.** Líneas sísmicas con la interpretación de las secuencias sísmicas y las fallas.



El sistema de fallas de Bituima pone a las unidades inferiores (zona basal del Grupo Villeta) de la secuencia sísmica 2 (Cretácico Superior) en contacto con las unidades superiores del Grupo Villeta. A 20 km al NE de la zona se encuentra aflorando la secuencia B (Cretácico Inferior), esta información nos da una idea de la profundidad del despegue y la naturaleza de inversión tectónica en las fallas del basamento.

5.3 Secciones Estructurales con Retrodeformación

Al realizar la conversión a profundidad de las secciones estructurales se presentan cambios en las líneas sísmicas desapareciendo los efectos de *pull-up* vinculados a la zona debajo del thrust. A continuación se presentan las secciones en profundidad incluyendo las otras fallas del SFM. El sistema de fallas de Cambao y Bituima se presenta de color azul oscuro y la Falla de Honda con color rojo. El alcance de este estudio se enfoca en la Falla de Honda por lo tanto el cálculo de acortamiento se enfocara a ese punto. Las secciones estructurales en profundidad se presentan en las figuras 45 a 47 con el mapa geológico utilizado en la parte superior, la sección con la restauración a escala 1:3 para una mejor visualización del dato y a continuación se describen los rasgos estructurales, el salto de la falla, los parámetros geométricos de la Falla de Honda junto a los datos de acortamiento.

- **Sección Norte**

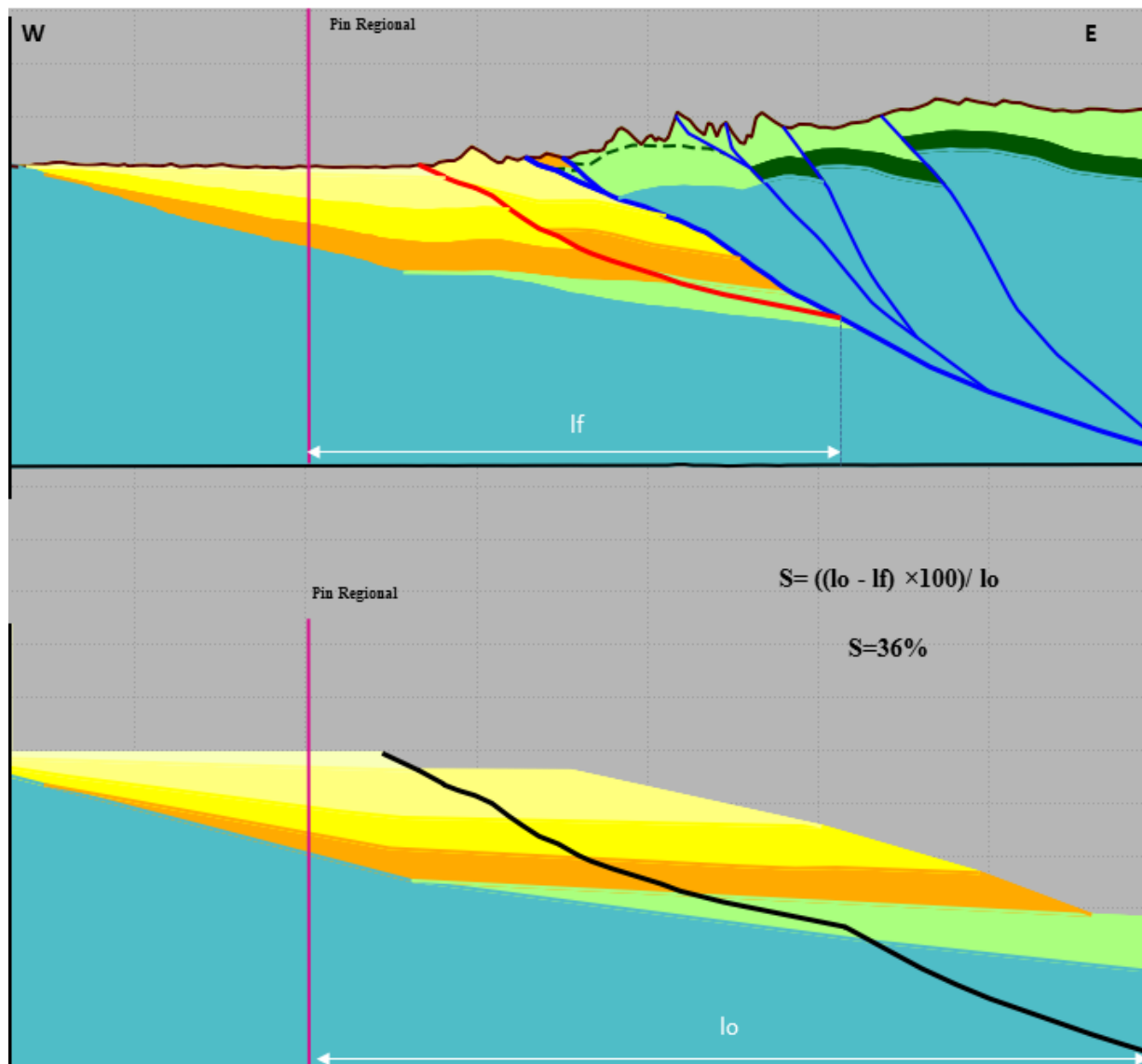
En líneas generales las fallas del sistema de Cambao y Bituima tienen una geometría asociada a despegues en el basamento, reforzada en la presencia de rocas del Cretácico Inferior en cercanías a la sección. En este estudio, el basamento en la zona de cordillera se asocia a las

rocas del Macizo de Quetame y Floresta de carácter metamórfico de bajo grado y secuencia sedimentaria, por lo tanto se espera una mejor respuesta al esfuerzo con ángulos de corte de la falla menores a 45° .

En este caso, la Falla de Cambao tiene un ángulo de corte (Θ) de 30° con un salto de falla de 3 km para el basamento. Hacia el oeste hay una serie de estructuras anticlinales y sinclinales en superficie con núcleo en el basamento. Esta zona está asociada a un proceso de inversión tectónica de las fallas generadas en el proceso extensivo del Crétacico. Tradicionalmente la Falla de Bituima es el límite de este proceso de inversión debido a los cambios en la geología en superficie.

Específicamente la Falla de Honda, está asociada a un pliegue de flexión de falla tipo *multi bend fault bend concave upward (syncline) bend*, debido a esto, se presentan diferentes cambios en los ángulos de buzamiento de la falla con varias bandas *kink* asociadas, en este caso se identifican dos bandas activas (1 y 3 en la Figura 48A). Las secuencias involucradas en la Falla de Honda en la Sección Norte tienen un salto de falla de 1 Km para el tope de la Formación Mugrosa (tope secuencia sísmica D) bajando a 650 m para el Grupo Honda en la parte somera- El pliegue es suave con un *backlimb* buzando de 10° hacia el oeste. Para el cálculo de la magnitud del slip en la Falla de Honda, se considera el ángulo de corte (Θ) de 15° , un ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) de 22° , el cambio de buzamiento en la falla (Φ) de 20° con un ángulo interlimbo (γ) de 75° con estos datos la magnitud del deslizamiento de la falla (*slip*) expresado en R es igual a $1.0 S_1/S_0$.

Figura 45. Sección Norte en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.

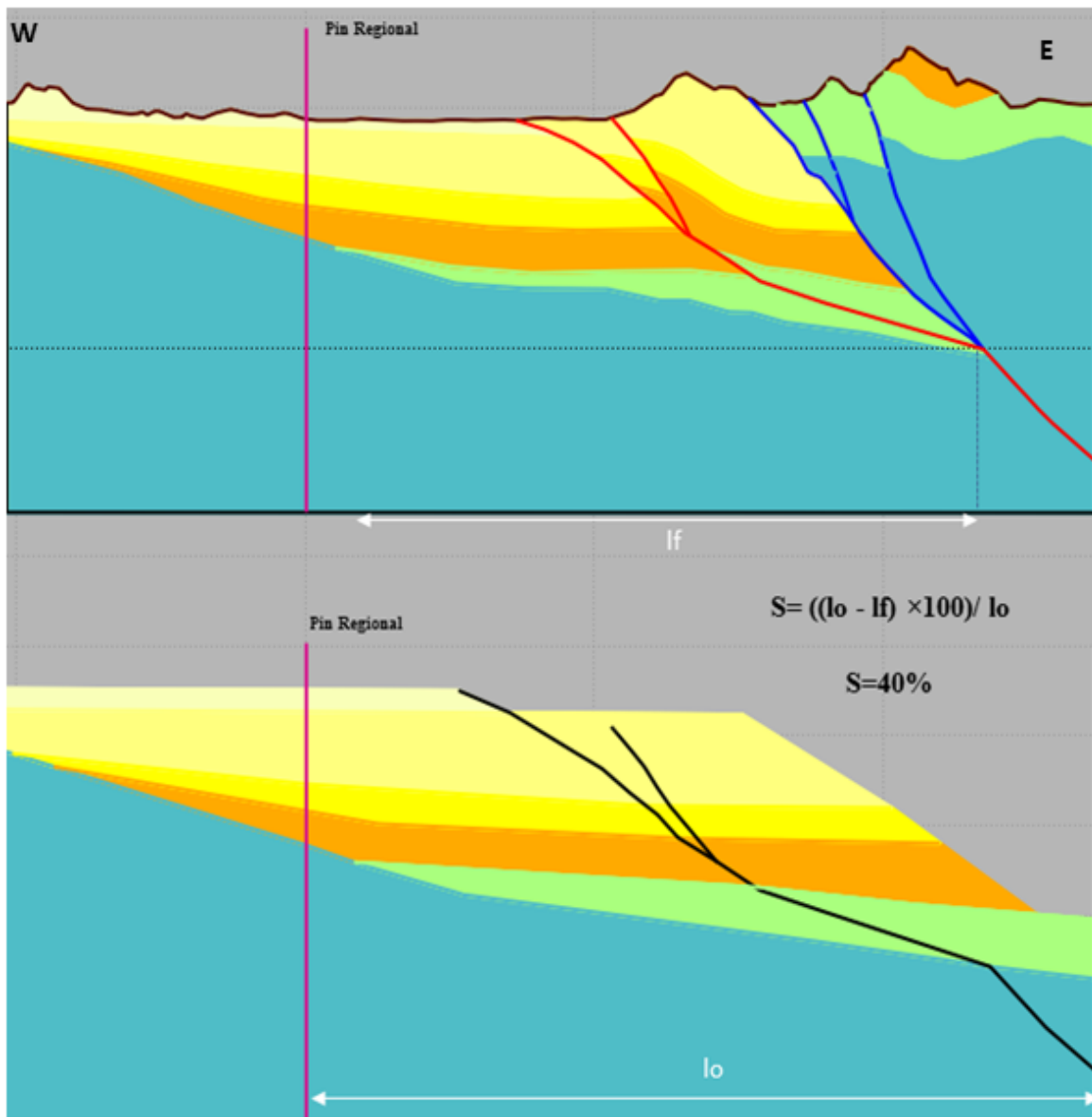


- **Sección Central**

En el borde occidental destaca la presencia del sinclinal del Guadero con rocas de la secuencia del Paleógeno (Secuencia D) vinculado a una falla de basamento ciega, el sistema de fallas de Cambao se asocian al basamento con ángulo de corte (Θ) de 30° a 40° , estas fallas ponen en contacto rocas del Cretácico Superior con rocas del Mioceno Medio.

La Falla de Honda en esta sección tiene un *splay* el cual pone en contacto afloramientos del Grupo Honda basal con el Grupo Honda superior con un salto de falla estimado en 520 m (Figura 46). El pliegue tiene un *backlimb* buzando 16° hacia el este.

Figura 46. Sección Central en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.



El salto de la Falla de Honda en relación al tope de la Fm Colorado (Secuencia E) es 780 m, llegando a 650 m en superficie. El ángulo de *cutoff* en la parte de basamento corresponde a 24° cambiando a un ángulo de corte (Θ) de 12° al entrar en la secuencia sedimentaria y el pliegue de flexión de falla se forma con cambio de buzamiento en la falla (Φ) de 28° , otros datos de la geometría de la falla son el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) de 20° y el ángulo interlimbo (γ) de 65° , estos datos están resumidos en la figura 48B. La magnitud del deslizamiento de la falla (*slip*) expresado en R es igual a $1.1 S_1/S_0$.

