

**VALIDACIÓN DE UN MODELO ESTRUCTURAL ALTERNATIVO POR MEDIO
DE LA TÉCNICA DE BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES PARA
LOS CAMPOS DE LA LICENCIA PIEDEMONTE DE BP EXPLORATION
COLOMBIA EN EL PIEDEMONTE LLANERO**

ANDREA FERNANDA CADENA MENDOZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICO – QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2007

**VALIDACIÓN DE UN MODELO ESTRUCTURAL ALTERNATIVO POR MEDIO
DE LA TÉCNICA DE BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES PARA
LOS CAMPOS DE LA LICENCIA PIEDEMONTE DE BP EXPLORATION
COLOMBIA EN EL PIEDEMONTE LLANERO**

ANDREA FERNANDA CADENA MENDOZA

**Proyecto de Grado en modalidad Práctica Empresarial presentado para
optar el título de Geólogo**

Coordinador Universidad Industrial de Santander

MARIO GARCIA GONZALEZ, PhD.

GEOLOGO

Coordinador BP EXPLORATION COLOMBIA

JUAN CARLOS ALZATE

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICO – QUIMICAS

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2007

***Para Luis Ernesto por enseñarme el valor del conocimiento,
a Rosario Estela por no dejarme desfallecer,
a Laura por enseñarme a reír
y a el resto por aguantarme.***

AGRADECIMIENTOS

Le doy mis más sinceros agradecimientos ya que sin ustedes no habría culminado esta etapa:

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

A todo el cuerpo docente de la Escuela de Geología de la UIS, especialmente a Mario García, Luís Carlos Mantilla, Carlos García, Eliécer Uribe y Juan Diego Colegial.

A todos mis compañeros que me brindaron más allá que su compañía en clases.

A BP EXPLORATION COLOMBIA, en cabeza de Víctor Vega. Quienes me dieron la oportunidad de aprender y ratificar mi inclinación en la geología.

A Juan Carlos Alzate por su apoyo, consejo y paciencia. Mua.

Y a todos los que de una u otra manera contribuyeron a que culminara con éxito mis estudios y esta práctica.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	14
INTRODUCCION.....	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
2. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
2.1 MARCO GEOLÓGICO.....	18
2.1.1 Estratigrafía y Evolución Geológica.....	19
2.1.2 Geología Estructural.....	25
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN, TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS DE ORIENTACION DE ESTRATOS Y BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES.....	30
3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN UTILIZADAS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS TABLAS RESUMEN.....	32
3.1.1 Registros DIPMETER.....	32
3.1.2 Registros de Imágenes.....	33
❖ <i>Registros UBI</i>	35
❖ <i>Registros FMI</i>	37
3.1.3 Datos de Desviación de Pozo.....	38
3.1.4 Datos Derivados de Secciones.....	39
3.2 SCAT, Statistical Curvature Analysis Techniques. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CURVAS ESTADISTICAS.....	39
3.2.1 Relación Empírica Entre Rasgos Estructurales Y Las Gráficas Producidas En El Scat Análisis.....	41
❖ <i>Escenarios Planares</i>	42
❖ <i>Identificación y Orientación de Fallas</i>	49
3.2.2 Aplicación Del Scat Analysis A Los Datos Recopilados De Los Pozos De La Licencia Piedemonte.....	50
3.3 TRATAMIENTOS POSTERIOES DE LOS DATOS.....	51
3.4 BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES.....	52
3.4.1 Incorporación de Información Estratigráfica.....	53
3.4.2 Identificación de Familias Estructurales.....	53
3.4.3 Diagramas de Separación Estratigráfica.....	54
3.4.4 Calculo de la Profundidad del Basamento.....	54

3.4.5 Cálculo de la Profundidad de Despegue.....	54
3.4.6 Retrodeformación de la Sección.....	60
4. RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES BASADOS EN EL SCAT ANALYSIS. CONSTRUCCIÓN Y BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES.....	63
4.1 SECCIÓN RC-96-02 – POZOS DELE 1, VOLCANERA 1 Y VOCANERA 2.	63
4.1.1 Pozo Dele 1.....	66
4.1.2 Pozo Volcanera 1.....	70
4.1.3 Pozo Volcanera 2.....	78
4.2 SECCION PT-92-01 – POZOS PAUTO SUR 1, PAUTO SUR 2 Y PAUTO SUR 3. CAMPO PAUTO.....	78
4.2.1 Pozo Pauto Sur 1.....	84
4.2.2 Pozo Pauto Sur 2.....	88
4.2.3 Pozo Pauto Sur 3.....	97
4.3 SECCION PM-93-04 – POZOS FLOREÑA 2 Y FLOREÑA 4....	97
4.3.1 Pozo Floreña 2.....	100
4.3.2 Pozo Floreña 4.....	106
4.4 SECCIÓN PT-90-379 – POZOS FLOREÑA 1 Y FLOREÑA 5....	106
4.4.1 Pozo Floreña 1.....	111
4.4.2 Pozo Floreña 5.	121
4.5 SECCIÓN PM-93-56 – POZO FLOREÑA 3 Y FLOREÑA 3 SIDETRACK.....	124
4.5.1 Pozo Floreña 3.....	134
4.5.2 Pozo Floreña 3 ST (Sidetrack).....	135
5. CONVERSIONES PROFUNDIDAD – TIEMPO DE LAS SECCIONES REALIZADAS.....	135
5.1 COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS CONVERSIONES PROFUNDIAD – TIEMPO DE CADA SECCIÓN.....	137
5.1.1 Sección RC-93-04. Pozos Dele 1, Volcanera 1 y Voclanera 2.	137
5.1.2 Sección PT-92-01. Pozos Pauto Sur 1, Pauto Sur 2 y Pauto Sur 3.	139
5.1.3 Sección PM-93-04. Pozos Floreña 2 y Floreña 4.....	139
5.1.4 Sección PT-90-379. Pozos Floreña 1 y Floreña 5.....	143
5.1.5 Sección PM-93-56. Pozos Floreña 3 y Floreña 3 Sidetrack.....	145
5.2 COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE LAS CONVERSIONES PROFUNDIDAD – TIEMPO DE CADA SECCIÓN.....	
6. MODELO 3D Y MAPA ESTRUCTURAL.....	

RECOMENDACIONES..... 148
CONCLUSIONES..... 149
BIBLIOGRAFIA..... 150

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de las Licencias en las cuales se encuentran los campos de BP.	18
Figura 2. Elementos tectónicos de Colombia, mostrando la Cordillera Oriental y los diferentes rasgos geológicos que la limitan.	19
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de los campos presentes en la Licencia Piedemonte	20
Figura 4. Mapa Geológico del Piedemonte Llanero.	21
Figura 5. Bloque diagrama ilustrando la separación entre las cuencas Tablazo – Magdalena y Cocuy durante el Cretácico Temprano.	22
Figura 6. Mapa geológico simplificado indicando las principales unidades litoestratigráficas y las estructuras más relevantes.	26
Figura 7. Zonas de deformación presentes en el Piedemonte Llanero.	28
Figura 8. Límites de la zona triangular que enmarca la formación de estructuras tipo dúplex en los campos que se encuentran en la Licencia Piedemonte.	29
Figura 9. Distribución de los campos trabajados dentro de la licencia PIEDEMONTE y RECETOR de BPXC .	30
Figura 10. Descripción de la forma sinusoidal de los registros de imágenes.	34
Figura 11. Esquema de transductor y el motor eléctrico de la herramienta UBI de Schlumberger.	35
Figura 12. Diferentes productos de los registros de imágenes.	36
Figura 13. Herramienta utilizada para la corrida de registros de imágenes microresistivos (FMI).	38
Figura 14. Orientación de la dirección longitudinal y transversal que se tienen en cuenta para la realización de un SCAT análisis.	40
Figura 15 Representación de un pliegue sin cabeceo y con cabeceo.	42
Figura 16. Mapa de contornos de estratos doblemente plegados.	42
Figura 17. Gráficos del SCAT Análisis para zonas con estructuras planares, no buzantes.	44
Figura 18. SCAT Análisis para estratos con buzamientos bajos.	45
Figura 19. Gráficos del SCAT Análisis para un pliegue sin cabeceo.	47

Figura 20. Gráficos del SCAT Analysis para pliegues con cabeceo.	48
Figura 21. Diagrama de Buzamiento versus Dirección de buzamiento.	46
Figura 22. Diagrama de Componente transversal del buzamiento.	50
Figura 23. Bloque diagrama indicando la relación entre los diferentes elementos para el cálculo del buzamiento aparente por medio de técnicas trigonométricas.	51
Figura 24. Elementos que conforman una sección estructural y que son utilizados en el cálculo de la profundidad del despegue de las estructura.	55
Figura 25. Pasos para realizar una restauración por balanceo por áreas.	56
Figura 26 Terminología utilizada para cada uno de los elementos estructurales dentro de una sección a restaurar.	57
Figura 27. Tipo de Loose line en las secciones restauradas.	58
Figura 28. Distribución espacial de las líneas sísmicas, las secciones estructurales de la interpretación oficial existente y los pozos asociados.	61
Figura 29. Ubicación geográfica de las licencias de Piedemonte y Recetor con ubicación de las líneas sísmicas y pozos utilizados para este trabajo.	62
Figura 30. Diagramas del SCAT Análisis para los datos estructurales medidos en la estructura del campo Dele en el pozo Dele 1.	64
Figura 31. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal asociada a los datos del pozo Dele 1.	66
Figura 32. Diagramas producto del SCAT Analysis. Pozo Dele 1.	65
Figura 33. Trayectoria del pozo Volcanera 1 y Volcanera 2.	67
Figura 34. Diagramas producto del SCAT Analysis. Pozo Volcanera 1.	68
Figura 35. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal asociada a los datos del pozo Volcanera 1.	70
Figura 36. Diagramas de polos y DVA. Pozo Volcanera 1.	69
Figura 37. Diagramas producto del SCAT Analysis. Pozo Volcanera 2.	71
Figura 38. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal asociada a los datos del pozo Volcanera 2.	72
Figura 39. Diagramas de polos y DVA. Pozo Volcanera 2.	73
Figura 40. Resumen de los firerentes rasgos identificados con el SCAT Analysis. Pozo Volcanera 2.	74
Figura 41. Sección sísmica asociada a los pozos de Dele 1 y Volcanera 1 y 2.	75

Figura 42. Sección estructural asociada a los pozos Dele 1, Volcanera 1 y Volcanera 2.	77
Figura 43. Diagramas producto del SCAT Analysis. Pozo Pauto Sur 1.	79
Figura 44. Rasgos estructurales propuestos para la sección PT-92.01. Pozos Pautos Sur.	81
Figura 45. Vista en plata de la dirección longitudinales y transversales asociados a los datos del pozo Pauto Sur 1.	82
Figura 46. Diagrama de polos y DVA. Pozo Pauto Sur 1.	83
Figura 47. Diagramas del SCAT Analysis. Pozo Pauto Sur 2.	85
Figura 48. Dirección longitudinal y transversal de los datos del pozo Pauto Sur 2.	86
Figura 49. Diagrama de polos y DVA. Pozo Pauto Sur 2.	87
Figura 50. Trayectoria del pozo Pauto Sur 2 en la sección.	86
Figura 51. Diagramas del SCAT Analysis para los datos medidos en el pozo Pauto Sur 3.	89
Figura 52. Diagrama de polos producto del SCAT Analysis indicando dirección de cabeceo y la magnitud del mismo. Pozo Pauto Sur 3.	90
Figura 53. Vista en planta de la dirección transversal y longitudinal de la estructura. Pozo Pauto Sur 2.	88
Figura 54. Vista en planta de la dirección de cabeceo y la dirección transversal según Tectonics. Pozo Pauto Sur 2.	88
Figura 55. Modificaciones planteadas a la sección PT-92-01.	91
Figura 56. Línea sísmica PT-92-01 que corresponde al campo Pauto.	93
Figura 57. Perfil estructural de la línea sísmica PT-92-01, que incluye los pozos Pauto Sur 1, 2 y 3.	95
Figura 58. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos estructurales medidos en el pozo Floreña 2.	99
Figura 59. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de los datos asociados al pozo Pauto Sur 3.	98
Figura 60. Diagrama de polos y DVA. Pozo Floreña 2.	101
Figura 61. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos estructurales pertenecientes a la estructura de Floreña medidos en el pozo Floreña 4.	102
Figura 62. Dirección longitudinal y transversal de las estructuras atravesadas por el pozo Floreña 4.	103
Figura 63. Diagrama de polos y DVA. Pozo Floreña 4.	104
Figura 64. Elementos estructurales propuestos para la sección PM-90-379 con ayuda del SCAT Analysis.	105
Figura 65. Sección sísmica asociada a los pozos Floreña 2 y Floreña 4.	107

Figura 66. Sección estructural resultante que corresponde a la línea sísmica PM93-04 que involucra los pozos Floreña 2 y Floreña 4.	108
Figura 67. Diagramas producto del SCAT Analysis a los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 1.	110
Figura 68. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura de Floreña. Pozo Floreña 1.	111
Figura 69. Diagrama de polos y DVA. Pozo Floreña 1.	112
Figura 70. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos medidos correspondientes a la estructura de Floreña y Pauto en el pozo Floreña 5.	113
Figura 71. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura de Floreña. Pozo Floreña 5.	114
Figura 72. Diagrama de polos y DVA de los datos. Pozo Floreña 5	115
Figura 73. Rasgos estructurales identificados con ayuda del SCAT Analysis y continuidad lateral de estilo estructural para la sección PT-90-379.	116
Figura 74. Línea sísmica PT-90-379 que corresponde a los pozos de Floreña 1 y Floreña 5.	118
Figura 75. Sección estructural asociada a los pozos Floreña 1 y Floreña 5. Se muestra la ubicación del pozo Floreña 1.	120
Figura 76. Restauración de la sección estructural asociada a los pozos Floreña 1 y Floreña 2.	122
Figura 77. Diagramas producto del SCAT Analysis de los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 3.	123
Figura 78. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de los datos del pozo Floreña 3.	124
Figura 79. Diagrama de polos y DVA. Pozo Floreña 3.	125
Figura 80. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 3 Sidetrack.	126
Figura 81. Vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de los datos del pozo Floreña 3 <i>sidetrack</i> .	127
Figura 82. Diagrama de polos y DVA. Pozo Floreña 3 Sidetrack.	128
Figura 83. Rasgos estructurales planteados a modificar en la sección PM-93-56. Se muestra el tipo de rasgo y la profanidad a la cual se plantea sea ubicada.	129
Figura 84. Línea sísmica PM-93-56, asociada a los pozos de Floreña 3 y floreña 3 <i>Sidetrack</i> .	132
Figura 85. Sección estructural asociada a los pozos Floreña 3 y Floreña 3 <i>Sidetrack</i> .	133
Figura 86. Regiones definidas en la grilla para la generación de velocidades calculadas para cada una.	134

Figura 87. Conversión profundidad – tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Sección PT-92-01.	136
Figura 88. Conversión Profundidad – Tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y de las fallas asociadas. Sección PM-93-04.	136
Figura 90. Conversión Profundidad a Tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Sección PM-90-379.	142
Figura 91. Conversión Profundidad – Tiempo del horizonte de Mirador para las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Sección PM-93-56.	143
Figura 92. TWT calculado versus TWT de la sísmica.	144
Figura 93. Vista lateral del modelo estructural 3D preliminar realizado para los campos de la Licencia Piedemonte. Se muestra la ubicación de los pozos y los diferentes niveles estratigráficos.	146
Figura 94. Mapa estructural de los campos de la Licencia Piedemonte al tope de Mirador.	147

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distribución de los pozos trabajados dentro de la licencia PIEDEMONTTE, el campo al cual están asociados y la sección estructural para la cual sus datos serán destinados.	30
Tabla 2. Información base para el posterior balanceo de las secciones estructurales objetivo	31
Tabla 3. Formato del archivo de cada uno de los pozos para importar a GEOSEC 2D.	52

ABSTRACT

TITLE: VALIDATION OF ALTERNATIVE STRUCTURAL MODEL BY BALANCED CROSS SECTION TECHNIQUE FOR BP'S FIELDS IN PIEDEMONTE LICENCE, IN THE COLOMBIAN FOOTHILLS.¹

AUTOR: CADENA MENDOZA Andrea Fernanda²

Key words: Piedemonte, Structural Cross Section, Structural Model, Balanced Cross Section, Fields, SCAT Analysis.

The Colombian foothills are the area studied, in the Casanare department. The objective is PAUTO, FLOREÑA, DELE y VOLCANERA fields, in the PIEDEMONTE and part of RECETOR Licence. In this fields exist eleven wells, some are productive, closed and injectors. Exist microresistive and sonic well log for each well, from this is possible to get structural data. This information were gathered and cleaned for interpretation by SCAT Analysis's plots for each well. In this plots were possible to recognize structural features in wells trajectories and this features were used for generate new cross sections. The sections conform a new structural model for each field in the Licence.

SCAT Analysis in wells associate with Dele and Volcanera fields don't show big different with the actual interpretation in this fields. Only back flank are more dipping and a incipient imbricate system appear. Dele structure is laterally continuous with Pauto field in Pauto Sur well; Volcanera structure is continuous with Pauto Sur 1 well objective in Pauto field.

For Pauto field a duplex system is proposed without backthrust faults. Additionally Pauto Sur 1 objective is the same second Mirador in Pauto Sur 2 well and Floreña 5 well too. A imbricate system in the lowest part in the deformed zone is proposed. This imbricate mark the contact between deformed and no deformed zone. Floreña structure appear in the north part and is product of a new fault that affect a anticline structure in the back of the section, above Pauto Sur well objective (Pauto Field). In the north, Floreña field is bigger, producing Pauto field deeper. Also, Pauto field is divided into a duplex system with an additional sheet by new faults actions.

El Morro, Floreña and Pauto structures were balanced in the cross sections associates with seismic lines PT-92-05 and PM90-379. Deformation generate a reduction of 53% in the sections worked. None backthrust fault is necessary in the structural model built.

¹ Practice in BP EXPLORATION COLOMBIA.

² Engineering Physical – Chemistry Department. Geology School. Geologist PhD., Mario García G. Coordinator. BP EXPLORATION COLOMBIA. Geologist Juan Carlos Alzate. Coordinator.

RESUMEN

TITULO: VALIDACIÓN DE UN MODELO ESTRUCTURAL ALTERNATIVO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES PARA LOS CAMPOS DE LA LICENCIA PIEDEMONTA DE BP EXPLORATION COLOMBIA EN EL PIEDEMONTA LLANERO³

AUTOR: CADENA MENDOZA Andrea Fernanda⁴

Palabras Claves: Piedemonte, Secciones Estructurales, Modelo Estructural. Balanceo, Campos, SCAT Analysis.

La zona de estudio es el Piedemonte Llanero Colombiano, en el departamento del Casanare. Los campos trabajados son el de PAUTO, FLOREÑA, DELE y VOLCANERA, enmarcados en la licencia de PIDEOMTE y parte de RECETOR. A estos campos se encuentran asociados once pozos, dentro de los que se encuentran productores, cerrados e inyectores. Cada uno de estos pozos posee registros microresistivos y sónicos que generan datos estructurales. Estos datos fueron recopilados y depurados para una posterior interpretación por medio de SCAT Analysis realizados a cada pozo y diagramas de polos adicionales. De estos diagramas se obtienen diferentes rasgos estructurales en las trayectorias de los pozos y que posteriormente son utilizados para generar nuevas secciones estructurales que conforman un nuevo modelo estructural para cada uno de los campos.