- **Sección Sur**

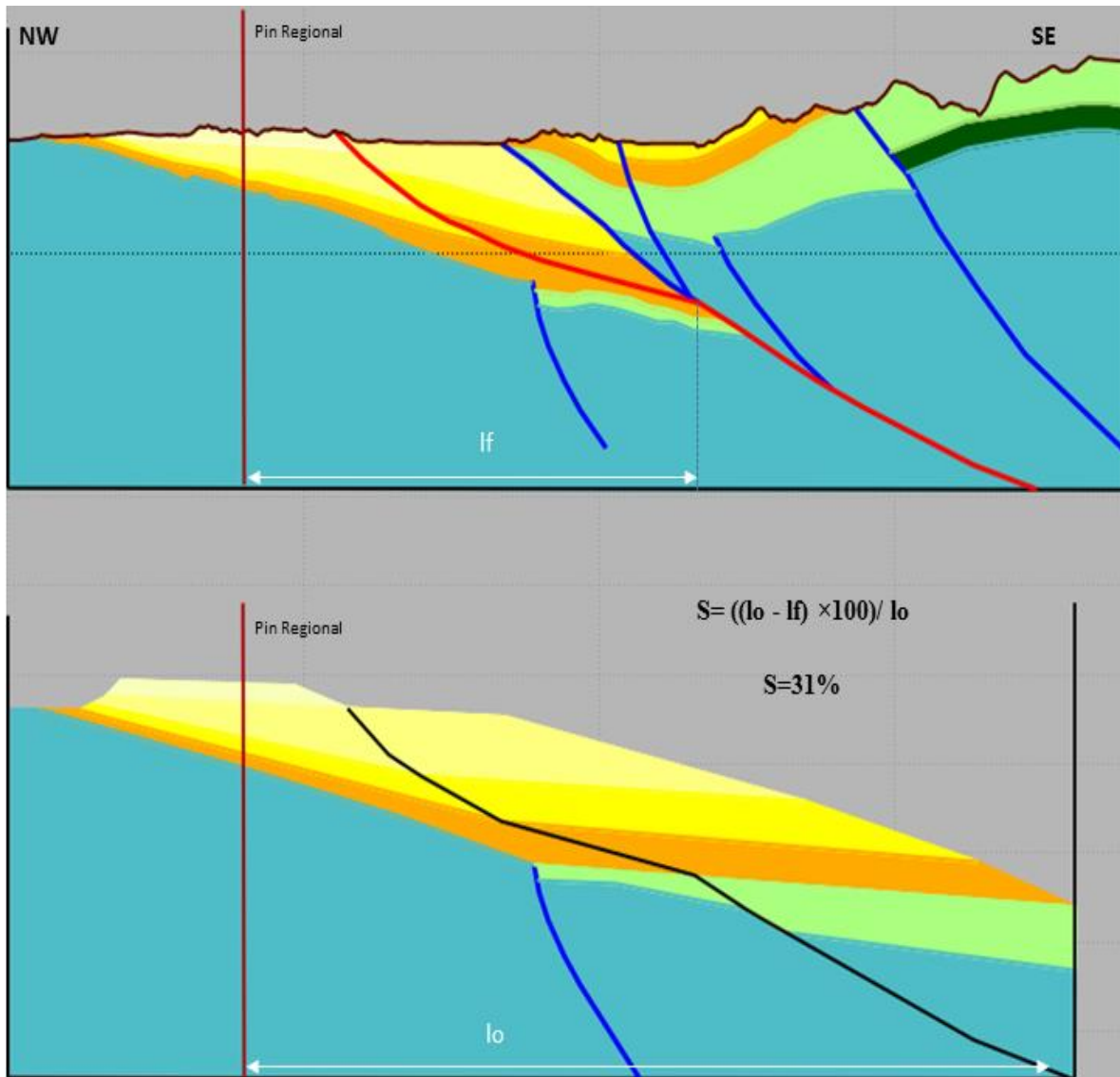
La Falla de Bituima se encuentra aflorando en el borde occidental con un sinclinal asociado con un núcleo de rocas del Cretácico Superior, el sinclinal de Guaduas se encuentra inmediatamente al este con una falla ciega de basamento, el núcleo incluye rocas de la Formación Santa Teresa (secuencia sísmica E) y la Falla de Cambao pone rocas del Cretácico Superior (Formación Cimarrona) con la secuencia del Mioceno Medio (Grupo Honda- secuencia F).

La Falla de Viani ha sido descrita en superficie a través del mapa geológico, sin embargo su trazo en la sísmica es inferido. La presencia de esta falla de rumbo indica cambios en el estilo y magnitud de la deformación, probablemente asociados a cambios en la cuenca, sustentados en la presencia de la falla normal en el bloque yacente con reflexiones asociadas a una secuencia cretácica por encima del basamento y la profundización del mismo (Figura 47).

La Falla de Honda cambia su nivel de despegue a una posición más somera dentro de la Formación Mugrosa y el salto de falla baja a 260 m para el tope de la Formación Colorado (secuencia E). En el nivel del basamento el ángulo de corte es 40° , asociado a la falla de rumbo

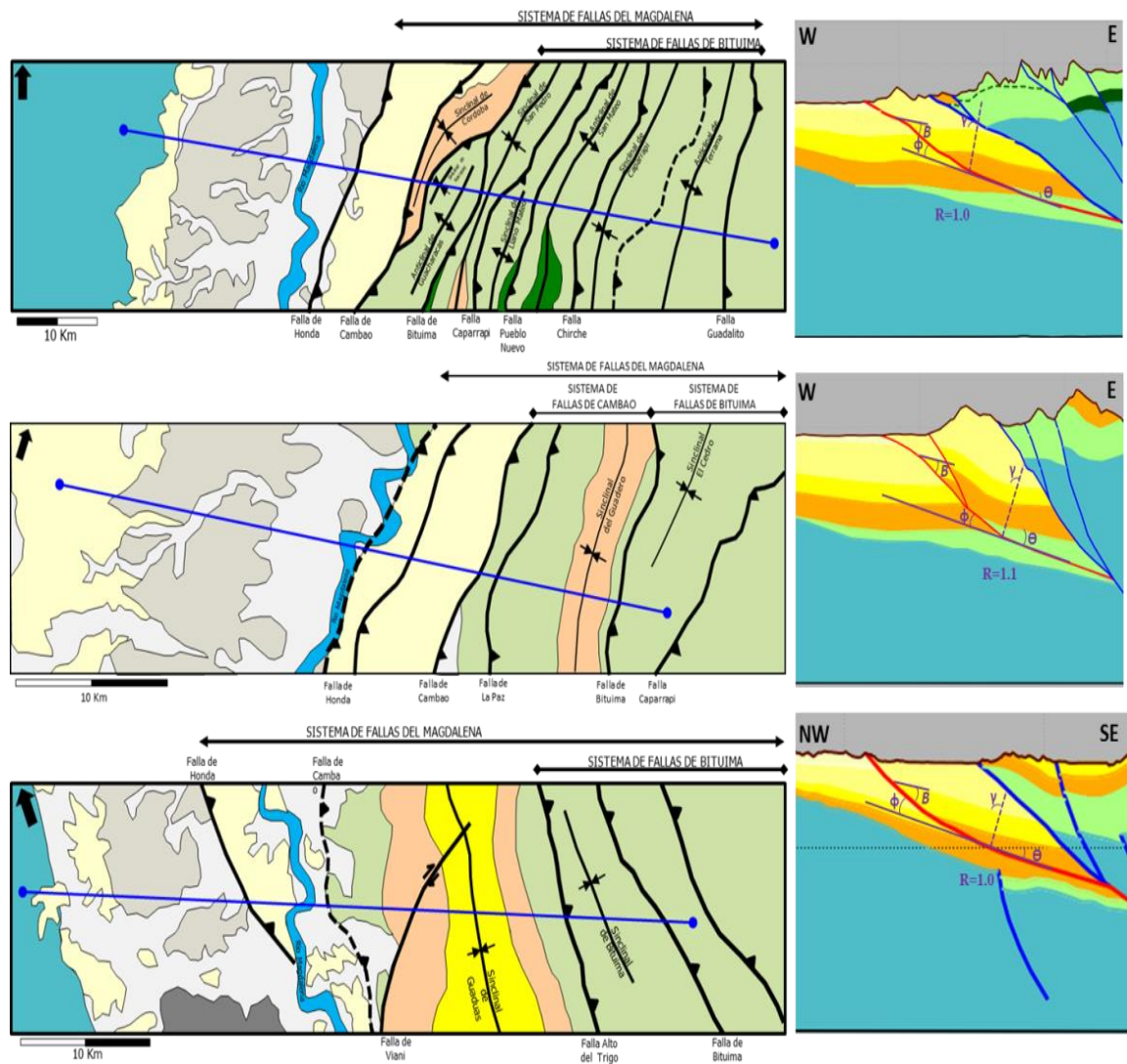
de Viani. En la secuencia terciaria el ángulo de *cutoff* (Θ) es de 18° , el pliegue de flexión de falla tiene un *backlimb* suave con buzamientos en los estratos del Grupo Honda de 7° hacia el oeste.

Figura 47. Sección Sur en profundidad (m) con su respectiva restauración y cálculo de acortamiento.



El ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) de 26° , el cambio de buzamiento en la falla (Φ) de 28° con un ángulo interlimbo (γ) de 84° (Figura 48C) con estos datos la magnitud del deslizamiento de la falla (*slip*) expresado en R es igual a $1.0 S_1/S_0$.

Figura 48. Datos geométricos de la Falla de Honda ángulo de corte (Θ), el cambio en el buzamiento de la falla (Φ), el ángulo de corte en el bloque colgante después del plegamiento (β) y el ángulo interlimbo (γ). B. De acuerdo a la clasificación de pliegues asociados a flexión de falla. A. Sección Norte. B. Sección Central. C. Sección Sur.



5.4 Análisis Cinemático de la Falla Honda

En este apartado se exponen las características geomorfológicas, geométricas y estructurales de la Falla de Honda partiendo de la cartografía, los perfiles topográficos, la recopilación bibliográfica y los datos provenientes de las secciones estructurales. La Falla de Honda aflora continuamente a lo largo de un trazo irregular rectilíneo de 103 Km con una orientación NNE-SSW a NE-SW, el ancho de la falla varia a lo largo del rumbo entre 200 m a 1.5 km como se observa en las imágenes satelitales de la Figura 49. En este trabajo el ancho de la falla es demarcado como el corredor con límite al este en el punto medio del punto más alto en topografía hasta la base de la pendiente estructural y el límite al oeste en los puntos donde no se ven expresiones morfológicas como coluviones, terrazas, etc.

En la zona septentrional la Falla de Honda pone en contacto rocas del Mioceno Medio del Grupo Honda con rocas de la Formación Mesa como se aprecia en el mapa geológico de Puerto Boyacá (Figura 50a) escala 1:100000 de Rodriguez y Ulloa (1994). Las rocas de la Formación Mesa se encuentran cubriendo en forma discordante la secuencia y la expresión morfológica de la falla termina en superficie.

Las rocas del Grupo Honda en el bloque colgante de la Falla de Honda tienen rumbo entre N10E a N20E con buzamientos de 12 a 28° al SE. En el bloque yacente, la Formación Mesa se encuentra horizontal. El salto de la falla en este sector puede estimarse con la línea sísmica TPB-95-16-4 con el tope de la Secuencia 4 – Formación Colorado (Figura 50b), el salto de falla es $82 \text{ ms} \pm 81 \text{ m}$. La configuración geológica indica quietud tectónica en este sector de la Falla de Honda desde el Plioceno, de acuerdo a la edad reportada para la Formación Mesa.

En el borde sur de acuerdo a las imágenes satelitales y el mapa geológico escala 1:1000000 de Líbano (Barrero y Vesga, 1976), la Falla de Honda pone en contacto a rocas del Grupo Honda con la Formación Mesa y termina su expresión en superficie al encuentro con el Rio Magdalena, el cual en este sector tiene un trazo recto de 3 Km y se encuentra erodando a rocas del Grupo Honda con rumbo N5E y buzamiento 10° hacia el SE. La edad del último movimiento de la falla esta reportado en el Holoceno/post glacial donde las terrazas del Holoceno están compensadas por la falla (Ingeominas, 2005).

Figura 49. Expresión morfológica de la Falla de Honda en el DEM y las imágenes disponibles en Google Earth para estimar el corredor de ancho de la falla. En los cuadros A y B se presenta las condiciones de los bordes sur y norte de la Falla de Honda donde termina su expresión morfológica en superficie. Los puntos indicados con estrellas marcan las características frente a las poblaciones de Honda y La Dorada.