El SCAT Analysis de los pozos asociados a los campos Dele y Volcanera no muestra gran diferencia con la interpretación actual de dichos campos. Únicamente se muestran flancos traseros más buzantes y un sistema imbricado incipiente. La estructura de Dele se propone lateralmente continua con la estructura del pozo Pauto Sur 2 y la estructura de Volcanera con la del pozo Pauto Sur 1.

Para el campo Pauto se plantea un sistema tipo dúplex con ausencia de fallas tipo backthrust. Adicionalmente se plantea que la estructura objetivo del pozo Pauto Sur 1 es la misma del segundo Mirador en el pozo Pauto Sur 2 y el pozo Floreña 5. Por último aparece un sistema imbricado en la parte baja de la zona deformada que marca el contacto entre la zona deformada y la no deformada. La estructura de Floreña aparece más hacia el norte y es producto de un fallamiento que afecta la parte posterior y la estructura anticlinal ahí ubicada por encima de la estructura del pozo Pauto Sur 2 (Pauto). El campo Floreña continua hacia el norte de la licencia donde aumenta de tamaño, provocando una profundización del campo Pauto. También hacia el norte, el campo Pauto es dividido en un sistema dúplex con una escama adicional debido a la aparición de nuevas fallas que dividen las estructuras.

Las estructuras de El Morro, Floreña y Pauto fueron balanceadas en las secciones estructurales ubicadas en las líneas sísmicas PT-92-05 Y PM90-379. La deformación genera un acortamiento de un 53% en las secciones trabajadas. Ninguna falla tipo backthrust es necesaria para el modelo estructural realizado.

³ Práctica empresarial realizada en BP EXPLORATION COLOMBIA.

⁴ Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Geología. Geólogo PhD., Mario García G. Coordinador. BP EXPLORATION COLOMBIA. Geólogo Juan Carlos Alzate. Coordinador.

INTRODUCCION

No es para nadie un secreto que en un mundo como el nuestro, saturado de conflictos y súper población, la demanda de energía es cada vez mayor. Lo anterior teniendo en cuenta que a pesar de los esfuerzos que se han hecho para fomentar y desarrollar energías alternativas, los hidrocarburos siguen siendo la principal fuente de movilidad para el mundo. Eso lo convierte en un recurso extremadamente valioso, cuya tenencia asegura momentáneamente el sostenimiento de una nación. Es por lo anterior que se ha reactivado la explotación de éste recurso, con el fin de satisfacer la demanda cada vez más creciente. Pero para lograr una mayor cantidad de recurso, es necesario el entendimiento completo de las leyes naturales que lo producen y lo ponen a nuestra disposición. Así también, tener en cuenta todos los escenarios posibles para su generación, migración y sobretodo entrapamiento.

Es en este punto donde la geología estructural juega un papel fundamental en el conocimiento de yacimientos petroleros tan complejos como es el caso de los campos del Piedemonte Llanero Colombiano. Es por ello que a pesar de existir interpretaciones estructurales de estos campos, nuevos escenarios y por ende, interpretaciones de geólogos con la mente fresca es necesaria. Con el fin de producir interpretaciones coherentes y nuevas que no sufran el sesgo que en ocasiones da la experiencia.

Es así como esta práctica empresarial fue realizada con los campos de la Licencia de Piedemonte de BP Colombia teniendo en cuenta nueva información estructural e interpretaciones sísmicas para producir un modelo estructural coherente, que honre las leyes de la geología y en especial las relaciones geométricas que gobiernan la geología estructural. Así también se busca un modelo local que incluya todos los campos de la zona estudiada y que permita entender las relaciones que se presentan entre los mismos, la continuidad lateral de las estructuras y las posibilidades de nuevos horizontes en la explotación de éstos campos.

Por último, el trabajo sirve como base para evaluación de otros proyectos realizados en la Compañía y cuya precisión es fundamental, como es el caso del modelo de velocidades desarrollado para los campos de la Licencia de Piedemonte.

Por todas las razones anteriores sumados al afán de ahondar en el conocimiento de la geología estructural y en el negocio del E&P, es realizado el trabajo mostrado a continuación.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES

Plantear un modelo estructural alternativo para los campos en la licencia PIEDEMONTE de BP EXPLORATION COLOMBIA por medio del balanceo de secciones estructurales con el fin de que este modelo pueda ser utilizado en un futuro para un nuevo cálculo de reservas para dichos campos.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Generar registros Dipmeter Compilados de los pozos asociados a las diferentes secciones a balancear con el fin de identificar en ellos la disposición de los estratos y las diferentes estructuras presentes en dichas secciones.

Realizar el balanceo de las secciones escogidas para los diferentes campos de la licencia PIEDEMONTE teniendo en cuenta la continuidad lateral de las estructuras así como la eliminación de backthrust planteados en modelos anteriores.

Identificar el ajuste de las secciones realizadas con las líneas sísmicas existentes por medio de la conversión tiempo profundidad, lo cual tendrá el efecto de validar los modelos de velocidad asumidos para la zona de interés.

Realizar un remapeo de las estructuras de interés en los campos para general un modelo 3D del subsuelo que pueda ser utilizado en un futuro por la compañía.

2. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

De manera general la zona de estudio se encuentra en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental de Colombia, mejor conocido como el Piedemonte Llanero Colombiano, enmarcados políticamente dentro del departamento del Casanare (Figura 1). En esta zona se encuentran centralizadas las operaciones de **BP EXPLORATION COLOMBIA LTDA**, las cuales comenzaron en 1987.

En esta zona los trabajos están divididos según los campos que posee la compañía. Se destaca el Campo de Cusiana, el cual está en el contrato de asociación de Santiago de las Atalayas, Tauramena y Río Chitamina, donde **BP** posee como socios a **ECOPETROL** y **TOTAL**. El segundo campo más destacado de la compañía es el de Cupiagua, el cual fue descubierto en 1992 y se encuentra en el contrato de asociación de Santiago de las Atalayas y Recetor. Estos campos conforman el mayor hallazgo petrolero de Colombia hasta la fecha, con unas reservas combinadas de 1.600 millones de barriles y actualmente aportan un 30% de la producción total nacional. El crudo producido es exportado gracias a un oleoducto que conduce desde el Casanare hasta el Puerto de Coveñas.

El presente trabajo está centralizado en los campos descubiertos más recientemente, los cuales son los de **PAUTO**, **FLOREÑA**, **DELE** y **VOLCANERA**, enmarcados en la licencia de **PIDEMONTE** y parte de **RECETOR**. Para estos campos se presenta una gran variación composicional de los fluidos y calidad de reservorio, encontrándose fluidos que van desde gases condensados muy pobres y gases condensados ricos, hasta petróleos volátiles en cuarzo arenitas con porosidades entre 3% y 10%. Esta variación está ligada a la historia evolutiva tanto estratigráfica (roca generadora, yacimiento y sello) como estructural (temporalidad entre deformación y generación de hidrocarburos).

Para el desarrollo de estos campos **BP** ha perforado alrededor de 125 pozos en terrenos abruptos y de geología complicada a una profundidad de hasta 20.000 ft. Adicionalmente programas intensos de exploración se han realizado teniendo como base la adquisición y procesamiento de varios programas sísmicos 2D (mas de 2000 kilómetros) y alrededor de 840 Km.² en sísmica 3D y el mapeo geológico detallado de superficie.

Los recursos dedicados al desarrollo de Cusiana y Cupiagua convierten a **BP** en el mayor inversionista extranjero en Colombia. Desde 2003, **BP** también viene suministrando gas doméstico a Bogotá y sus alrededores, y hoy adelanta la construcción de instalaciones adicionales que pondrán una cantidad significativa de ese energético a disposición del país.



Figura 1. Ubicación de las Licencias en las cuales se encuentran los campos de BP. La zona de estudio para este trabajo está comprendida por los campos incluidos dentro de la Licencia de Piedemonte de la Compañía.

2.1 MARCO GEOLÓGICO

En Colombia, los Andes forman tres rasgos distintivos: la Cordillera Oriental, Central y Occidental. Estos rasgos para su formación pasaron por múltiples fases de tectonismo superpuestos debido a la deformación terciaria sufrida por los Andes y que da como resultado los relieves hoy conocidos.

La Cordillera Occidental está formada por un conjunto de rocas típicas de corteza oceánica amalgamadas asociadas a un arco volcánico y rocas plutónicas que fueron acrecionadas al margen noroccidental de Sur América a lo largo de la falla zona de Falla de Romeral en el Cretácico Tardío al Paleoceno. Al este de la zona de Falla de Romeral se encuentra la cordillera Central, la cual descansa sobre corteza continental consiste en rocas metamórficas Precámbricas y Paleozóicas suprayacidos localmente por rocas volcánicas calco-alcalinas, clásticas y calizas. Las Cordilleras Central y Occidental son intruidas por granitoides Terciarios.

La Cordillera Oriental, como la Central es subyacida por corteza continental, la cual contiene rocas metasedimentarias. Adicionalmente la Cordillera presenta una delgada secuencia Jurásica y Cretácica Temprana que cubre sus flancos orientales y occidentales. Los flancos, en general presentan mayor levantamiento que la parte central de la Cordillera, así como las rocas más antiguas están expuestas en los flancos y las rocas más jóvenes están preservadas en la parte central.