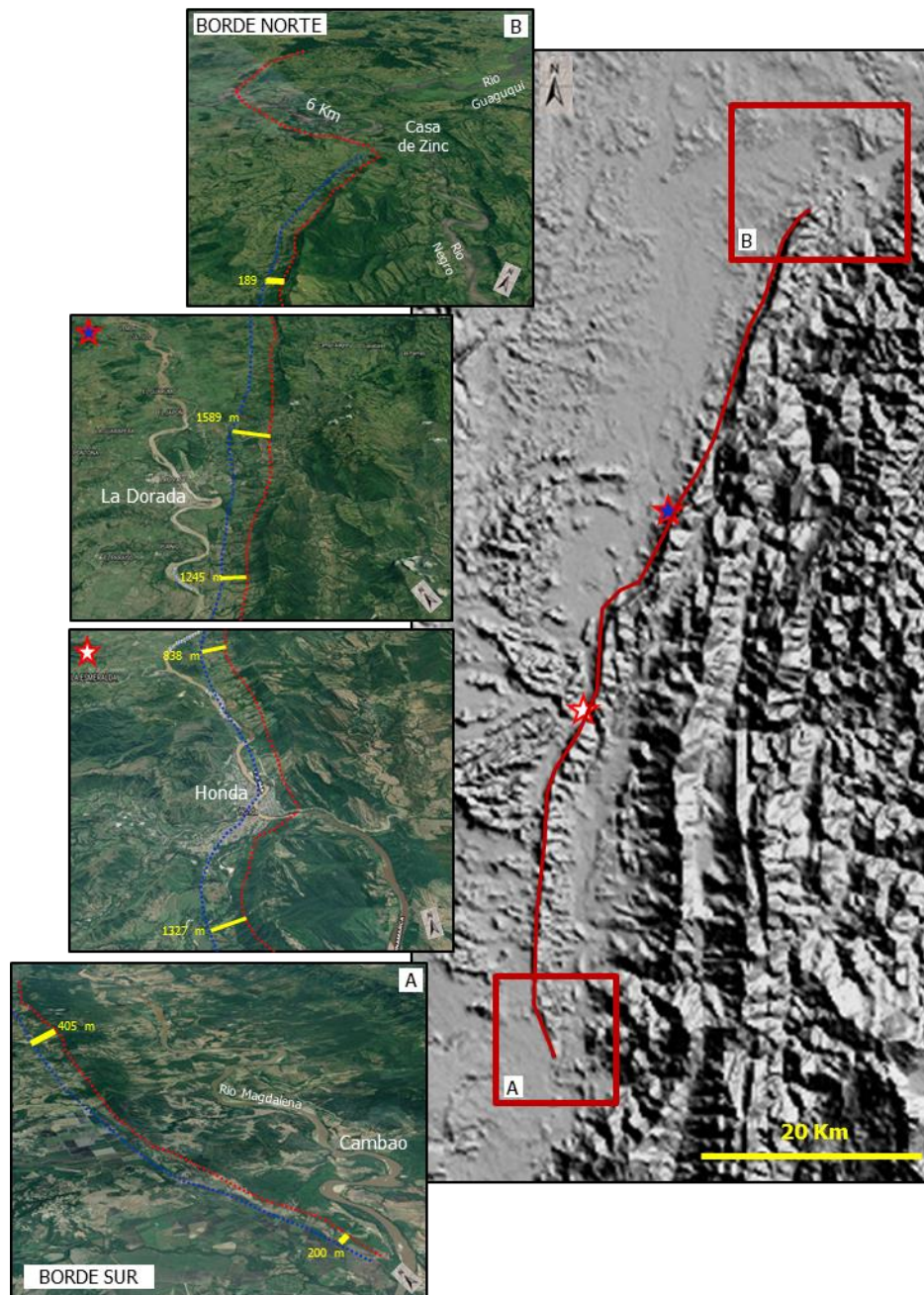
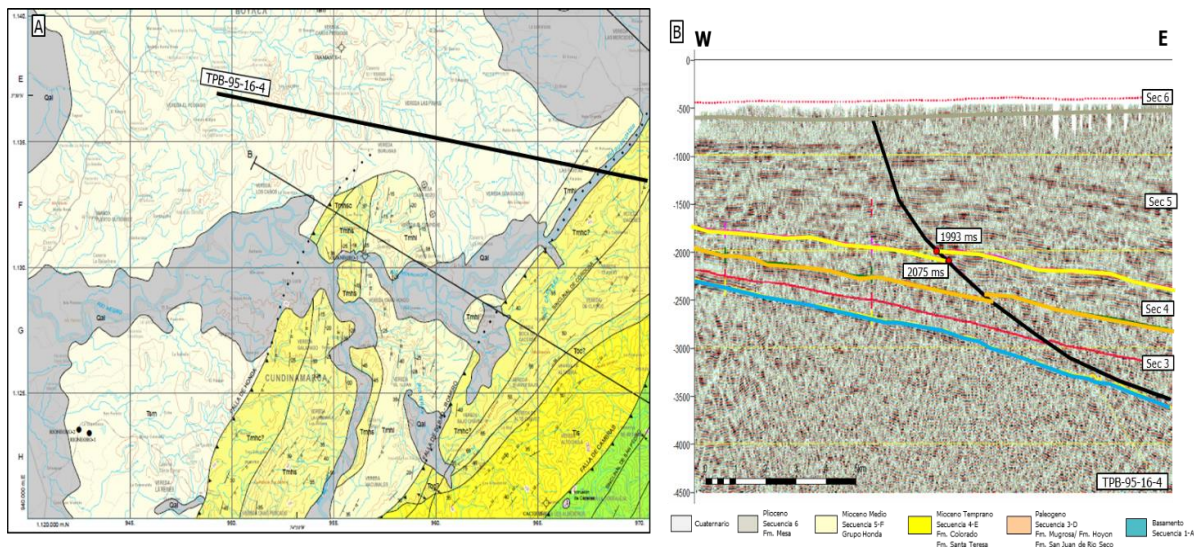


Figura 50. Borde Norte de la Falla de Honda. A. Mapa geológico escala 1:100000 plancha Puerto Boyacá (modificado de Rodríguez y Ulloa, 1994). B. Línea sísmica TPB-95-16-4 interpretada donde se observa la Falla de Honda cortando las secuencias terciarias hasta ser cubierta discordantemente por la Formación Mesa (modificado Sarmiento, 2011).



La Falla de Honda desde los contornos del modelo digital de terreno (Figura 51a) donde se consideran puntos equidistantes de 500 m en el bloque yacente y bloque colgante a lo largo del rasgo estructural, presenta valores de elevación variando en el bloque colgante de 180 m a 652 m y valores de contornos en el bloque yacente variando de 180 a 475 m (Figura 51b).

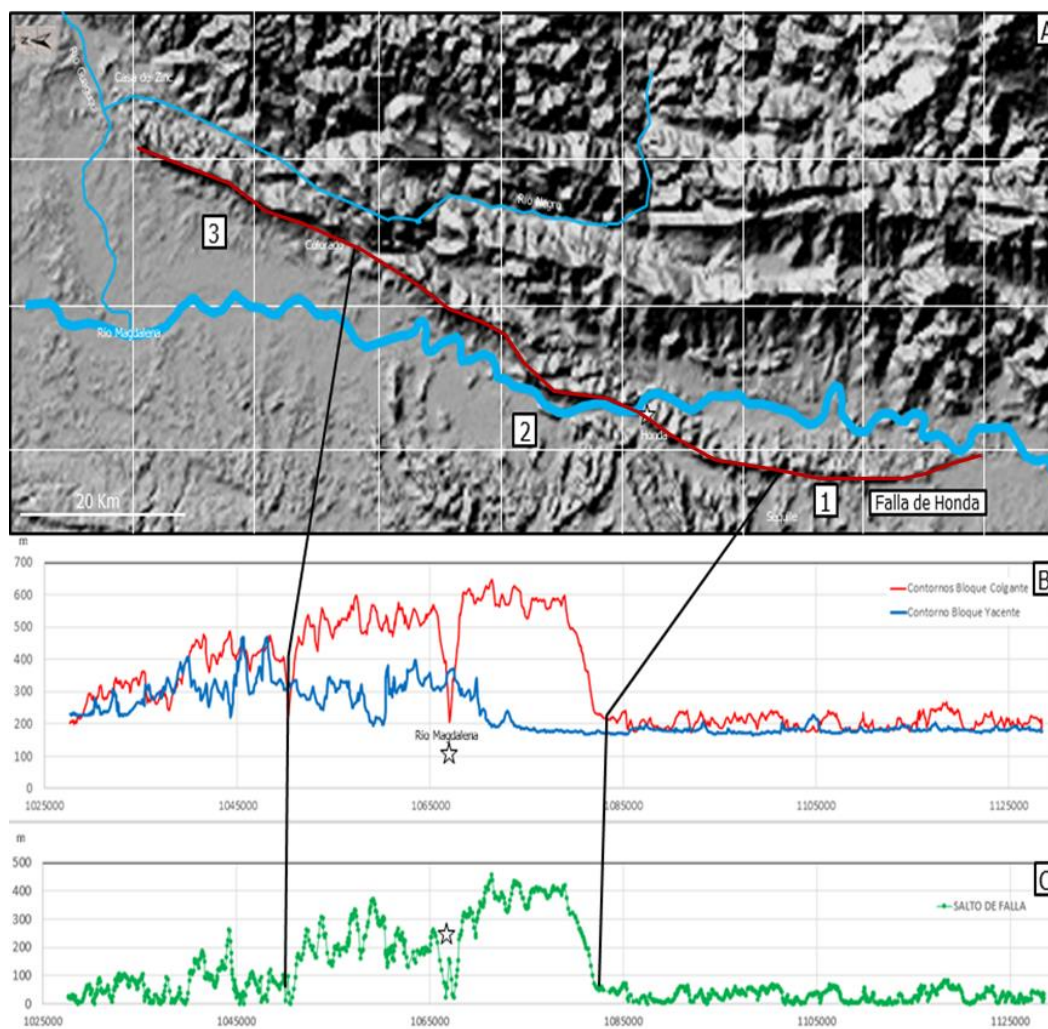
En el perfil se destaca la fuerte erosión por parte del río Magdalena en la morfología originada por la Falla de Honda con valores de 250 m, este dato junto a otros registrados en la bibliografía y descritos previamente implica diferentes zonas de levantamiento a lo largo de la Falla de Honda, los cuales deben estar vinculados a segmentación.

De acuerdo al diagrama de relación del salto de la falla a partir de los contornos (Figura 51c), los valores varían de 0 a 450 m a lo largo de la Falla de Honda y puede dividirse el trazo de

la falla en tres segmentos considerando la geometría del perfil. El segmento 1 localizado desde el borde sur hasta la localidad de Sequile tiene suaves colinas con el Grupo Honda aflorando en el bloque colgante con buzamientos de 12° hacia el SE y la Formación Mesa en el bloque yacente en posición horizontal.

De acuerdo al perfil, el levantamiento en este sector es menor a los 100 m, en la imagen DEM puede inferirse la presencia de un lineamiento en dirección W-E en esta zona donde el tramo del río Magdalena es recto en 2 km y puede extenderse al límite del segmento, sin embargo, en la sismica no está reportado ningún rasgo estructural con estas características.

Figura 51. Segmentación de la Falla de Honda. A. Modelo Digital de terreno, trazos de los cuerpos de agua destacables, localidades de interés y trazo de la Falla de Honda (color vinotinto). La Falla de Honda varía su trazo a lo largo del rumbo. B. Perfiles topográficos en el bloque colgante y yacente de la Falla de Honda, donde se presentan anomalías por la erosión del río Magdalena y río Negro. C. Perfil del salto de la falla de acuerdo a la morfología actual.



El segmento 2 corresponde a la mitad de la Falla de Honda y presenta los rasgos morfológicos con mayor levantamiento con alturas de 650 m. En el bloque yacente se presentan rasgos morfológicos como coluviones donde la topografía llega a 350 m. En este sector el río Magdalena discurre paralelo al rumbo de la falla.

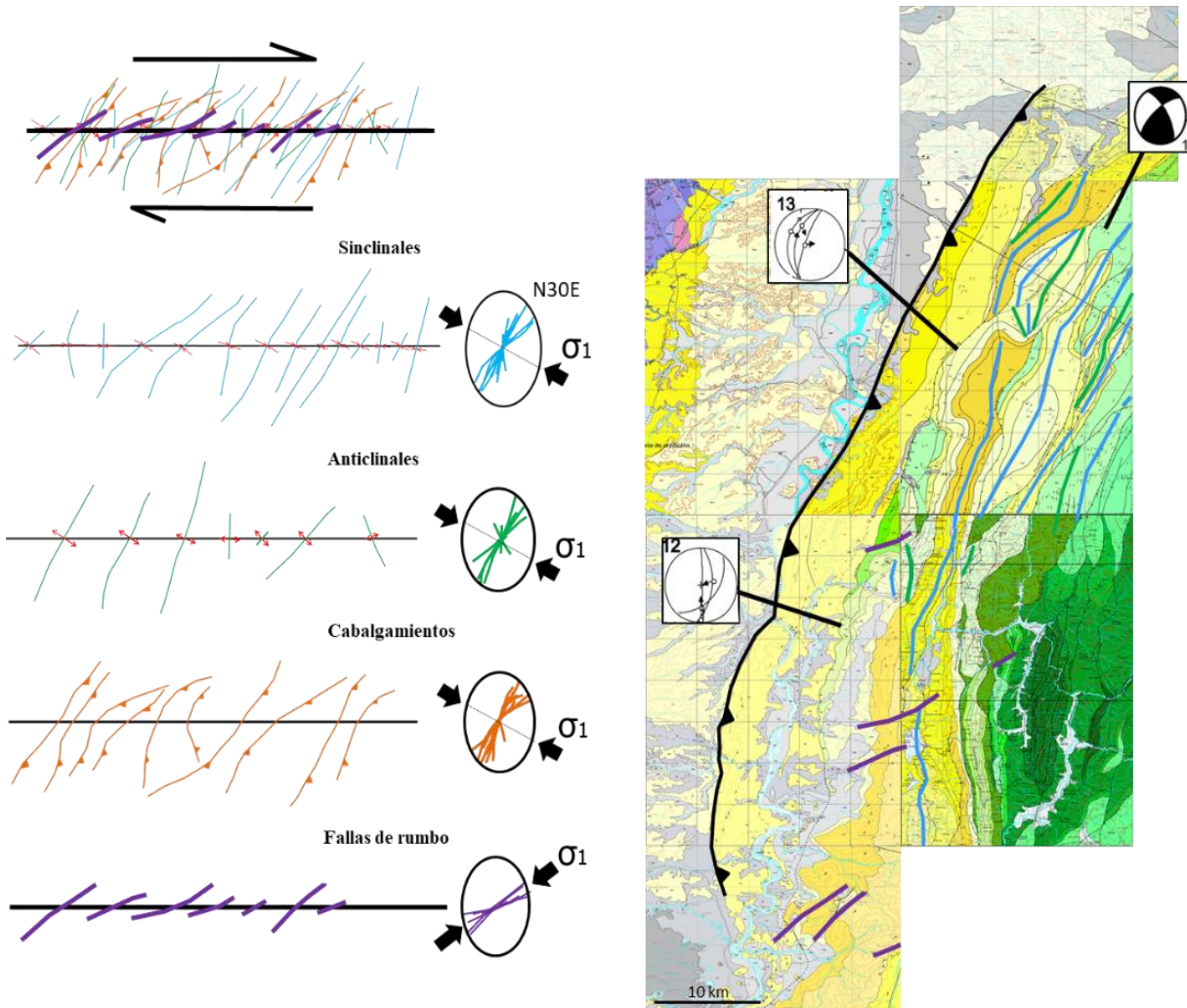
El salto de la falla alcanza 450 m frente a la población de Honda donde el Grupo Honda aflora en el bloque colgante y en el bloque yacente la Formación Mesa alcanza 300 m de espesor en capas horizontales. Este segmento presenta una forma de zigzag a lo largo del rumbo y en los límites puede observarse como la topografía disminuye en el bloque colgante.