La Cordillera Oriental está limitada al Este por una cuenca tipo *Foreland* del Neógeno, conocida como la Cuenca de los Llanos; hacia la parte Oeste se encuentran las cuencas del Valle Medio y Superior del Magdalena (VMM, VSM), cuencas intramontanas las cuales separan la Cordillera Central de la Cordillera Oriental. Al Norte, la Cordillera está limitada por la falla de Bucaramanga – Santa Marta, una falla de tipo rumbo deslizante sinestral (strike slip) de edad Mioceno (?) a Holoceno y la cual es la responsable de gran parte de la actividad sísmica en la actualidad. Hacia el Noreste de la Cordillera, se encuentra el Macizo de Santander, el cual es geológicamente distinguible por el número de plutones y contenido de rocas Precámbricas. El Macizo separa la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) de la cuenca del Maracaibo y Barinas – Apure en Venezuela. Al Sur, por último, se presentan Macizos Precámbricos (Quetame y Garzón) que separa la cuenca de los Llanos de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (Figura 2).

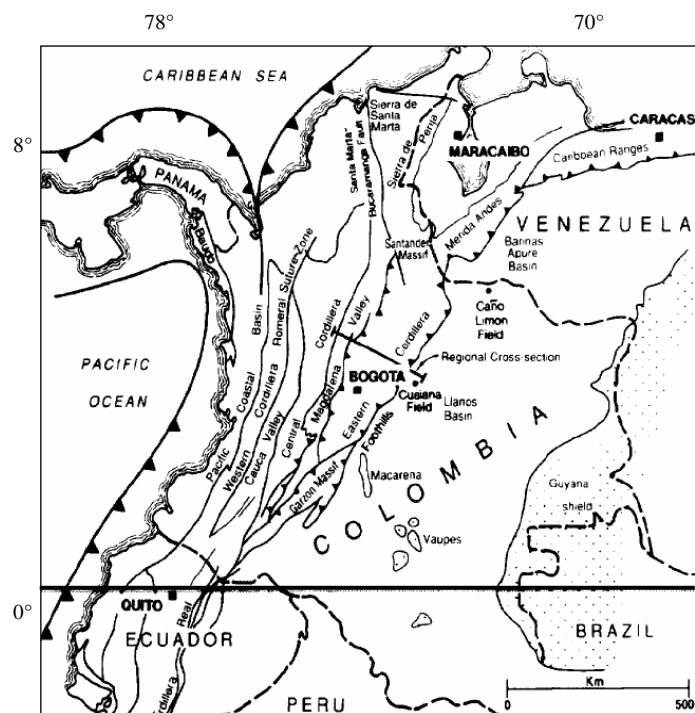


Figura 2. Elementos tectónicos de Colombia, mostrando la Cordillera Oriental y los diferentes rasgos geológicos que la limitan, como lo son las cuencas del Valle del Magdalena y la de los Llanos. Tomado de Dengo, 1993.

2.1.1 Estratigrafía y Evolución Geológica.

La estratigrafía del área involucra rocas que van desde el Paleozoico, Cretáceo y Terciario con presencia de múltiples discordancias regionales (Figura 3). Las rocas más antiguas en el área son arcillolitas del Ordovícico sobre las cuales yace de manera discordante la secuencia cretácica, la cual inicia con las

Formaciones Fόμεque y Une (Albiano – Aptiano – Cenomaniano), seguida de la Formación Gachetá (Turoniano – Conoaciano – Santoniano) y el Grupo Guadalupe (Campaniano – Maastrichtiano). La secuencia Terciaria está dada por las Formaciones Barco y Los Cuervos (Paleoceno), Mirador (Eoceno), el Grupo Carbonera y la Formación León (Oligoceno - Mioceno), la Formación Guayabo (Mioceno – Pleistoceno) y los depósitos más recientes de la Formación Corneta.

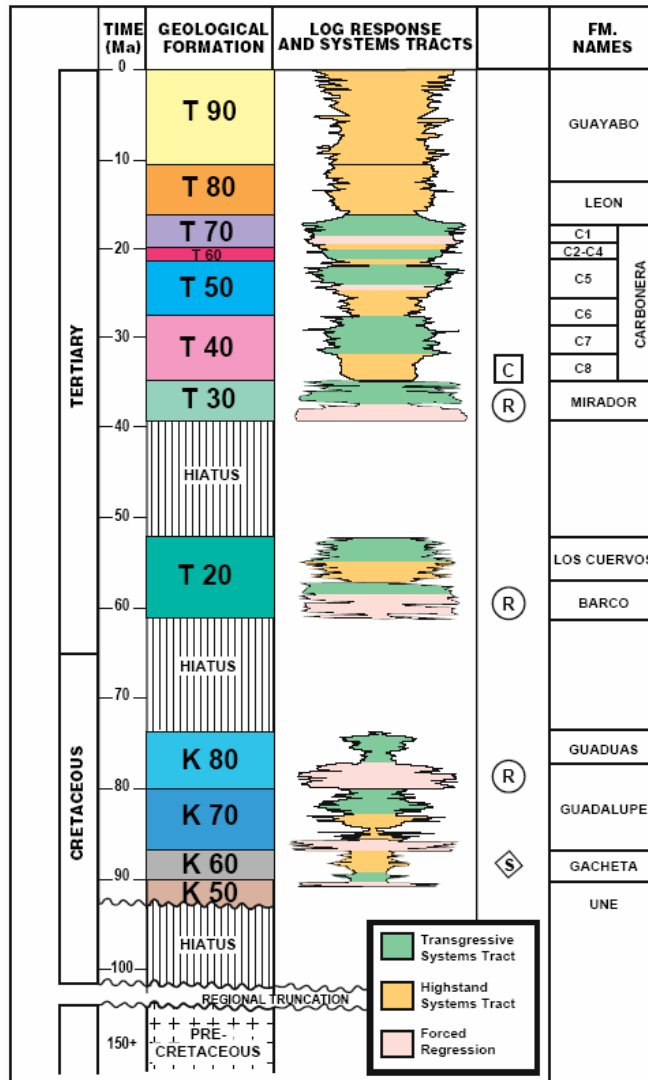


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de los campos presentes en la Licencia Piedemonte. En la columna se distinguen las formaciones generadoras, reservorios y sello. Adicionalmente la respuesta de registro Gamma Ray para dicha formación. Tomado de Cooper. M. A. et al. 1995).

La Figura 4 muestra el mapa geológico de la zona donde se pueden reconocer los diferentes rasgos estructurales, así como las unidades aflorantes.

Al revisar la bibliografía existente acerca de la Cordillera Oriental y la evolución geológica de la misma, se encuentra que de manera general todos los autores coinciden con la propuesta presentada por Dengo (1995), la cual es brevemente descrita a continuación y tiene en cuenta tanto la estratigrafía como la tectónica presente en cada episodio en la evolución.

Inicialmente se tiene que la secuencia del Cretácico Temprano descansa directamente sobre secuencias delgadas de rocas sedimentarias Paleozóicas y el basamento metamórfico de los Llanos. De estas rocas Paleozoicas sólo secuencias delgadas son expuestas, presentando espesores variables debido al control estructural.

Para la Cordillera Oriental dos depocentros son reconocidos, la Cuenca del Cocuy al este y la Cuenca Tablazo Magdalena en el oeste, separadas por el Alto de Santander (Figura 5). Las secuencias que se presentan son características de ambientes continentales (estratos rojos) para la Cuenca Tablazo – Magdalena y sedimentos marino somero para la cuenca del Cocuy. Subiendo estratigráficamente se marca el cambio entre sedimentos continentales a marino somero para la Cuenca Tablazo – Magdalena y la deposición de carbonatos marino somero en el Alto de Santander. Esta secuencia estratigráfica no se encuentra identificada en los campos del Piedemonte debido a que la profundidad de los pozos no es la suficiente para identificarlos, por lo anterior no se sabe si estas litologías existen en la zona de estudio.

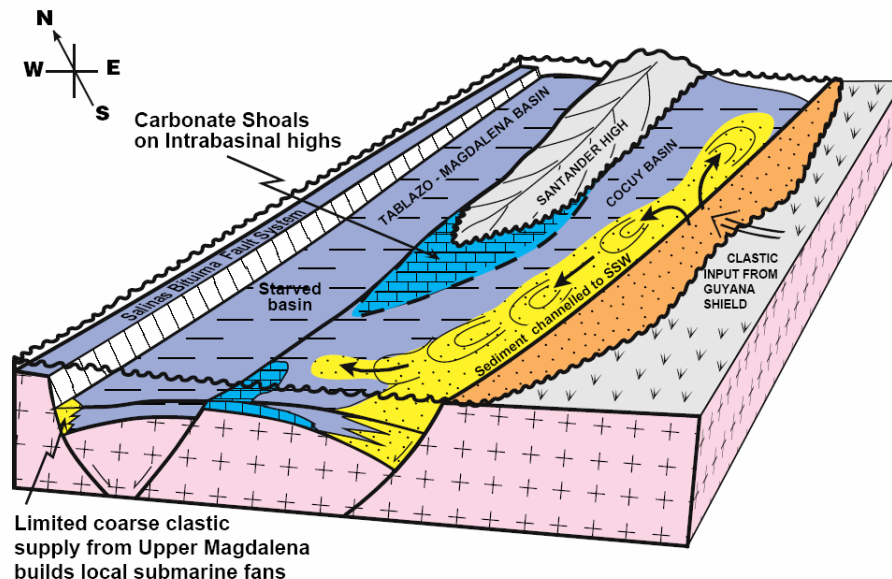


Figura 5. Bloque diagrama ilustrando la separación entre las cuencas Tablazo – Magdalena y Cocuy durante el Cretácico Temprano y la influencia del Alto de Santander en la distribución de facies. Tomado de Cooper, M.A et al. 1995.

Tectónicamente se tiene que la esquina norte de Sur América estaba directamente conectada con Norte América y África, juntos hacían parte del supercontinente Gondwana. Se tiene entonces un escenario compresivo debido a una zona de subducción con buzamiento al este al occidente de Norte y Sur América, lo que produce un cinturón magmático en la Cordillera Central. Posteriormente se inicia la apertura del proto – Caribe, cuando Norte y Sur América comienzan a separarse. En Colombia, la extensión continuó hasta el Cretácico Temprano generando un sistema de graben que permitió la depositación de facies marinas, las cuales hasta el Cretácico tardío debido a transgresiones y regresiones sucesivas generaron intercalaciones de formaciones reservorio y sello.

Pasando a la secuencia Cretácica, se tiene que sólo los procesos sedimentológicos ocurridos en la Cuenca del Cocuy son los responsables de la secuencia estratigráfica de la zona de estudio. La depositación de la primera secuencia (K30) está caracterizada por arenas marino somero derivadas del escudo de la Guyana, las cuales dieron origen a la Formación Fómeque. La Formación Une (Secuencia K40) es producto del aumento en el nivel del mar y una continua subsidencia que generaron una trasgresión regional.

Durante el Turoniano – Coniaciano se inicia la secuencia K60 con un aumento global en el nivel del mar, que combinado con una condiciones de surgencia anóxicas, permitieron la depositación de mudstones, cherts, y fosfatos. Esta secuencia es conocida como al Formación Gachetá para el área de estudio y es la principal roca generadora del sistema petrolero en la zona constituido. Esta formación tiene sus equivalentes para otras áreas como lo son la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena y la Formación Villeta en el Valle Alto del Magdalena. Al igual que la Formación Fómeque, la Une también forma un onlap con el escudo de la Guyana.

Para el Santoniano – Campaniano se depositaron las areniscas del Grupo Guadalupe (Secuencia K80), las cuales fueron producto de un descenso en el nivel eustático. Esta secuencia fue depositada con una relativa uniformidad en los espesores a lo largo de un ambiente marino somero. Estas areniscas presentan alternancia de niveles ricos en fosfatos. Un aumento relativo en el nivel del mar produjo posteriormente la depositación de un nivel arcilloso el cual identifica el miembro medio del Grupo Guadalupe. El miembro arenoso superior en muchas ocasiones está ausente en muchos de los pozos perforados. Los miembros arenosos del Grupo Guadalupe constituyen unos de los dos reservorios menores presentes en la zona de estudio junto con la Formación Barco.

El episodio final de acreción de la Cordillera Occidental comenzó a finales del Maastrichtiano y se extendió hasta el Paleoceno. Lapso en el que un arco volcánico colisiona con el borde noroccidental del continente, creando una zona de deformación que se extiende desde el norte del Perú hasta el norte de Colombia. Esto dio como resultado un cambio a una depositación no marina. La

formación depositada en esta megasecuencia corresponda a Guaduas, la cual en el Piedemonte Llanero no se encuentra pero es coetánea con un hiato de aproximadamente 14 m. a., que va desde el Cretáceo al límite con el Terciario. La presencia de este hiato es explicada por un control estructural hecho por la Falla de Guaicáramo en la depositación de la formación.

La Formación Barco conforma un sistema basal de *system track* (Secuencia T20). Su litología es predominantemente madura texturalmente, rica en areniscas, depósitos tipo estuarios derivados del Escudo de la Guyana. La depositación de esta formación se extendió hasta en el Paleoceno Tardío cuando una trasgresión tuvo lugar y hubo un aumento en el nivel relativo del mar, lo cual produjo la depositación de la Formación Los Cuervos en el Eoceno Temprano (Secuencia T20). Después de la depositación de la Formación Los Cuervos se presenta un hiato de alrededor 16 m. a.

En el Eoceno Medio (40.5 m.a) la depositación fue renovada debido a una transgresión que se extendió hacia el sur y el este. La Formación Mirador (Secuencia K30) que constituye el más grande reservorio en el Piedemonte Llanero fue el resultado de dicho episodio. Presenta una influencia marina, areniscas, depósitos fluviales y de valles de estuarios. Esta Secuencia en su parte central presenta unos niveles lodosos que son bastante distintivos. La depositación de la formación es a los 34 m.a..

Después de la Secuencia T30 (Formación Mirador), ocurren cuatro ciclos mayores de influencia marina, los cuales son conocidos como la Formación Carbonera. En el ciclo menor (T40) conforma el sello en tope de los campos.

Por último, en el Mioceno Medio, el aumento global en el nivel del mar coincide con el primer evento de deformación significativo y levantamiento de la Cordillera Oriental, el cual produjo la inversión de las fallas de Guaicáramo, Arcabuco y La Salina lo que controló el estilo y distribución de las estructuras compresionales, el levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental. Esta deformación aísla la cuenca del Valle Medio del Magdalena de la cuenca de los Llanos. La carga tectónica resultante aumenta la subsidencia produciendo la depositación de las lodositas calcáreas de la Formación León. Durante la depositación de esta formación se presenta un control del mismo proceso debido a procesos de levantamiento y deformación.

El último episodio de depositación ocurrido en el Piedemonte Llanero corresponde a la acomodación de sedimentos clásticos gruesos de tipo continental, los cuales dieron lugar a la Formación Guayabo (Secuencia T90) entre 10 y 2 m. a. aproximadamente. Esta última fase de depositación marca el levantamiento de la Cordillera Oriental, proceso que hizo que muchas de las rocas reservorios que se encontraban en los anticlinales ya no constituyeran prospectos y por ende ubicando estos últimos en las zonas más profundas de la Cordillera. Gran parte

del material erodado fue depositado en la cuenca de los Llanos, formando secciones gruesas del Plioceno y Pleistoceno.

2.1.2 Geología Estructural.

Ya que se conoce brevemente la evolución tectónica que afectó directa o indirectamente la Cordillera Oriental, se puede entonces describir los elementos tectónicos más importantes que afectan dicha cordillera; son el sistema de fallas de Guaicáramo en cuyo bloque colgante afloran rocas desde el Cretáceo Medio al Terciario; la falla Yopal – Borde Llanero, la falla Cusiana y Tamara (Figura 6). Como se mencionó anteriormente estas fallas sufrieron un proceso de inversión en el Mioceno.

Al oeste de las fallas invertidas mencionadas, se encuentra un sistema de sinclinales regionales dentro de los que se encuentra el de Nunchia que involucra rocas desde el oligoceno al reciente y Zamaricote. El limbo oeste de los sinclinales se encuentra elevado debido a una serie de estructuras que involucran el Cretácico Tardío y el Terciario Temprano. Estas estructuras pueden ser modeladas como una serie de despegues que en las formaciones arcillosas conformando estructuras tipo dúplex.

A nivel del subsuelo se destacan dos zonas principales de deformación como son el tren de estructuras frontales y el tren de estructuras en cabalgamientos. Teniendo en cuenta que ya se conoce la estratigrafía presente en la zona, se puede presentar el hecho de que los despegues de las principales fallas se presenta en las formaciones principalmente arcillosas como son las arcillolitas del Ordovícico, la Formación Gachetá, los miembros arcillosos del Grupo Carbonera y la Formación León. Estas formaciones actúan también como sellos siendo el más importante y regional el miembro C8 del Carbonera.

Haciendo una revisión del comportamiento estructural del Piedemonte Llanero, se evidencia que la complejidad de la cuenca aumenta a medida que se avanza de sur a norte. Dicha complejidad se ve evidenciada en la pobre resolución de la información sísmica.

La variación del estilo estructural a lo largo del Piedemonte central es en gran medida reflejo de la presencia de múltiples despegues y de la configuración del basamento cristalino subyacente. La posición de estos despegues cambia de oeste a este ascendiendo estratigráficamente a medida que la deformación avanza, al igual que variando en la dirección de rumbo suroeste a noreste atravesando zonas de transferencia lateral.

Para las estructuras en el bloque colgante del sistema de Guaicáramo, el despegue se presenta en la Formación Fómeque, luego asciende a la Formación