El segmento 3 en la zona norte cubre 30 km aproximadamente, el río Negro va paralelo al trazo de la Falla de Honda en la zona de la Cordillera Oriental. La topografía en el bloque colgante va disminuyendo paulatinamente hasta perder la expresión morfológica, el mayor salto equivale a 300 m donde el Grupo Honda se encuentra aflorando con buzamientos de 12 a 22° al SE.

En resumen, la Falla de Honda esta segmentada en tres áreas, tiene geomorfología caracterizada por prominentes escarpes continuos, drenajes alineados, monturas de fallas, crestas y valles lineales, valles hundidos, escarpes degradados y levantamientos localizados. Estos rasgos pueden seguirse en superficie y en la imagen DEM. El salto de la falla debe llegar a cero tanto en el borde norte como el sur a nivel sísmico.

En relación al sentido del movimiento de la falla de Honda, hay un componente de cabalgamiento y transpresión involucrada dada la configuración tectónica regional resumido en la Figura 52 donde los sinclinales, anticlinales, fallas de cabalgamiento, fallas de rumbo y datos bibliográficos fueron compilados, la dirección de esfuerzo principal es NW-SE con rumbo en las estructuras N20E.

Figura 52. Sentido de la falla considerando elementos de estructurales regionales exhibidos en el mapa geológico escala 1:250.000 del SFM y datos bibliográficos de solución de mecanismos focales, datos de lineamientos sobre las fallas de Cambras y Dos Hermanos (modificado de Acosta et al., 2004).



5.5 Análisis de *Play Fairway Map*

La evaluación del potencial exploratorio del área de estudio asociado a la Falla de Honda a través de los mapas PFE se presenta a continuación a través de los mapas de los elementos de los sistemas petrolíferos Villeta-Mugrosa en el bloque colgante y Villeta-Honda en el bloque

yacente, la información base de los pozos clave se encuentra en la Tabla 6 y su localización en la figura 53.

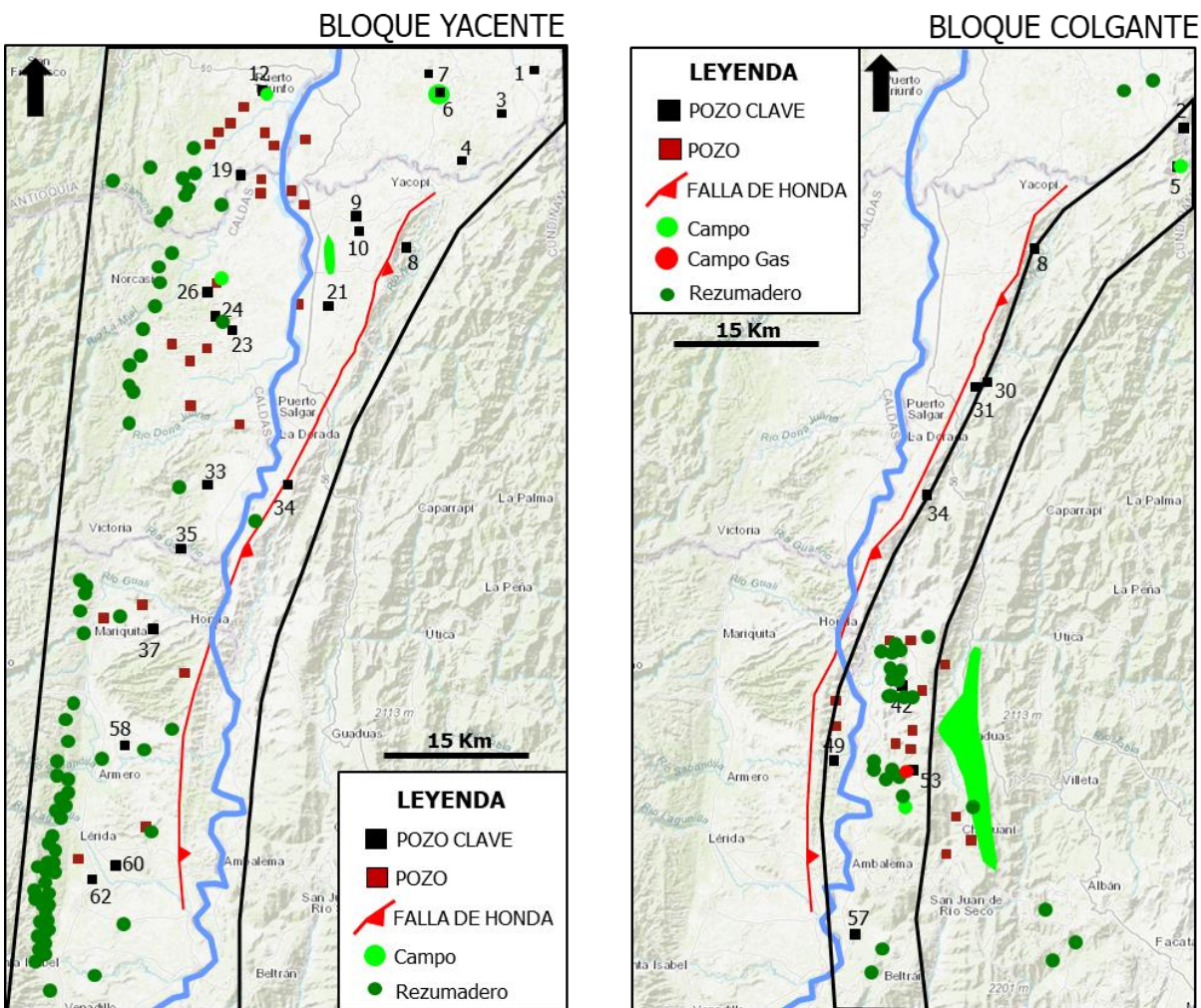
Tabla 6. Pozos clave en el área de la Falla de Honda para los mapas de PFE, localización en la Figura 53.

VILLETA - HONDA BLOQUE YACENTE FALLA DE HONDA											
POZO	Dos hermanos-1	La Fiebre-1	Guanegro-1	Bronce-1	Colibri-1	Diamante-1	Torcaz-1	Rio Negro-1	Rio Negro-5	Gutierrez-1	
ID	1	3	4	6	12	7	9	10	21	19	
Fuente											
Reservorio											
Trampa											
Sello											
Migración											
Descubrimiento											
Comercial											
POZO	Paraiso-1	Rio La Miel-1	Purnio-1	Guaca-1	Rio Guarino-1	Lumbi-1	Potosi-1	Armero-1	Armero-2	Bufalo-1	Topaz-1
ID	26	24	23	33	35	37	58	60	62	34	8
Fuente											
Reservorio											
Trampa											
Sello											
Migración											
Descubrimiento											
Comercial											
VILLETA - MUGROSA BLOQUE COLGANTE FALLA DE HONDA											
POZO	Agata-1	Morpho-1	Topaz-1	Loma Viuda-1	San Antonio-1	Mendez-1	Bufalo-1	Camacho-2	Quintero-1	Beltran-1	
ID	2	5	8	30	31	49	34	42	53	57	
Fuente											
Reservorio											
Trampa											
Sello											
Migración											
Descubrimiento											
Comercial											

Los mapas de los elementos para la evaluación se presentan a través de dos imágenes, a la izquierda el bloque yacente de la Falla de Honda con el sistema petrolífero Villeta-Honda, el

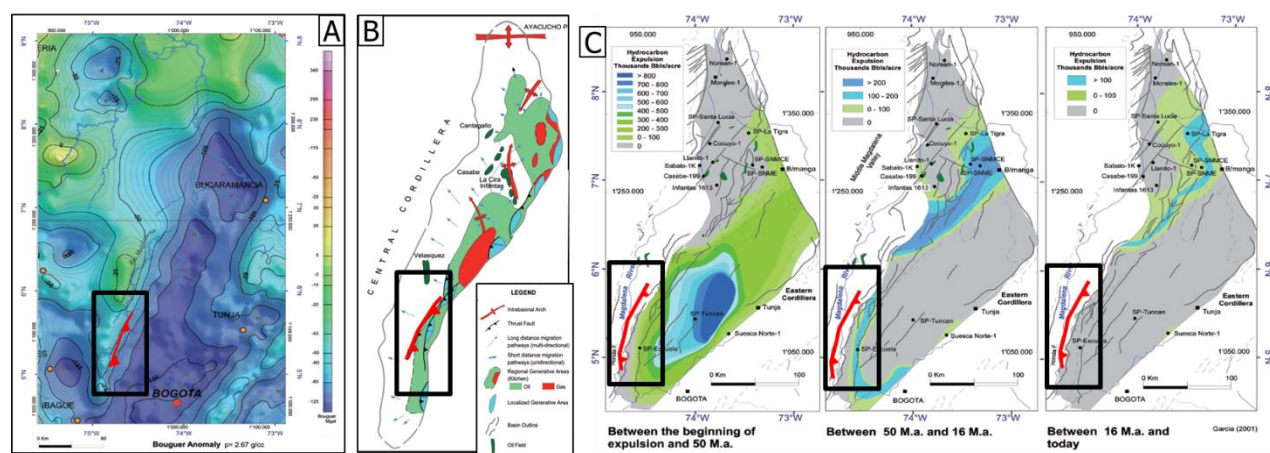
play estructural de un cierre en tres dimensiones y el polígono del mapa base se asocia a la presencia del reservorio incluyendo la información de subsuelo del Grupo Honda (secuencia sísmica 5-F). A la derecha el bloque colgante con el sistema petrolífero Villeta-Mugrosa, el play estructural de cierre en tres dimensiones contra la Falla de Honda y el polígono asociado a la extensión del reservorio Formación Mugrosa (Secuencia sísmica 3-D).

Figura 53. Mapa base de la evaluación de PFE de la Falla de Honda dividido en bloque yacente y colgante con la posición de los pozos clave (cuadrado negro) con su ID en la Tabla 6, pozos perforados en la zona (cuadrado vinotinto), posición de rezumaderos en superficie (ANH, 2020), campos de aceite y gas.



La roca fuente asociada al Grupo Villeta (secuencia sísmica 2-C) de acuerdo a la información sísmica se encuentra debajo de la zona de cordillera como se observa en las secciones Norte, Central y Sur. Sin embargo, en la mayor parte del bloque yacente las rocas cenozoicas descansan discordantemente sobre el basamento y hay una alta presencia de rezumaderos en superficie, así como manchamiento en el 80% de los pozos perforados, confirmando la presencia de una cocina y unas rutas de migración en la zona. En la figura 54, el mapa de la anomalía gravimétrica, el mapa de subsuelo del Cretácico roca fuente (Grupo Villeta/Formación Luna), el mapa de la posición de las cocinas de la cuenca del VMM y el mapa de hidrocarburo expulsado para la roca fuente cretácica (Sarmiento, 2011) se presentan con un polígono del área de estudio y la Falla de Honda.

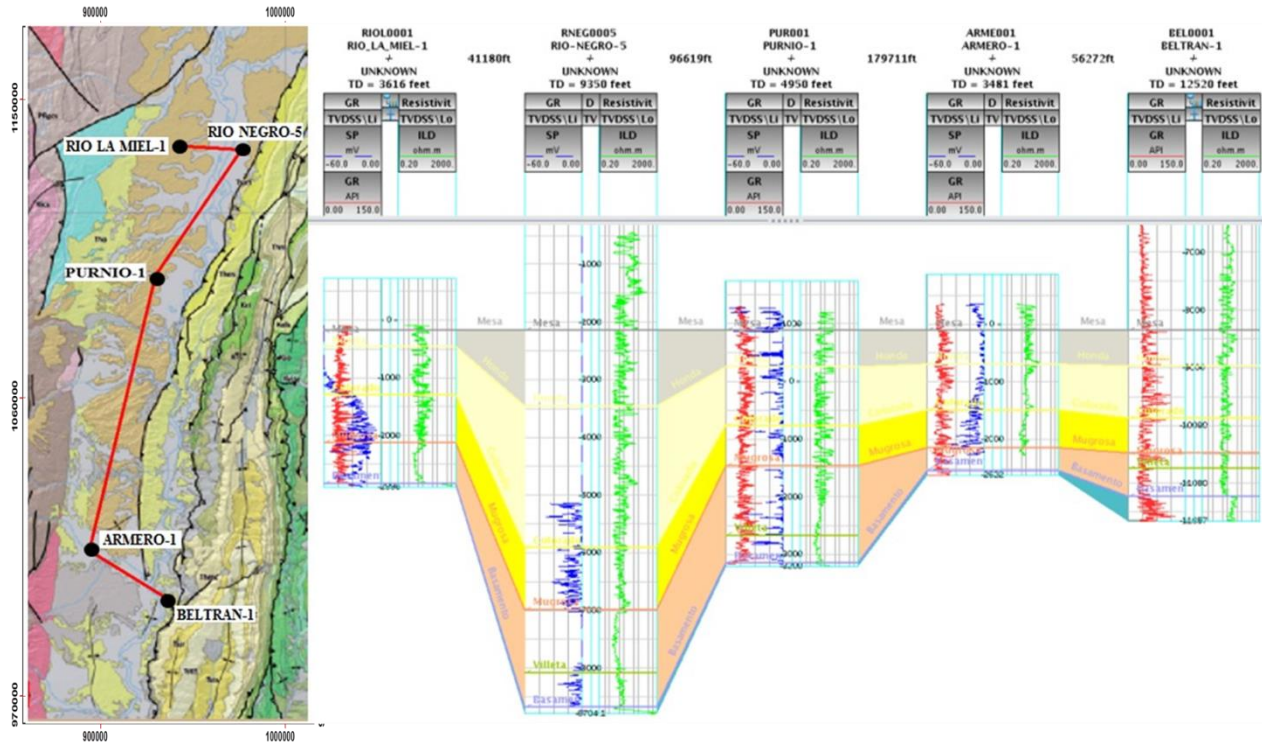
Figura 54. Roca fuente - Posición de la cocina y mapas de expulsión para el Grupo Villeta con un polígono del área de estudio y la Falla de Honda. **A.** Mapa de la anomalía gravimétrica de Bouguer regional. **B.** Mapa de la posición de las cocinas de la cuenca del VMM. **C.** Mapa de hidrocarburo expulsado para la roca fuente cretácica (modificado de Sarmiento et al., 2011).