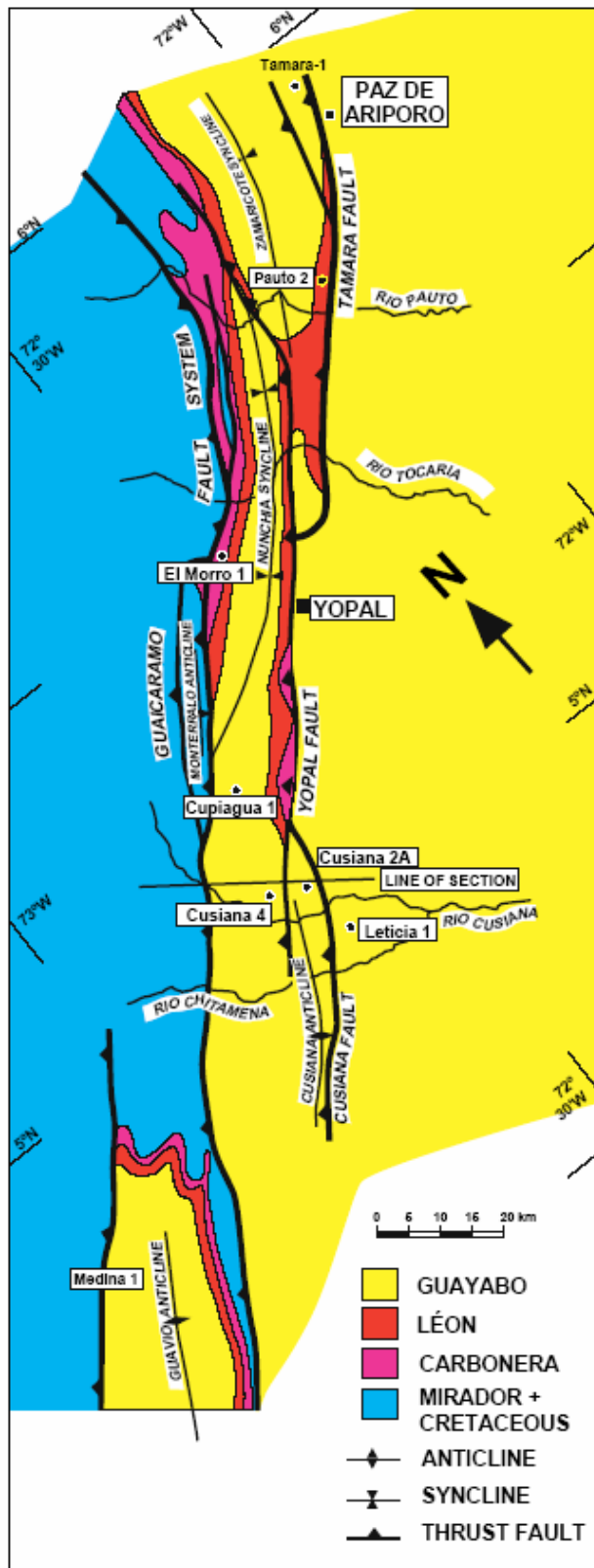


Figura 6. Mapa geológico simplificado indicando las principales unidades litoestratigráficas y las estructuras más relevantes. Se presentan el sistema de Fallas de Guaicáramo, la Falla Cusiana, la Falla Yopal y la Falla Tamara. Adicionalmente los sinclinales de Nunchia y Zamaricote. Tomado de Cooper, M.A et al. 1995.

Gachetá en la zona triangular de cabalgamientos y posteriormente la deformación se transfiere a niveles superiores en los miembros inferiores del grupo Carbonera para finalizar en el Carbonera Superior y la Formación León. Esta variación en la posición de los despegues conlleva a la formación de estructuras tipo *duplex* o estacadas las cuales contienen diferente estratigrafía dependiendo de la posición del despegue inferior y superior y de su posición relativa en la cuenca. Debido a lo anterior, a medida que el despegue asciende, va involucrando rocas más jóvenes lo que hace que se formen apilados hasta de tres y cuatro escamas que repiten la estratigrafía.

De manera general para toda la zona del Piedemonte Llanero existen tres fajas de deformación: zona de tren de estructuras frontales (Cusiana), zona de transición de estructuras aisladas (Cupiagua) y la zona del tren de estructuras cabalgantes (Volcanera, Pauto, Dele y Floreña) (Figura 7). Teniendo en cuenta lo anterior se han postulado varias etapas de deformación para el Piedemonte (Martínez, 2005).

Una primera etapa corresponde a un acortamiento paralelo a las capas y plegamiento antes del fallamiento, ocurre antes de la orogenia Andina y su inicio varía de acuerdo a cada estructura de 25 a 5 millones de años. Durante las etapas más importantes de acortamiento se distinguen tres fases, la primera con cabalgamientos en secuencia asociados al Cretáceo Medio y donde se delimitan las estructuras principales y cada uno de los trenes del área, una segunda con despegues más profundos en las arcillolitas del Paleozoico la cual modifica las estructuras ya existentes y un último evento o simultáneo al anterior donde ocurre fallamiento fuera de secuencia.

Ubicando geográficamente los diferentes trenes de estructuras que se presentan, se tiene que en el extremo sur se encuentra la estructura de Cusiana perteneciente al tren de estructuras frontales. Teniendo una expresión en superficie, un anticlinal de gran extensión, Cusiana es un anticlinal de bajo relieve y gran amplitud con una columna de hidrocarburos de aproximadamente 1600 pies y un fluido que varía de una capa de gas condensado pobre a un anillo de petróleo volátil. Para esta estructura, la posición del despegue principal se encuentra en las arcillolitas del Paleozoico lo que contribuye a una estructura menos apretada.

Al movernos hacia el norte la complejidad se incrementa, pasamos a una zona de transición antes de la llamada zona triangular del tren de cabalgamiento. En esta zona intermedia se desarrollan estructuras aisladas denominadas anticlinales apretados asimétricos individuales (*single tight complex asymmetric anticlines*). Un ejemplo de estas estructuras son los campos Cupiagua y Cupiagua Sur. Para el caso de Cupiagua es un anticlinal apretado y de alto relieve, con limbo frontal de capas de alto buzamiento y altamente falladas; el tipo de hidrocarburo presente es un gas condensado rico con muy pocas variaciones composicionales con la profundidad. Para la formación de esta estructura se pasó primero por la

formación de un pliegue apretado, seguido por la generación de un despegue más profundo que corta la estructura original y la aísla de su entorno.

Por último, hacia el NE se encuentran las estructuras que atañen a este trabajo y que constituyen el área de mayor deformación en todo el Piedemonte Llanero. La estructura sinclinal aflorante muestra una mayor deformación y fallamiento el cual es un reflejo directo del mayor acortamiento en el subsuelo. Esta zona es llamada zona triangular de cabalgamiento (*overthusted triangle zone*). En esta área es más marcado el gran acortamiento de las etapas iniciales de deformación y se crea la zona triangular definida al oeste por el plano de falla de la falla de Guaicáramo; al este por la base del sinclinal de Nunchía y hacia la base por la extrapolación del nivel regional (Figura 8).

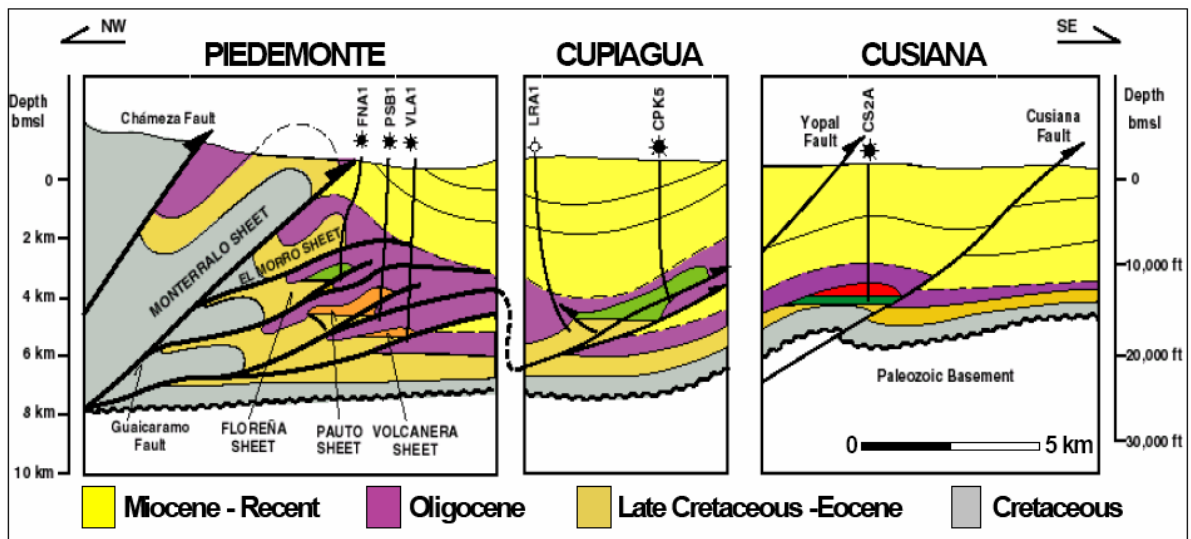


Figura 7. Zonas de deformación presentes en el Piedemonte Llanero. La estructura más sencilla se encuentra hacia el sur del Piedemonte (Cusiana) y la más compleja al norte (Licencia Piedemonte). En esta última se puede ver el sistema dúplex propuesto para estos campos. Tomado de Marínez, 2004.

Esta zona triangular está caracterizada por la presencia de estructuras tipo “dúplex” conformadas por láminas cabalgantes apiladas en una encima de otra. El número de estructuras a lo largo del rumbo varía de dos a cuatro y se presentan relevos a lo largo del rumbo en zonas de transferencia lateral. En esta zona se encuentran los campos de Volcanera, Pauto, Dele y Floreña y la estructura aflorante de El Morro.

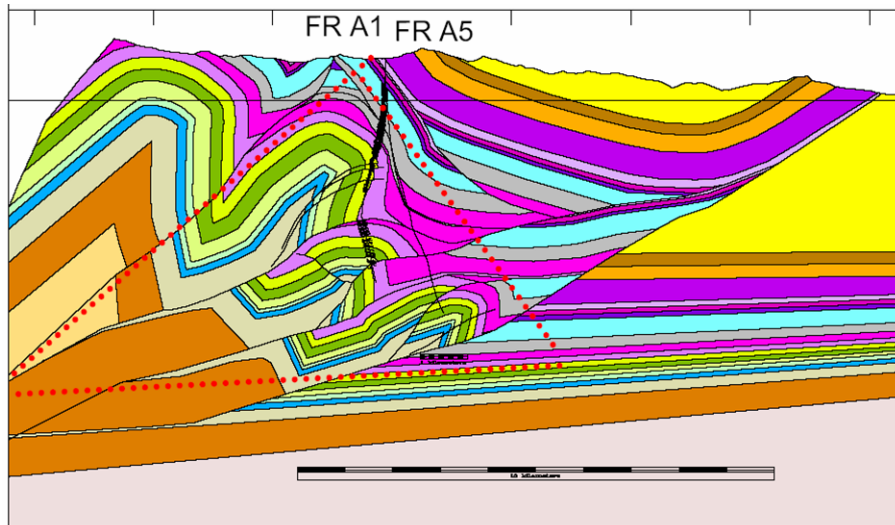


Figura 8. Límites de la zona triangular que enmarca la formación de estructuras tipo dúplex en los campos que se encuentran en la Licencia Piedemonte de BP Exploration Colombia. Tomado de Marínez, 2004.

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN, TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS DE ORIENTACION DE ESTRATOS Y BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES

Debido a que la base de cualquier modelo estructural son los datos de disposición de estratos, es decir, datos de rumbo y buzamiento, se tomó como base este tipo de información proveniente de distintas fuentes disponibles en la Base de Datos de la Compañía. Pero la identificación de las fuentes y la recopilación de esta información en un mismo entorno y archivos no fue suficiente para cada pozo, es decir, se realizó un proceso de depuración de estos datos con el fin de evitar la presencia de varias mediciones a la misma profundidad, ya que esto plantea una ambigüedad en el momento de la interpretación geológica. Para lograr lo anterior fue necesario familiarizarse con cada una de las fuentes de información y realizar una jerarquización en cuanto a la confiabilidad de las mismas, es decir, los datos provenientes de fuentes poco confiables fueron los eliminados.

Los pozos a los cuales se les hizo este tratamiento de datos de buzamiento y dirección de buzamiento son los que se encuentran geográficamente incluidos dentro de la licencia PIEDEMONTE y RECETOR de la compañía (Figura 9). De manera general uno o varios de estos pozos pertenecen a un campo en particular y están asociados. Por tanto se utilizarán para la realización de las secciones objeto de este trabajo. La distribución es la presentada en la Tabla 1.

POZO	CAMPO	SECCIÓN
Floreña 1	Floreña	PT-90-379
Floreña 5	Floreña	PT-90-379
Floreña 3	Floreña	PM-93-56
Pauto Sur 1	Pauto	PT-92-01
Pauto Sur 2	Pauto	PT-92-01
Pauto Sur 3	Pauto	PT-92-01
Dele 1	Dele	PM-96-02
Volcanera 1	Volcanera	PM-96-02
Volcanera 2	Volcanera	PM-96-02
Floreña 4	Floreña	PM-93-04
Floreña 2	Floreña	PM-93-04

Tabla 1. Distribución de los pozos trabajados dentro de la licencia PIEDEMONTE, el campo al cual están asociados y la sección estructural para la cual sus datos serán destinados.

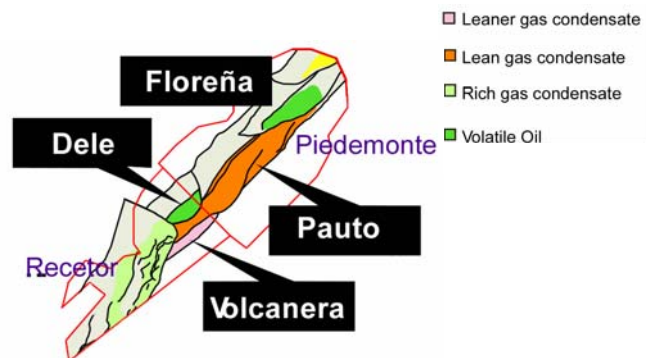


Figura 9. Distribución de los campos trabajados dentro de la licencia PIEDEMONTE y RECETOR de BPXC. Adicionalmente se muestra el tipo de fluidos asociados a éstos. Tomado de presentación *Piedemonte, Recetor, 2005. BPXC.*

Las tablas producto de esta depuración tienen consignadas la siguiente información: Estructura, Grupo, Formación, Miembro, Profundidad Medida (MD),

Profundidad Vertical Real (TVD), Profundidad Vertical Real Bajo Nivel del Mar (TVDSS), Buzamiento, Dirección de Buzamiento, Fuente (Tabla 2).

Measured Depth, profundidad medida. Es la distancia media a lo largo de la trayectoria del pozo, no depende de la inclinación del mismo; *True Vertical Depth*, Distancia vertical verdadera. Es la profundidad del pozo medida verticalmente, es decir, es calculada teniendo en cuenta la inclinación del pozo y la *Measured Depth*; *True Vertical Depth Subsea*, Profundidad Real por debajo del nivel del mar. Es la profundidad vertical del pozo teniendo en cuenta la inclinación del mismo y la *Measured Depth* tomando como referencia el nivel del mar; *Buzamiento*, es la medida de la inclinación de los estratos con la horizontal; *Azimuth del Buzamiento*, es la dirección del buzamiento medido desde el norte; *Fuente*, es el archivo del cual se tomó la información en la tabla consignada, es usado como criterio de calificación de la información adquirida. Adicionalmente en estas tablas se identificó la presencia de fallas.

ESTRUCTURA	GRUPO	FORMACION	MIEMBRO	MD BRT (ft)	TST (ft)	TVDSS (ft)	BUZ	AZM	FUENTE	
NUNCHIA	LEON	GUAYABO		37	37	2566	18	130	VLA1 TOPS DB	
		CHARTE		2980	2965	-376	18	130	VLA1 TOPS DB	
			Upper Leon Mdst	3760	3739	-1156	18	130	VLA1 TOPS DB	
			Middle Leon Sst	4030	4007	-1425	18	130	VLA1 TOPS DB	
			Lower Leon Mdst	4480	4452	-1874	18	130	VLA1 TOPS DB	
	Upper Carbonera (Miocene)	C1			4980	4941	-2371	18	130	VLA1 TOPS DB
		C2			6832	6757	-4209	18	130	VLA1 TOPS DB
		C3			7412	7325	-4783	18	130	VLA1 TOPS DB
		C4			7750	7656	-5118	18	130	VLA1 TOPS DB
		C5			7963	7865	-5328	18	130	VLA1 TOPS DB
	/Unconformity	ULC/ Lower Carbonera (Oligocene)	C6		9198	9081	-6555	18	130	VLA1 TOPS DB
C7				10018	9896	-7372	12	130	VLA1 TOPS DB	
ULC/C7				10260	10137	-7614	12	130	VLA1 TOPS DB	
EL MORRO	ULC/ Lower Carbonera (Oligocene)	ULC/C8		11100	10976	-8452	5	310	VLA1 TOPS DB	
		ULC/C7	Fault	11320	11195	-8670	5	310	VLA1 TOPS DB	
PAUTO		C6	Fault	12175	12043	-9515	5	130	VLA1 TOPS DB	
		C6		12900	12760	-10231	5	130	VLA1 TOPS DB	
		C7		13602	13459	-10930	5	130	VLA1 TOPS DB	
		C8		14900	14751	-12221	5	130	VLA1 TOPS DB	
VOLCANERA	Upper Carbonera	C5		15150	14999	-12468	5	310	VLA1 TOPS DB	
		C6		15560	15405	-13226	5	310	VLA1 TOPS DB	
		C5	Fault	15920	15761	-13951	5	310	VLA1 TOPS DB	
	Lower Carbonera	C6			16855	16684	-14143	5	310	VLA1 TOPS DB
		C7			17435	17259	-14715	5	310	VLA1 TOPS DB
		C8			18010	17829	-15282	5	310	VLA1 TOPS DB
			C8 S1st	18280	18097	-15548	5	310	VLA1 TOPS DB	
			C8 Mdst	18340	18156	-15607	5	310	VLA1 TOPS DB	
	Fault	MIRADOR	Upper Mirador IBU		18402	18217	-15668	5	310	VLA1 TOPS DB
			Mirador Massive Sst		18495	18309	-15760	5	310	VLA1 TOPS DB
Lower-Mirador				18690	18502	-15952	5	310	VLA1 TOPS DB	
				18760	18572	-16021	5	310	VLA1 TOPS DB	
TD		LOS UERVOS		19075	18883	-16331	5	310	VLA1 TOPS DB	

Tabla 2. Tabla esquemática que muestra cada una de las columnas que conforman la información base para el posterior balanceo de las secciones estructurales objetivo. Se presenta un ejemplo de la información que debe estar contenida en cada una de las columnas y la disposición de las mismas.

Estructura, hace referencia a la estructura (geológicamente hablando) que delimita o identifica cada uno de los campos, para este caso se evidencia la

presencia de campos sucesivos con la profundidad; *Grupo*, es el más alto nivel en sentido estratigráfico, es decir, un conjunto de formaciones; *Formación*, cada una de las formaciones de definen un grupo. También se puede presentar la existencia de formaciones que no forman parte de ningún grupo, es el caso de la Formación Mirador; *Miembro*, es cada una de las subdivisiones que puede tener una formación, es el nivel estratigráfico más bajo. Están caracterizados por cambios litológicos. No todas las formaciones deben estar divididas en miembros.

La definición de los topes de las formaciones, límites de estructuras y demás se hizo teniendo en cuenta las prognosis existentes de cada uno de los pozos, es decir, las profundidades estimadas de estos rasgos antes de perforar el pozo y también se tuvo en cuenta los topes oficiales que ya han sido definidos en la Compañía por otros geólogos, apoyados en la información proveniente de cada uno de los pozos. De manera general los pronósticos de la Prognosis se acercan mucho a los topes oficiales ya definidos para cada uno de los pozos.

Ya que se conoce el objetivo de recopilar todos los datos de rumbo y buzamiento existente (generar un archivo completo para cada pozo con el mayor número de datos de buzamiento y dirección de buzamiento teniendo en cuenta todas las fuentes posibles y la calidad de las mismas), es necesario identificar cada una de las fuentes de información utilizadas, ya que esto nos permite evaluar la calidad de las mismas.