Con la información de pozos disponibles se realizó una correlación en el bloque yacente con dirección norte a sureste incluyendo los pozos Rio La Miel-1, Rio Negro-5, Purnio-1,

Armero-1 y Beltran-1 (Figura 55). En el bloque colgante solo se tuvo acceso a información reportada a la ANH de pozos perforados antes de 2005 y la información del descubrimiento del pozo Bufalo-1 reportada por Ecopetrol en los medios nacionales de noticias en el año 2019.

Figura 55. Correlación de pozos en el bloque yacente de la Falla de Honda en dirección sur a norte.



En el mapa del elemento roca fuente (Figura 56A) encontramos la posición del Grupo Villeta de acuerdo a la sísmica disponible en la zona para el bloque yacente; en el caso del bloque colgante hay afloramientos de esta unidad desde el sistema de fallas de Cambao hacia el oeste, sin embargo la presencia de rezumaderos se limita a la zona sur donde hay campos no comerciales de aceite y gas con reservorio en la Formación Hoyon (secuencia sísmica D) y la Formación Cimarrona del Cretácico Superior (secuencia sísmica C). El pozo Beltran-1 perforado

en la terminación de la Falla de Honda, Cretácico Superior (secuencia sísmica C) y basamento como se indica en la correlación sur a norte de la Figura 55.

La roca reservorio en el bloque yacente está asociada al Grupo Honda, el cual se encuentra en toda la zona como se muestra en la correlación de pozos con información de registros (Figura 55), adicionalmente en las líneas sísmicas se puede identificar la secuencia sísmica asociada siguiendo los topes como se evidencia en las secciones estructurales.

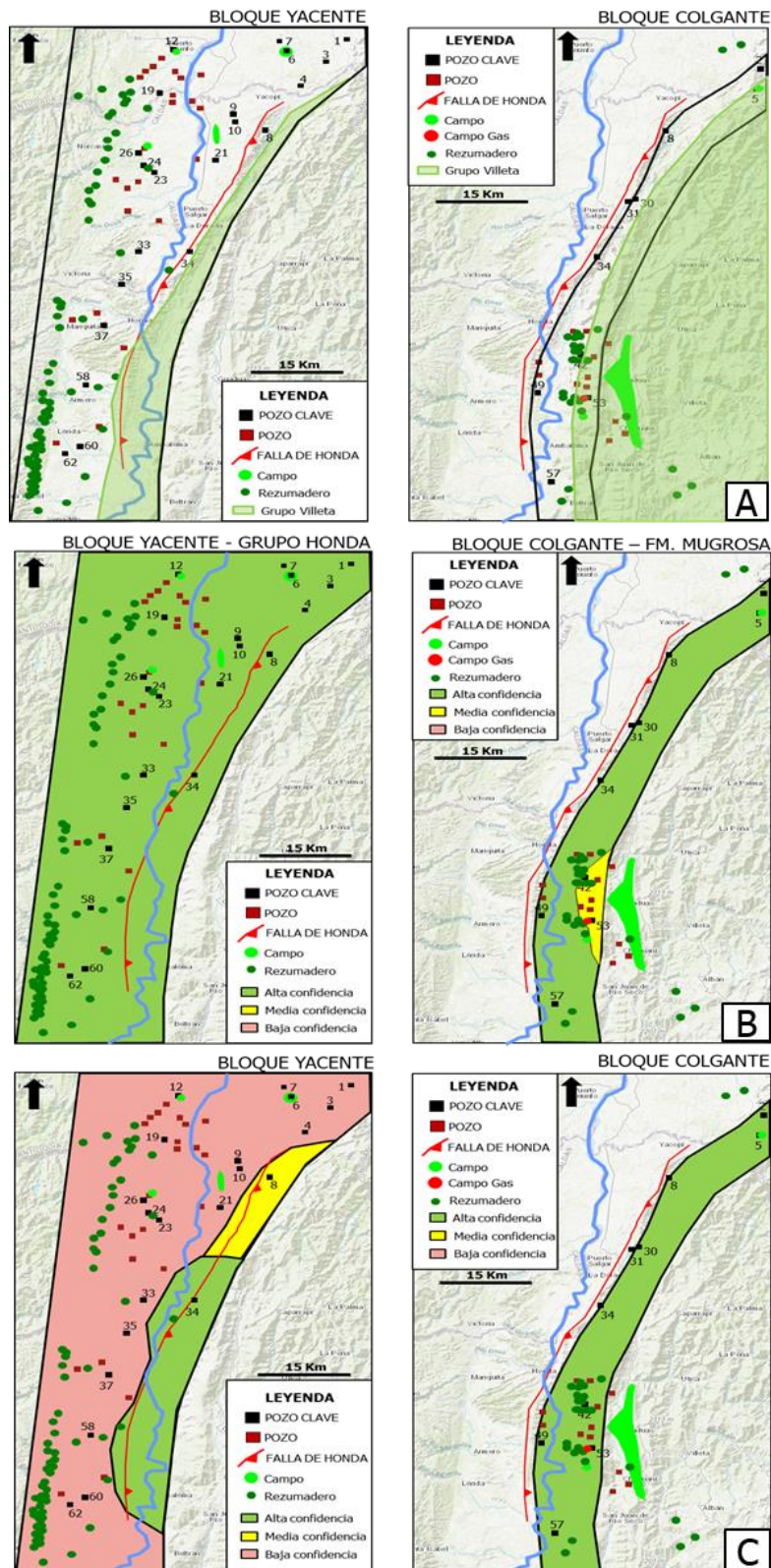
El Grupo Honda como se observa en la correlación se encuentra pinchándose hacia el sur (pozos Armero-1 y Beltran-1) y hacia el oeste (pozo Rio La Miel-1), en los reportes de las memorias geológicas de Puerto Boyacá (Rodriguez y Ulloa, 1994) los pozos localizados al norte describen la presencia del Grupo Honda yaciendo discordantemente sobre el basamento.

La capacidad de reservorio y este tipo de play está probado al sur, en la cuenca del VSM los campos Andalucía, Rio Ceibas y Espino reportan más de 20 Mmbo de producción de aceite con API de 25° donde el reservorio es el Grupo Honda (ANH, 2020). En el bloque colgante la presencia de la Formación Mugrosa en los pozos Quintero-1 y Camacho-2 debe ser confirmada con un reporte de geología, en este trabajo se puede seguir en las líneas sísmicas sin embargo se le asigna media confianza al dato (Figura 56B).

La trampa asociada a la presencia de un cierre en tres direcciones contra la Falla de Honda en el bloque yacente, se evaluó considerando los segmentos de la Falla de Honda y los saltos de falla reportados en la Figura 50, donde la zona en los extremos norte y sur tiene poco salto de falla, esta segmentado y hay dos pozos reportados como secos, por lo tanto a esta zona se le asigno media confianza ya que los pozos fueron perforados con sísmica 2D y aun puede haber opciones de cierre en la zona.

Gran parte del área tiene otro play de tipo estratigráfico, el cual no se evalúa en este estudio, sin embargo, en el contexto regional es importante (Figura 56C). En el bloque colgante la posibilidad de tener un cierre en tres direcciones contra la Falla de Honda puede esperarse en toda el área de interés. El sello en el bloque yacente está representado en el mapa por dos factores: la presencia de capas de lutitas del sistema fluvial del Grupo Honda y la biodegradación se presentan en los mapas. De acuerdo a la información de registros y la imagen sísmica donde se observa el espesor del Grupo Honda la presencia de capas de lutitas se espera en toda el área.

Figura 56. Mapas de elementos para el PFE en la Falla de Honda A. Roca Fuente B. Roca reservorio C. Trampa.



En relación con la biodegradación, se marcó la zona con afloramiento del Grupo Honda (Figura 57A). Para el bloque colgante, el sello está representado en las capas lutíticas intraMugrosa y la biodegradación, los pozos en la zona reportaron manchamiento y hay reportadas acumulaciones no comerciales, probando el play sin embargo la unidad se encuentra aflorando hacia el norte y en la zona centro-sur no hay amarres con pozos como los disponibles para el bloque yacente por eso se le asigna confianza media.

En la zona del pozo Mendez-1 se reportaron manchamientos, sin embargo, se asigna su no presencia de hidrocarburo a la no existencia del sello (Figura 57A).

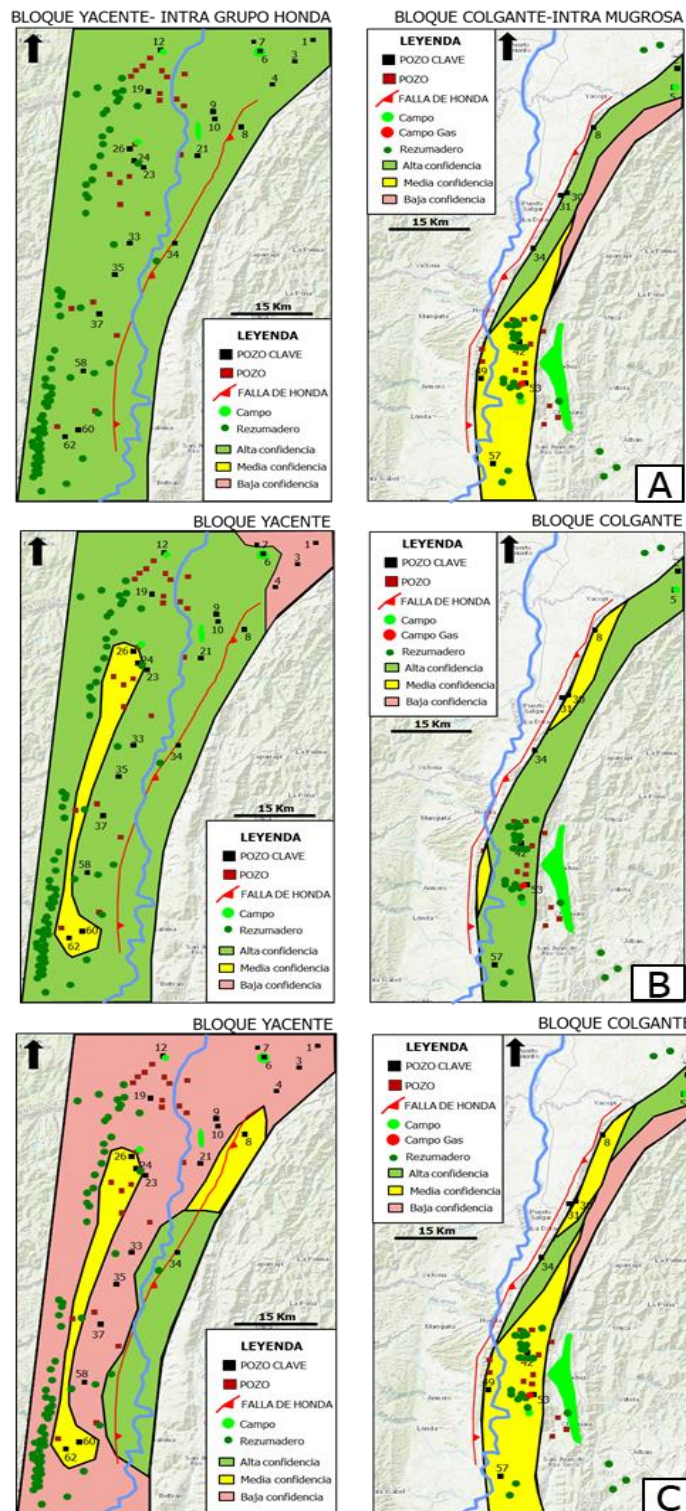
El elemento migración se evaluó con los reportes de manchamiento, descubrimientos, acumulaciones no comerciales o pozos secos. En el bloque yacente, en la parte sur los pozos han sido reportados como secos sin manchamiento.

En la zona occidental cercano a la Cordillera Central hay una amplia presencia de rezumaderos de aceite y los pozos perforados inmediatamente al este están reportados como secos o con manchamientos, podría esto asociarse a la falta de sello porque la ruta de migración funciona (Figura 57B). En el bloque colgante, hacia la zona sur hay alta presencia de rezumaderos sobre el sistema de fallas de Cambao y los pozos perforados reportan manchamientos.

La evaluación del potencial exploratorio del área de estudio asociado a la Falla de Honda a través de los mapas PFE para los sistemas petrolíferos Villeta-Mugrosa en el bloque colgante y Villeta-Honda en el bloque yacente se presenta en la Figura 57C.

El potencial exploratorio convencional de play estructural de cierre en tres direcciones en el bloque yacente está limitado a la zona central en cercanías al pozo Bufalo-1 y en el bloque colgante está asociado a la zona norte en cercanías al pozo Morpho-1.

Figura 57. Mapas de elementos para el PFE en la Falla de Honda A. Roca sello B. Migración C. Mapa integrado final.



6. Discusión

La subcuenca de Honda representa una cuenca intracordillera basculada hacia el este con tendencia homoclinal donde el registro estratigráfico cubre del Paleozoico al Cuaternario, como se ha representado consecutivamente desde Mojica y Franco (1990) evidenciado en la sísmica 2D adquirida en los años ochenta; en dicho trabajo con signos de interrogación se marcan dos rasgos: la posición del despegue de la Falla de Honda desde el basamento como una falla de bajo ángulo y la presencia de un depocentro relleno con depósitos sedimentarios hasta la Formación Guaduas debajo del borde oeste de la Cordillera Oriental (Figura 3a). En este trabajo, se validan estas dos observaciones planteadas por Mojica y Franco (1990) validado por líneas sísmicas 2D adquiridas en los años noventa y cambios en la nomenclatura estratigráfica donde el uso de la Formación Guaduas queda restringido al bloque colgante de la Falla de Honda (secuencia sísmica C) y en el bloque yacente se asocia a la Formación Mugrosa (secuencia sísmica 3).

Los trabajos sobre el borde oeste de la Cordillera Oriental avalan la presencia de estructuras del basamento reactivadas como fallas inversas con sus propias fábricas, las cuales cambian su geometría de propagación desde el Cretácico Inferior, generando varias escamas de cabalgamiento rotadas y afectadas por estructuras compresivas y traspresivas (Cooper *et al.*, 1995; Acosta *et al.*, 2004; Cortes y Angelier, 2006; Cortes *et al.*, 2006; Caballero *et al.*, 2010) en este trabajo dentro del SFM estas consideraciones son tenidas en cuenta; sin embargo para la Falla de Honda se propone un *shortcut* del basamento en una relación rampa-plano sencilla a diferencia de lo expuesto por Cortes (2004) donde hay al menos dos relaciones rampa-plano con el sinclinal de Guaduas asociado (Figura 3b) y el trabajo de Tesón *et al.* 2013 donde la Falla de Honda está vinculada a una escama del basamento (Figura 16b).

El área de interés alrededor de la Falla de Honda tiene una amplia nomenclatura estratigráfica reportada en bibliografía y cartografía geológica, el primer paso para construir los esquemas estratigráficos y estructurales en la zona de interés a partir del marco tectonoestratigráfico (Figura 4) abarco una unificación en la nomenclatura a utilizar junto a una separación en unidades coetáneas entre el bloque colgante y el bloque yacente de la Falla de Honda. A partir de esta unificación se definieron las secuencias estratigráficas con sus respectivos espesores y a nivel estructural se especificaron las características del basamento, las zonas con particularidades geológicas para tenerlas en cuenta en la relación geométrica dentro del SFM y los niveles de despegue para considerar en las secciones estructurales.

En general la zona de estudio se encuentra entre dos basamentos los cuales no se encuentran aflorando, en el bloque yacente constituido por el batolito de Ibagué de edad Jurásica de acuerdo a los pozos perforados y en el bloque colgante formado por las unidades del Macizo Quetame y Floresta de edad Paleozoica. El límite entre estos dos tipos de basamento no es identificable ni en la sísmica ni en la gravimetría disponible (Figura 54). Esto tiene sus implicaciones en el comportamiento esperado para el basamento a nivel de reología y geometría, comportamiento plástico asociado a batolitos o comportamiento frágil asociado a rocas sedimentarias con metamorfismo de bajo grado. La historia tectónica de la zona indica que el SFM representa las fallas en el borde de la cuenca extensional de retroarco definida para el Cretácico temprano, por lo tanto, estas fallas tienen una fábrica propia en el campo de la deformación frágil. La presencia en el bloque colgante de la Formación Murca (Figuras 5 y 41) de edad Cretácica inferior vinculada al proceso extensivo pone un límite al modelo estructural relacionado a la posición más alta del basamento indicando una guía regional.

Los niveles de despegue en el SFM corresponden al basamento, diferentes niveles arcillosos reportados en el Grupo Villeta y niveles arcillosos reportados intra-Formación Mugrosa. Adicionalmente, en el modelo la Falla de Honda tiene una buena definición en las imágenes sísmicas, hay presencia de afloramientos de unidades cretácicas a cenozoicas en el SFM y hay una recopilación de datos estructurales en el bloque colgante.

Las secuencias estratigráficas determinadas en los bloques yacente y colgante de la Falla de Honda se agruparon bajo periodos de tiempo iguales y una misma relación tectonoestratigráfica de acuerdo al alcance bibliográfico de este estudio. Incluyendo información de pozos, sobre la línea sísmica TP-95-1402 se definieron horizontes sísmicos e identificaron concretamente cinco secuencias sísmicas (Figura 32) a las cuales se les asignó números del 1 al 6 para el bloque yacente y letras de la A - F para el bloque colgante con la misma paleta de colores. Las variaciones en los espesores a lo largo de la zona de estudio fueron establecidas unificando el espesor máximo y mínimo o espesor total definido bibliográficamente. Así para la secuencia sísmica C se reporta un espesor mínimo de 1020 m y un espesor máximo de 2570 m y en el caso de la secuencia 5 se reporta un espesor total de 1600 m. En las secciones estructurales tener un control sobre los espesores representa un control sobre las líneas regionales base.

Trabajos previos sobre la Falla de Honda inferían que según los rasgos geomorfológicos se podían diferenciar dos segmentos (modificado de Caballero *et al.*, 2013), los cuales eran un segmento norte, paralelo a la trayectoria del río Magdalena con un rumbo N10E y un segmento sur, el cual tiene una dirección N-S y en general en el bloque colgante las unidades se encuentran buzando 10° al oriente. Este tipo de segmentación norte-sur se observa en las otras estructuras del SFM involucrando unidades más antiguas del Cretácico y formando estructuras sinclinales como se evidencia en el mapa geológico. Esta segmentación podría estar asociada a la presencia

de un sistema de fallas con dirección N60E como la falla de Viani, lo cual ha sido reportado por Moretti *et al.* (2010) y Bayona *et al.* (2013).

En este trabajo a partir de las características geomorfológicas basadas en la cartografía, las imágenes de satélite (Figura 49) y el diagrama de relación del salto de falla en superficie (Figura 51) se determinó que el trazo irregular de la Falla de Honda es de 103 Km con una orientación de NNE-SSW a NE-SW, el ancho de la falla varia a lo largo del rumbo entre 200 m a 1.5 km y los valores del salto de falla en superficie están entre 0 y 450 m, esto permitió dividir la Falla de Honda en tres segmentos:

- (I) El segmento 1 localizado desde el borde sur hasta la localidad de Sequile tiene suaves colinas con el Grupo Honda aflorando en el bloque colgante con buzamientos de 12° hacia el SE y la Formación Mesa en el bloque yacente en posición horizontal, de acuerdo al perfil el levantamiento en este sector es menor a los 100 m, en la imagen DEM puede inferirse la presencia de un lineamiento en dirección W-E en esta zona donde el tramo del río Magdalena es recto en 2 km y puede extenderse al límite del segmento, sin embargo en la sismica no está reportado ningún rasgo estructural con estas características.
- (II) El segmento 2 corresponde a la mitad de la Falla de Honda y presenta los rasgos morfológicos con mayor levantamiento con alturas de 650 m. En el bloque yacente se presentan rasgos morfológicos como coluviones donde la topografía llega a 350 m. En este sector el río Magdalena discurre paralelo al rumbo de la falla. El salto de la falla alcanza 450 m frente a la población de Honda donde el Grupo Honda aflora en el bloque colgante y en el bloque yacente la Formación Mesa alcanza 300 m de espesor en capas horizontales. Este segmento presenta una forma de zigzag a lo largo del

rumbo y en los límites puede observarse como la topografía disminuye en el bloque colgante.

- (III) El segmento 3 en la zona norte cubre 30 km aproximadamente, el río Negro va paralelo al trazo de la Falla de Honda en la zona de la cordillera. La topografía en el bloque colgante va disminuyendo paulatinamente hasta perder la expresión morfológica, el mayor salto equivale a 300 m donde el Grupo Honda se encuentra aflorando con buzamientos de 12 a 22° al SE.

Considerando esta nueva propuesta sobre la segmentación de la Falla de Honda avalada por los rasgos geomorfológicos del área se realizaron tres secciones estructurales cada una asociada a un segmento, bajo la nomenclatura sección Norte, Central y Sur.

Teniendo claridad sobre las secuencias sísmicas en los mapas geológicos sobre las secciones, la naturaleza del basamento, los niveles de despegue, los horizontes sísmicos y los espesores de las secuencias sísmicas en los bloques yacente y colgante de la Falla de Honda.

Las fallas de Cambao y Bituima tienen su despegue en el basamento con un ángulo de corte cercano a los 40°, están vinculadas a un proceso de inversión tectónica dentro del mismo proceso de deformación de la faja plegada y corrida en un estilo estructural de piel gruesa como lo han mostrado diferentes autores (Cortes *et al.* (2006); Caballero *et al.* (2013) y Tesón *et al.* (2013)). En este trabajo se tienen las mismas consideraciones estructurales donde las formaciones de los sinclinales de Córdoba, Guaduro y Guaduas respectivamente para cada sección está vinculado a una falla ciega de basamento. En la sección Sur un componente de rumbo se puede asociar a la Falla de Cambao.

En este trabajo se realizó una interpretación sobre las fallas de la zona asociadas al SFM como también a las estructuras anticlinales y sinclinales consolidados en el mapa geológico para

cada sección, estas estructuras tienen longitudes de onda de 2 a 5 Km y su extensión alcanza de 3 a 20 Km reflejando que la Falla de Bituima y Cambao están conformadas por un sistema de fallas, así por ejemplo en la sección Sur la falla del Alto del Trigo está asociado al sistema de Fallas de Bituima. Estas fallas fueron reflejadas en las secciones estructurales como *splays* de las fallas principales (Falla de Cambao, Falla de Bituima) y se relacionan a una alta deformación presentada en la zona con numerosos sistemas de despegues en el Cretácico.

Desde el punto de vista cinemático no se cuentan con indicadores clásicos (mediciones de los planos de falla particularmente estrías o estructuras S-C), se tienen pliegues con direcciones N10E a N30E y los cabalgamientos dispuestos en la misma dirección indicando el movimiento inverso.

La conversión a profundidad de las tres secciones estructurales partió de las velocidades interválicas calculadas a partir de los registros de velocidades de los pozos para cada secuencia sísmica (Figura 33). Usando en el módulo *Depth Conversion* del software 2D Move los valores de las velocidades interválicas calculados entre 1515 m/s a 2966 m/s, velocidades esperadas dentro de una secuencia siliciclástica, se generó una conversión de todos los elementos de las secciones estructurales (Figura 34).

Las secciones estructurales permitieron determinar que la Falla de Honda está asociada a un sistema híbrido con deformación de piel gruesa y piel delgada. La geometría de despegue de la Falla de Honda en el SFM corresponde a una falla fuera de secuencia como un *shortcut* del basamento, evidenciado en las líneas sísmicas y en el modelo estructural donde se combinan datos de buzamientos y mapas geológicos.

La Falla de Honda comienza con un ángulo de corte de 30° en el basamento, el cual cambia en la secuencia sedimentaria a un ángulo de corte de 15° formando un pliegue de flexión

de falla tipo *multi bend fault bend concave upward (syncline) bend* con diferentes niveles de despegue, cambios en los ángulos de buzamiento de la falla y varias bandas *kink* asociadas. La segmentación apreciada en superficie integrada a la interpretación sísmica y relaciones geométricas permitió identificar particularidades en el trazo de la falla.

En la Sección Norte vinculada al segmento 1, se presenta un salto de falla en superficie hasta los 250 m, el nivel de despegue se encuentra en la parte superior de la secuencia sísmica cretácica, el pliegue es suave con un *backlimb* buzando de 10° hacia el oeste y el ángulo de corte después del plegamiento (β) llega a 22°.

En la Sección Central, la Falla de Honda tiene su mayor desplazamiento en cercanías al municipio de La Dorada, donde pone en contacto unidades del Oligoceno con los estratos de la Formación Mesa (Plio-Pleistoceno). El salto de la falla en superficie en este segmento 2 alcanza los 520 m. La Falla de Honda tiene su despegue en la zona central de la secuencia sísmica cretácica, presenta un *splay* con nivel de despegue intra-Formación Mugrosa y tiene el valor más alto de acortamiento con 40% entre las tres secciones.

La Sección Sur asociada al segmento tres tiene un salto en superficie de 260 m y su nivel de despegue pasa a un nivel más somero dentro de la Formación Mugrosa. La configuración del SFM cambia en esta zona sur debido al efecto de transpresión asociado a la falla de Viani y la evidencia en sísmica de un sistema de fallas normales en la zona más profunda del bloque yacente que no fueron afectadas por la deformación.

En las secciones estructurales la Formación Mesa de edad Plioceno se encuentra cortada por la Falla de Honda, adicionalmente en el informe de Zonificación de Amenaza por movimientos en Masa Tipo Flujo en la Cuenca del Río Combeima – Ibagué – Tolima (Ingeominas, 2005) se reportaron dos tasas de movimiento diferentes inferiores a 1 mm/año, con

un último movimiento de la falla reportado en el Holoceno asociado a terrazas compensadas. Esto confirma la presencia de una falla activa asociada a los cambios en la geometría de convergencia de las placas como es descrito por diferentes autores (Mantilla-Pimiento *et al.*, 2009; Vargas *et al.*, 2011; Bayona *et al.*, 2013)

Se calculó el acortamiento de 31% a 40% variando de sur a norte relacionado a la segmentación de la falla a lo largo del rumbo evidenciado en las tres secciones estructurales y a través del diagrama del sentido de la falla (Figura 52) se confirmó el componente de cabalgamiento y transpresión con una dirección de esfuerzo principal es NW-SE con rumbo en las estructuras N20E.

En cuanto al potencial exploratorio, la subcuenca de Honda ha sido explorada a través de noventa pozos exploratorios desde 1921, siendo el último, el pozo Bufalo-1 perforado por Ecopetrol en 2017 (ANH, 2020) mostrando el interés que aún se tiene sobre este sector del VMM. Sarmiento (2011) en su trabajo sobre el potencial exploratorio convencional de la cuenca se enfoca en la zona central asociada al área de Barrancabermeja, sin embargo nos da información sobre la presencia y funcionamiento de los diferentes elementos del sistema petrolífero en esta zona.

En este trabajo, se evaluaron a través del PFE dos sistemas petrolíferos convencionales y tradicionales asociados a la Falla de Honda Villeta-Mugrosa (bloque colgante) y Villeta-Honda (bloque yacente) con un *play* de cierre en tres dimensiones contra la falla. La presencia del reservorio es el elemento con menor riesgo y la presencia de una trampa representa el mayor riesgo. Aún bajo estas condiciones hay un potencial exploratorio convencional y tradicional en la zona central del bloque yacente y en la zona norte del bloque colgante. En la subcuenca de Honda, aún hay un potencial estratigráfico por evaluar el cual estaría vinculado a la adquisición

de sísmica 3D y un potencial de hidrocarburos no convencionales asociado a mejores condiciones en el precio del crudo e instancias legales.

7. Conclusiones

La Falla de Honda es una falla inversa de bajo ángulo asociada a un pliegue de flexión de tipo *multi bend fault bend concave upward (syncline) bend* con una magnitud de deslizamiento de 1.0 a 1.2 con una componente de transpresión en sentido dextral y una dirección de esfuerzo principal NW-SE con rumbo en las estructuras N20E.

De acuerdo a las secciones estructurales, la FPC está asociada a un sistema híbrido con deformación de piel gruesa y piel delgada. La geometría de despegue de la Falla de Honda en el SFM corresponde a una falla fuera de secuencia como un *shortcut* del basamento, evidenciado en las líneas sísmicas y en el modelo estructural donde se combinan datos de buzamientos y mapas geológicos.

La Falla de Honda tiene al menos tres segmentos identificados a través del perfil del salto de falla, datos de geomorfología, bibliografía y los valores extraídos de las secciones estructurales.

La Falla de Honda en las secciones norte a central aumenta su acortamiento de 36% a 41%, asociado a una mayor deformación en el sector central como lo evidencia la formación de un splay en el sistema, donde se presenta el potencial exploratorio en el bloque yacente. En la sección sur el acortamiento en la Falla de Honda cae a 31% donde el despegue en el sistema de

piel delgada cambia del nivel intraCretácico a un nivel intraMugrosa y el salto de la falla disminuye, evidenciando la segmentación de la falla.

A través del PFE se evaluó el potencial exploratorio asociado a la Falla de Honda en los sistemas petrolíferos Villeta-Mugrosa en el bloque colgante en el play estructural de cierre en tres dimensiones contra falla donde el potencial exploratorio está asociado al segmento norte de la falla y el sistema petrolífero Villeta-Honda en el bloque yacente con el play estructural de cierre en tres dimensiones con un potencial exploratorio limitado al segmento central.

Referencias Bibliográficas

Acosta, F. y Obando, E. (1984): Desarrollo estructural del Extremo Sur del Valle Medio del Magdalena. XXIII Reconocimiento Geológico. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Bogotá.

Acosta, J. y Ulloa, C. (2001): Memoria Explicativa de la Geología de la plancha 208 Villeta. Escala 1:100.000. Ingeominas. 1-84.

Acosta, J., Lonergan, L y Coward, M. (2004): Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. Journal of South American Earth Sciences. 17. 181-194.

Amaya, E., Mariño, J y Jaramillo, C. (2010): Litofacies y ambientes de acumulación de la Formación Guaduas en la parte central de la Cordillera Oriental-Implicaciones paleogeográficas. Boletín de Geología 32. 1. 13-25.

Angelier, J. (1994): Fault Slip Analysis and Paleostress Reconstruction. Continental Deformation. 4. 101-120.

ANH (2012): Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos Pozo: Infantas-1613, Evaluación Petrofísica ShaleXpert. Pozos: Catalina-1 y Cocuyo-1. Unión temporal Halliburton – Agencia Nacional de Hidrocarburos. 1-70.

ANH (2014): Disponible en <http://www.anh.gov.co/Banco%20de%20informacion%20petrolera/EPIS/Paginas/Seleccion-de-datos.aspx>.

ANH (2020): Geoportal ANH. <http://www.anh.gov.co/Geoportal/Paginas/default.aspx>

Ariana Ltda., Geólogos Consultores. (2009): Cartografía geológica del Valle Medio del Magdalena. Ecopetrol.

Ballesteros, C y Parra, J (2012): Estudio estratigráfico secuencial para la Formación La Luna en el costado oriental de la cuenca del valle Medio del Magdalena: Una visión exploratoria de hidrocarburos no convencionales. Trabajo de grado. UIS. 1-125.

Barrero, D. y Vesga, J. (1976): Mapa Geológico del Cuadrángulo K-9 Armero y mitad sur del J-9 La Dorada. Bogotá. Ingeominas. Esc. 1:100.000.

Barrero, D. y Vesga, J. (1976): Geología de la plancha 207 – Honda. Ingeominas. Esc. 1:100.000.

Barrero, D. y Vesga, J. (1976): Geología de la plancha 226 – Libano. Ingeominas. Esc. 1:100.000.

Barrero, D. y Vesga, J. (1976): Geología de la plancha 188 – La Dorada. Ingeominas. Escala 1:100.000.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. y Martínez, J. (2007): Colombian Sedimentary basins. Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá. Agencia Nacional de Hidrocarburos. 1-91.

Bates RL y Jackson J.A. (1987): Glossary of geology, 3rd edition. American Geological Institute, Alexandria. Virginia. 1-788.

Bayona, G., Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Ojeda, G., Valencia, V. (2011): Intraplate subsidence and basin filling adjacent to an oceanic arc-continental collision; a case from the southern Caribbean-South America plate margin. *Basin Research*. 23. 403-422. Doi:10.1111/j.1365- 2117.2010.00495.x

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahecha, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jiménez, G., Mesa, A., and Valencia, V. (2013): Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean – South American collision in early Palaeogene time. In: *Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion*. (Nemcok, M., Mora, A.R., and Cosgrove, J.W. Eds.). *Journal of the Geological Society of London. Special Publication*. 377.

Bayona, G. (2018): El inicio de la emergencia de los Andes del norte: Una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 42. 165. 364-378.

Bermudez, H. (2004): Estratigrafía del Grupo Olini en el borde occidental de la Cuenca del valle Superior del Magdalena, Colombia. *Universidad Autónoma de México. Reporte Interno*. 1-37.

Benavente, V. y Burrus, M. (1988): Wrench Faults in the Upper Magdalena Valley in Colombia. *Symposium Exploration y Production Colombia. International Division.- III Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Caracas*.

Borrero, C. A., Rosero, J., Pardo, A y Valencia, J (2008): "La Secuencia volcanoclástica de Aránzazu: registro del impacto del volcanismo en un sistema fluvial neógeno en la parte media de la cordillera central, Colombia." Boletín de geología 30. 2. 61-76.

Boyer, S y Elliot, D (1982): Thrust systems. American Association Geological Bulletin 66: 1196-1230.

Caballero, V., Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L. y Quintero, I. (2013): Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. En Nemcok, M., Mora, A. y Cosgrove, J. W. (Eds.). Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society London Special Publications 377. 343–367.

Caballero, V. (2015): Evolución paleoambiental del Grupo Honda en el sector sur de la Cuenca del valle medio del Magdalena entre las poblaciones de Mariquita y Venadillo, Tolima. Tesis de Maestría. UIS. 1-112.

Caballero, V., Rubiano, J., Clavijo, J y Sandoval, J. (2015): Procedencia en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena durante el Cenozoico: Determinaciones con base en el Análisis Cuantitativo de Paleocorrientes. Boletín de Geología 38. 1. 73-86.

Cáceres, C y Etayo-Serna, F. (1969): Bosquejo geológico de la región del Tequendama. Opúsculo guía de la excursión pre-congreso, I Congreso Colombiano de Geología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá. 23.

Castro, R y Gordillo, G (2005): Historia y criterios empíricos en la aplicación de inyección de agua en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Tesis Universidad de Las Américas.

Champetier, G; *et al.* (1961): Mapa geológico de la plancha K-10 Villeta. Servicio Geológico Nacional. Bogota.

Chester, Chester, J. S., Logan, J. M. y Spang, J. H. (1991): Influence of layering and boundary conditions on fault-bend and fault-propagation folding. GSA Bull. 103.1059-1072.

Cooper, M., Williams, D., de Graciansky, P., Murphy, W., Needham, D., de Paor, D., Stoneley, R., Todd, S., Turner, J and Ziegler, P. (1989): Inversion tectonics - a discussion. Geological Society of London. Special Publications 44. 335-347.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., and Taborda, A. (1995): Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 79. 10. 1421-1443.

Cortés, M. (2004): Evolution Structurale du Front Centre-Occidental de la Cordillère Orientale de Colombie. Ph.D. Thesis. Université Pierre et Marie Curie. Paris. 1-350.

Cortes, M y Angelier, J. (2006): Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. Tectonics. 24. 1-27. [doi:10.1029/2003TC001551](https://doi.org/10.1029/2003TC001551)

Cortés, M., Bernard C. y Angelier, J. (2006): Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia, *Journal of South American Earth Sciences*. 21. 437–465.

Cristalini, E. (1998): *Apuntes de Geología, Introducción a las Fajas Plegadas y Corridas*. Universidad de Buenos Aires. 1-114.

Dahlstrom, C (1970): Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin Canadian Petroleum Geology*. 18. 332–406.

Diaz Poveda, L. (2016): *Evolución Sedimentaria y Estructural del Eoceno Superior, Cordillera Oriental de Colombia, Suramerica*. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. 1–190.

Dueñas, H y Castro, G (1981): Asociación palinológica de la Formación Mesa en la región de Falán, Tolima, Colombia. *Geología Norandina*. 3. 27-36.

Ego, F., Sebrier, M., Lavenu, A., Yepes, H. y Eugues, A. (1996): Quaternary state of stress in the northern Andes an restraining bend model for the Ecuadorian Andes. *Tectonophysics* 295. 101–116.

Etayo, F, Renzoni, G. y Barrero, D. (1969): Contornos sucesivos del mar Cretáceo en Colombia. *Memoria Primer Congreso Colombiano de Geología*, 217-252. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Etayo Serna F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Urrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, r., Núñez, A., Álvarez, J., Ropain, C., Cardozo, E., Galvis, N., Sarmiento, L., Albers, J., Case, J., Singer, D., Bowen, R.,

Berger, B., Cox, D., y Hodges, C. (1983): Mapa de terrenos geológicos de Colombia: Ingeominas, Publicación Especial. Santafé de Bogotá (Colombia). 14-1. 235.

Fabre, A (1987): Tectonique et Génération d' Hydrocarbures: Un Modèle de l'Évolution de la Cordillère Orientale de Colombie et du bassin des Llanos Pendant le Crétacé et le Tertiaire. Arch. Sc. Genève. 40. 2. 145-190.

Francis, A. (2018): A Simple Guide to Seismic Depth Conversion. Part I: A simple guide to the parameters involved in seismic depth conversion - a complex but important subject in geophysical seismic processing. GeoExpro 15. <https://www.geoexpro.com/articles/2018/05/a-simple-guide-to-seismic-depth-conversion-i>

Forum, A. (2018): An introduction to Play Fairway Evaluation (PFE). <https://www.linkedin.com/pulse/introduction-play-fairway-evaluation-pfe-alan-foum>

Frank, J., Cook, M y Graham, M. (2008): Hydrocarbon Exploration and Production. 2nd Edition. Developments in Petroleum Science. 55. Elsevier. Aberdeen. UK.

García, D.F., Parra, P., Sotelo, C., López, C., Suarez, M., Mora, C. y Sarmiento, L.F. (2003): Modelo de generación, cálculo de reservas y procesos de biodegradación y evaluación de ocurrencia de crudos pesados en la Cuenca VMM. Tomo I Parte I Expulsión de petróleo en el Valle Medio del Río Magdalena (VMM) Una aproximación al cálculo de reservas remanentes. Informe final.: Piedecuesta, Empresa Colombiana de Petróleos Instituto Colombiano del Petróleo División de Exploración Área Geoquímica. 1- 89.

Garay, J y Ulloa, C. (2001): Geología de la plancha 208 Villeta. Memoria Explicativa. Ingeominas. 1-84.

Gómez, E. (2001): Tectonic controls on the Late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia [Tesis Doctoral]: Cornell University.

Gómez, J. y Núñez, A. (2003): Las metasedimentitas de Santa Teresa y la edad del Complejo Cajamarca (Cordillera Central, Departamento del Tolima- Colombia). En: IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín. Resúmenes. 35-36.

Gómez, E., y Pedraza, P. (1994): El Maastrichtiano de la región de Honda - Guaduas, límite norte del Valle superior del Magdalena: Registro sedimentario de un delta dominado por ríos trezados. En: Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena, (Etayo Serna, F. Ed.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Capítulo III. 1 -20.

Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S., and Heizler, M. (2003): Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin. Geological Society of America Bulletin. 115: 131-147.

Gómez, J., Nivia, Á, Montes, N.E., Almanza, M.F., Alcárcel, F.A. & Madrid, C.A. (2015): Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015. Servicio Geológico Colombiano. Publicaciones Geológicas Especiales 33. 9–33. Bogotá.

Govea, C. y Aguilera, H. (1985): Cuencas sedimentarias de Colombia. Memorias VI Congreso Latinoamericano de Geología. T2. Bogotá.

Grant, S., Milton, N y Thompson, M. (1996): Play fairway analysis and risk mapping: an example using the Middle Jurassic Brent Group in the northern North Sea. Norwegian Petroleum Society Special Publications. 6. 197-181.

Griem, A (1997): www.geovirtual.cl tomado de Ramsay, J y Huber, M (1987) Modern Structural Geology (2): Folds and Fractures. Academic Press, London.

Groshong, R. (2006): Structural Validation, Restoration and Prediction. 3-D structural geology: a practical guide to quantitative surface and subsurface map interpretation. Birkhäuser. 305–372.

Guerrero, J y Sarmiento, G. (1996): Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. Geología Colombiana. 20. 3 – 66.

Hettner, A. (1892): Die Kordillere von Bogotá. Pettermanns Mitteilungen. Ergänzungsheft 1 04. Justus Pertha. Gotha. 1-229.

Hernández López, G (2011): Métodos para obtener modelos de velocidad para la conversión Ingeniería y Arquitectura. 1-95. tiempo - profundidad. Tesis Ingeniero Geofísico. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. 1-95.

Horton, B. (1999): Erosional control on the geometry and kinematics of thrust belt development in the Central Andes: Tectonics. 18. 6. 1292-1304.

Hubach, E. (1951): Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Informe No. 785, Servicio Geológico Nacional. Publicado en 1958 en el Boletín Geológico 5. 2. 93-112. Instituto Geológico Nacional. Bogotá.

Hubach, E. (1957): Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Informe 1212. Servicio Geológico Nacional. Bogotá. 1-158.

Hunt, J. M. (1996): Petroleum geochemistry and geology, Second edition, W. H. Freeman and Company. New York. 1-743.

Ingeominas (2005): Zonificación de Amenaza por movimientos en Masa Tipo Flujo en la Cuenca del Río Combeima – Ibagué - Tolima. Proyecto Colombia – Suiza de prevención de desastres Glacio-Volcánicos e Hidro-Metereologicos. 1-45.

International Commission on Stratigraphy, 2018. Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; actualizada). Traducción al castellano de J.C. Gutiérrez-Marco en colaboración con: The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.

Julivert, M., Barrero, D., Botero Arango, G., Duque Caro, H., Hoffstetter, R., Navas, J., de Porta, J., Robbins, R.K., Taborda Arango, B., Téllez, N., Zamarreño e Julivert, I. (1968): Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine Colombia Premiere Parte). Centre National de la Recherche Scientifique. 5. 4a. Colombie, 1-651.

Kane, S., Williams, G., Buddin, T., Egan, S, y Hodgetts, D. (1997): Flexural-slip based restoration in 3D a new approach. American Association Petroleum Geologist Annual Convention Official Program. A 58.

Kim, YS y Sanderson, D (2005): The relationship between displacement and length of faults: a review. Earth Sciences Reviews 68. 317-334.

Kristoffersen, S. (2010): PBE – Play based exploration. Data Analytics. 1-56.
<https://www.slideshare.net/StigArneKristoffersen/pbe-play-based-exploration>

Lamus, F., Bayona, G., Cardona, A. y Mora, A. (2013): Procedencia de las unidades cenozoicas del Sinclinal de Guaduas: Implicación en la evolución tectónica del sur del Valle Medio del Magdalena y Orógenos adyacentes. *Boletín de Geología* 35. 1. 17-42.

Llanos, D. y Camargo, G. (1997): Interpretación Estructural del Foco Sísmico de Pulí, Cundinamarca – Colombia. Informe interno ANH. 1-29.

Lozano, E y Zamora, N. (2014): Anexo N. Compilación de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Servicio Geológico Colombiano. 1-25.

Macellari, C. (1988): Cretaceous paleogeography and depositional cycles of western South-America, *Journal of South American Earth Sciences*.1. 373-418.

Magoon, L y Dow, W. (1994): The petroleum system—from source to trap: AAPG Memoir 60. In American Association of Petroleum Geologists. USA. 3-4.

Mantilla –Pimiento, A., Jentzsch, G., Kley, J y Alfonso Pava, C. (2009): Configuration of the Colombian Caribbean Margin: Constraints from 2D Seismic Reflection data and Potential Fields Interpretation. *Subduction Zone Geodynamics*. 1- 26.

Martinez, J. y Vergara, L. (1997): La sucesión Paleoambiental del Cretácico de la Región de Tequendama y Oeste de la Sabana de Bogota, Cordillera Oriental Colombiana. *Geología Colombiana* 24. 107–147.

Marsden, D. (1992): V (sub o)-K method of depth conversion, *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*. 11. 8. 53-54.

Maya, M. (1992): Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. Boletín Geológico. 32: 127-187.

Maya, M y González, H (1995): "Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia." Boletín Geológico, Ingeominas 35. 2-3. 43-57.

McClay, K. (1992) Glossary of thrust tectonics terms. Thrust Tectonics. 419-433.

McCarthy, K., Rojas, K., Niemann, M., Palmowski, D., Peters, K., y Stankiewicz, A. (2011): La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras. Traducción del artículo publicado en Oilfield Review. Schlumberger.

Means, W.D. (1990): Kinematics, stress, deformation and material behavior. Journal of Structural Geology. 12. 8. 953-971.

Mojica, J y Franco, R. (1990): Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena, Colombia. Geología Colombiana. 17. 41-64.

Morales, L. G., Podesta, D. J., Hatfield, W. C., Tanner, H., Jones, S. H., Barker, M. H., Odonoghue, D. J., Mohler, C. E., Dubois, E. P., Jacobs, C., & Goss, C. R. (1958): General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley. Colombia. In: L. G. Weeks ed. A symposium conducted by A.A.P.G.: Habitat of Oil. 641-695.

Moreno, M. (1989): Petrography of the lower Cretaceous Rosablanca and Cumbre Formations, Utica Sandstone and Murcia Sandstone (Murcia Formation), Cordillera Oriental, Colombia. MSc Thesis. University South Carolina.

Moreno, M. (1991): Provenance of the Lower Cretaceous Sedimentary Sequences, Central Part, Eastern Cordillera, Colombia. Revista Academia Colombiana de Ciencias. 18. 1-69.

Moreno Sanchez, M., Gomez, A y Castillo, H. (2008): Ocurrencias de fósiles paleozoicos al este de la parte norte de la cordillera Central y discusión sobre su significado geológico. Boletín de Ciencias de la Tierra. Edición especial 22. 39 - 48.

Moretti, I., Rodriguez, G., Mayorga, M. y Mondragon, J. (2010): Integrated exploration workflow in the south Middle Magdalena Valley (Colombia). Journal South American Earth Sciences. 29. 2. 180-197.

Morley, C. K. (1988): Out of Sequence Thrusts. Tectonics. 7. 539-561.

NASA (2007): <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.

Nelson, H. W. (1957): "Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the section between Ibagué and Cali." Leidse Geologische Mededelingen 22: 1-76.

Nelson, H. W. (1962): Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia, sección entre Ibagué y Armenia. Bogotá, Bol. Geol. 10. 1-3. 161-202.

Nivia, A. (2001): Mapa Geológico del Departamento del Valle. Memoria explicativa. Cali. Ingeominas: 148.

Núñez, A. (1986): Petrogénesis Del Batolito de Ibagué. Geología Colombiana 15. 35-45.

Nuttall, C. (1990): A review of the Tertiary non-marine molluscan faunas of the Pebasian and other inland basins of north-western South America: Bulletin of the British Museum of Natural History (Geology Series). 45. 2. 165-371.

Ochoa, D., Hoorn, C., Jaramillo, C., Bayona, G., and De la Parra, F. (2012): The final phase of tropical lowland conditions in the axial zone of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence from three palynological records. *Journal of South American Earth Science*. 39: 157-169.

Pace, P y Calamita, F. (2015): Coalescence of fault-bend and fault-propagation folding in curved thrust systems: an insight from the Central Apennines, Italy. <https://doi.org/10.1111/ter.12146>

Pérez, G. y Valencia, M. (1977): Evaluación geológica del Valle Medio del Magdalena. Informe 588. División Exploración Departamento Geología Ecopetrol. Bogotá.

Petters, V. (1954): Tertiary and Upper Cretaceous foraminifera from Colombia, S. A. *Centr. Cush. Found. Foram. Res.* 5-1. 9. 37-41. Bogotá.

Pfiffner, A. (2017): Thick-Skinned and Thin-Skinned Tectonics: A Global Perspective. Disponible en: [doi:10.20944/preprints201707.0020.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201707.0020.v1)

Poblet, J. (2004): Geometría Cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*. 24. 127-146.

Porta, J. De. (1965): Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario en el extremo S del Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología. UIS*. 19. 1-51.

Porta, J. De. (1966): Geología Del Extremo Sur Del Valle Medio Del Magdalena. *Boletín de Geología. UIS*. 22- 23. 1-347.

Porta, J. De. (1974): *Léxico Estratigráfico Amérique Latine, Colombie, Tertiaire et Quaternaire*. Union Internationale des Sciences Géologiques. V. 4b.

Radic, J. (2004): Late Cretaceous to Cenozoic evolution of the Girardot basin, Upper Magdalena Valley, Colombian Andes. Thesis MSc. Cornell University. 1-98.

Ragan, D. (2009): *Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques*. Fourth Edition. Cambridge. 1-595.

Ramon, J.C., Dzou, L. y Giraldo, B. (1997): Geochemical evaluation of the Middle Magdalena Basin, Colombia. *Ciencia, Tecnología y Futuro* 1. 3. 47–66.

Raasveldt, H y Carvajal, J. (1957). – Mapa geológico de la República de Colombia. Plancha M 8 (Ataco). Esc. 1:200 000. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.

Restrepo-Pace, P.A. (1995): Late Precambrian to Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Colombian Andes, Based on New Geochronological, Geochemical and Isotopic Data. Ph.D Thesis, University of Arizona, Tucson, 1-194.

Rodriguez, E y Ulloa, C. (1994): Geología de la plancha 169 – Puerto Boyacá, escala 1:100.000 Memoria Explicativa. Ingeominas. 1-38.

Rowland, S., Duebendorfer, E y Schiefelbein, I. (2007): *Structural Analysis and Synthesis. A Laboratory Course in Structural Geology*. Third Edition. Blackwell Publishing. 1-297.

Sarmiento, L.F. (1989): Stratigraphy of the Cordillera Oriental west of Bogota. Colombia. MSc Thesis. University of South Carolina. Columbia. 1-102.

Sarmiento, L.F. (2001): Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. PhD Thesis, unpublished, Faculty of earth and Life Science. Vrije. Universiteit Amsterdam.

Sarmiento, L.F. (2011): Geology and Hydrocarbon Potential Middle Magdalena Basin. In Petroleum Geology of Colombia. Cediell and Ojeda Eds. 11. 1-193

Sarmiento, G., Puentes, J y Sierra, C. (2015): Evolución geológica del Sector del Valle Medio del Magdalena. Geologia Norandina.12. 51- 82.

Seubert, B (2012): Work Flows for Play Fairway Mapping using generic GIS Methods. Internal report. PetroPEP Nusantara, Geoscience Consulting. Jakarta. 1-15.

SGC (2020): <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx>

Shaw J, H., Connors, C. y Suppe, J. (2005): Seismic interpretation of contractional fault-related folds: En AAPG seismic atlas, American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology. 53. 1 – 157.

Schultz, P. (1999): The Seismic Velocity Model as an Interpretation Assets. Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series. 2. SEG.

Sorkhabi, R. (2012): Know your faults! GeoEducation. GeoExPro December. 70-76.
https://www.rasoulsorkhabi.com/uploads/1/2/4/5/124520722/geoexpro_faults_2012.pdf

Somoza, R y Ghidella, E. (2005): Convergencia en el margen occidental de América del Sur durante el Cenozoico: subducción de las placas de Nazca, Farallón y Aluk. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 60. 4. 797 – 809.

Suárez, M., Serrano, M. P., y Morales, M. (2000). Estilos estructurales y potencial de entrapamiento de la sección cretácea, cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos, Santafé de Bogotá, Colombia. Memorias Simposio Bolivariano - Caracas.

Suarez, C. (2016): Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.

Suppe, J. (1983): Geometry and kinematics of fault bend folding. American Journal Science. 283. 684-721.

Taborda, B. (1984): Guide Book to the Geology of the De Mares Concession. 6th Field Conference Colombian Society Petroleum Geologist and Geophysics. Reprinted in: Field Trips Colombia. Colombian Society Petroleum Geologist and Geophysics. Bogotá.

Tesón, E., Mora, A., Silva, A., Namson, J., Teixell. A., Castellanos, W., Casallas, M., Julivert, M., Taylor, M., Ibañez-Mejia, M y Valencia, V. (2013): Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Geological Society. London. Special Publications. 377. 257 – 283.

Ulloa, C. (1982): Proyecto Plancha 208 – Villeta. Informe de comisión N° 1. Informe preliminar. Ingeominas.

Ulloa, C y Acosta (1988): Plancha 208-Villeta – 1:100.000. Ingeominas.

Van Houten, F y Travis, R (1968): Cenozoic deposits, Upper Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 52. 4. 675 -702.

Vargas, C., Mann, P y Borrero, C. (2011): Field guides for excursions to the Nevado del Ruiz Volcano and to Romeral Fault System (Colombia) in the frame of the Neotectonics of arc-continent collision concepts. *Earth sciences Research Journal*. 15. 47-74.

Velandia, J., Aguilera, H. y Dueñas, E. (1977): Interpretación geológica y posibilidades de acumulación de crudos pesados en el sector W del Valle Medio del Magdalena entre los campos Cocorna-Velasquez y el Municipio de San Pablo. *Ecopetrol*. Bogotá.

Villamil, T. (1999): Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 153. 239-275.

Vinasco, C. J., Cordani, U. G., González, H., Weber, M. and Peláez, C. (2006): Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. 21: 355-371.

Wu, J. y McClay, R. (2011): Two dimensional analog modeling of fold and thrusts belts: Dynamic interactions with syncontractional sedimentation and erosion, in K, McKlay, J, Shaw and J, Suppe eds. *Thrust fault related folding: AAPG Memoir 94*. 335-355.