3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN UTILIZADAS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS TABLAS RESUMEN

Las fuentes de información primaria utilizadas fueron las que a continuación se mencionan, archivos adicionales a estos utilizados son el producto de compilaciones similares a la realizada para este trabajo y por tanto constituyen una repetición de la información disponible. Las fuentes datos de buzamiento y dirección del buzamiento son: registros DIPMETER, registros UBI, registros FMI, tablas de desviación de pozo y datos provenientes de secciones preexistentes. Archivos adicionales como los topes oficiales y trabajos anteriores tienen como base las fuentes primarias antes mencionadas.

3.1.1 Registros DIPMETER.

Los registros DIPMETER son registros microresistivos que miden la conductividad de la formación por medio de electrodos montados en cuatro patines. Mediante la respuesta obtenida por estos electrodos, es posible determinar la inclinación de los estratos; el desplazamiento relativo, las posiciones azimutales y radiales de cada uno de los sensores es usado para calcular el buzamiento respecto a la herramienta y luego relativo a un sistema verdadero de coordenadas 3D. Además

la herramienta cuenta con un cartucho mecánico que permite obtener la desviación, el azimuth y el rumbo relativo de pozo. También se obtiene el calibre del pozo. Para la realización de la medición se requiere de un medio conductivo.

Las mediciones de los registros DIPMETER proveen información como la presencia de microhorizontes, la dirección de los cambios en algunos parámetros geológicos, saturación de los horizontes del reservorio con hidrocarburos o con agua de formación, cambios diagenéticos en los depósitos. Información sedimentológica como la determinación de la génesis y ambientes, geometría de los cuerpos arenosos, arcillosos o calcáreos, tipo de laminación, dirección del transporte de depositación. En la parte estructural permite la determinación de estructuras formacionales, los componentes de las rocas que han sido cambiados térmicamente y datos de disposición de estratos. Permite adicionalmente la determinación de buzamientos pos depositacionales, tipo y dirección de las fallas, así como fallas cercanas y zonas de falla, inconformidades y discontinuidades, pliegues y zonas de fractura.

Para la interpretación de los registros DIPMETER hay que tener en cuenta el tipo de información que se está tratando, ya que como vimos anteriormente estos registros pueden registrar diferente tipo de información. De manera general los planos que pueden ser leídos por el registro DIPMETER se puede dividir en tres: tectónicos, estructurales y sedimentarios. Por lo anterior se puede presentar que información proveniente de estos tres tipos de planos se encuentren mezclados en el registro. Debido a esto la recopilación de estos datos demandaron especial cuidado para evitar una interpretación errónea de los mismos, tratando de descartar datos sedimentológicos de los estructurales y tectónicos. A pesar de la depuración realizada continua una persistencia de dispersión en la información lo que requiere una representación de estos datos en las secciones a realizar para su validación.

Las corridas que dieron origen a los registros DIPMETER utilizados datan de la época en la que cada uno de los pozos fue perforado, el más antiguo en 1994. Dichas corridas fueron realizadas por Schlumberger y fueron analizados por ellos mismos.

3.1.2 Registros de Imágenes.

Los registros de imágenes son una herramienta especializada dentro de la gama de los registros de pozos en los cuales el procesamiento de los datos da como resultado imágenes electrónicas de alta resolución al interior del pozo. Estos registros se encuentran orientados y tienen alta resolución vertical y lateral, además brindan detalles acerca de las características estructurales (las fallas con una morfología similar a las fracturas pero con diferente textura y desplazamiento), textura, porosidad secundaria y condiciones del pozo. En ocasiones estas imágenes son utilizadas para sustituir las descripciones de núcleos o como base

para datos de aptitud de estratos, como es el caso del trabajo que se está desarrollando. Cuando estos registros son utilizados junto con otras formas de evaluación del reservorio, se pueden definir propiedades de la roca y los fluidos presentes.

Existen tres métodos para obtener imágenes de la perforación: cámaras de video dentro del pozo, imágenes con base acústica o de ultrasonido e imágenes con base en resistividad o microeléctricos. Cada uno de estos métodos está caracterizado por capacidades y limitaciones de la imagen. Las imágenes provenientes de estos registros son procesadas con el fin de filtrar el ruido y aplicar resistividad o amplitud y tiempo de doble tránsito. Las imágenes luego son orientadas utilizando un inclinómetro y un acelerómetro antes de ser interpretadas.

Para la interpretación de estas imágenes se producen registros DIPMETER de alta calidad, los cuales tienen como origen las mediciones de resistividad o las señales acústicas. Una alta densidad de mediciones permite una mayor exactitud en el registro DIPMETER generado. Estos registros generados pueden distinguir los rasgos que no son perfectamente continuos o que son interrumpidos por otros (laminación o estratificación cruzada); perforaciones muy desviadas o ángulos aparentes pequeños entre los planos y el eje de la perforación.

Los diferentes planos medidos intersectan la perforación cilíndricamente, a lo largo de una elipse. Cuando se corta y desenrolla el cilindro (que representa la perforación), la elipse es representada por una trayectoria sinusoidal o cosenosoidal dependiendo de la fase del registro (Figura 10). El azimuth medido en la parte más baja de la senoide indica el azimuth aparente del plano. El buzamiento aparente medido es la máxima lectura posible en el punto de inflexión.

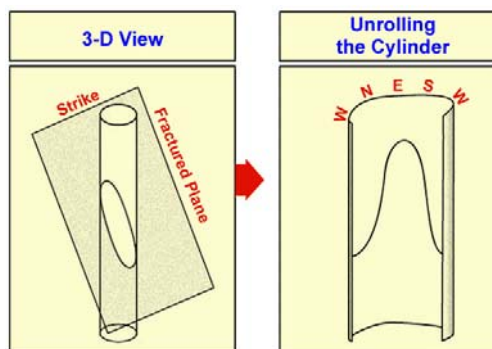


Figura 10. Intersección de un plano con la trayectoria del pozo, la cual describe una geometría cilíndrica. La intersección entre el plano y el cilindro describe una elipse, la cual al ser desenvuelto el cilindro presenta una trayectoria sinusoidal. En forma de senoide son representados los diferentes planos en los registro de imágenes, tanto microresistivos como acústicos. Dependiendo de la orientación del pozo así será la orientación de la senoide. Tomado de Hurley 2004.

❖ Registros UBI

Los registros UBI están basados en señales acústicas. La herramienta emplea un transductor piezoeléctrico giratorio que emite pulsos sónicos a las paredes del pozo y luego mide los tiempos de reflexión de esos pulsos (Figura 11). Las diferencias en el tiempo de viaje y la amplitud de las señales reflejadas indican la presencia de fracturas y otras irregularidades en la formación.

Adicionalmente la herramienta mide la velocidad sónica y la impedancia acústica de los fluidos presentes. La velocidad sónica procesada brinda mayor precisión en los registros CALIPER producidos y la impedancia acústica sirve para realizar correcciones ambientales. Todas las señales tomadas son procesadas para crear una imagen que cubre los 360° de la circunferencia del pozo. Los colores oscuros representan bajas amplitudes y son indicativas de rugosidad en el pozo, así como alto tiempo de tránsito, como lo son los shales y las irregularidades del pozo como derrumbes en el mismo debido a esfuerzos en la perforación o inestabilidad del pozo y los rellenos de fracturas con materiales como shales. Las amplitudes amplias o tiempos de doble tránsito cortos, como las areniscas o las rocas calcáreas se presentan en colores claros como el café, amarillo y blanco. Lo mismo ocurre con los rellenos de fracturas que son cuarzo, calcita y anhidrita (Figura 12).

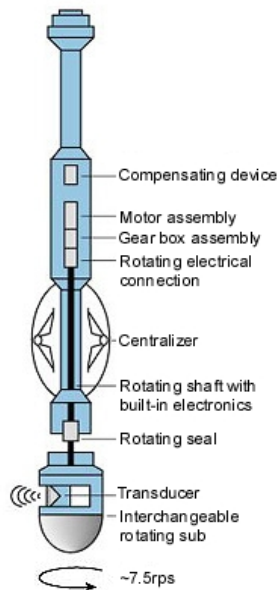


Figura 11. Esquema de transductor y el motor eléctrico de la herramienta UBI de Schlumberger. La misma herramienta emite las ondas acústicas y mide las reflexiones producidas por la pared del pozo, la amplitud y el tiempo de las mismas. Tomado de www.ipims.com *Formation Evaluation. Borehole Imaging.*

Dentro de las ventajas de esta herramienta se destaca que puede ser usada independientemente del tipo de lodo, brinda un cubrimiento de 360° en el pozo y puede ser usado en perforaciones abiertas o con **casing**. Una de las limitaciones

consiste en que o se pueden emplear para lodos muy pesados, así como tampoco se puede usar en pozos cuyo diámetro sea muy grande.

Diez de los once pozos trabajados poseen registros UBI (excepto el pozo Volcanera 1), los cuales se encuentran en medio magnético y análogo y fueron interpretados por la compañía Schlumberger. En estas interpretaciones los datos producidos fueron clasificados en dos grupos, de alta y baja calidad, siendo estos últimos los que mayor rango de incertidumbre presentaban. Los rasgos geológicos identificados fueron fracturas y estratificación. Adicionalmente existe otro grupo de datos no identificados que fueron reconocidos. En la realización de las tablas resumen de cada pozo se tuvo en cuenta la disposición de estratos de alta y baja calidad, estos últimos situados en el nivel más bajo de confiabilidad, por tanto en ocasiones fueron eliminados cuando existían profundidades con varias mediciones, es decir, fueron los datos más frecuentemente eliminados. A pesar de la depuración realizada a estos datos aún persiste dispersión en los mismos, por lo que depuraciones posteriores son necesarias con el fin de refinar las interpretaciones estructurales a realizar. Algunos datos dispersos no eliminados tienen su explicación en una mala interpretación o a características propias de la litología medida. Estas situaciones serán explicadas en apartes posteriores referentes a cada uno de los pozos analizados.

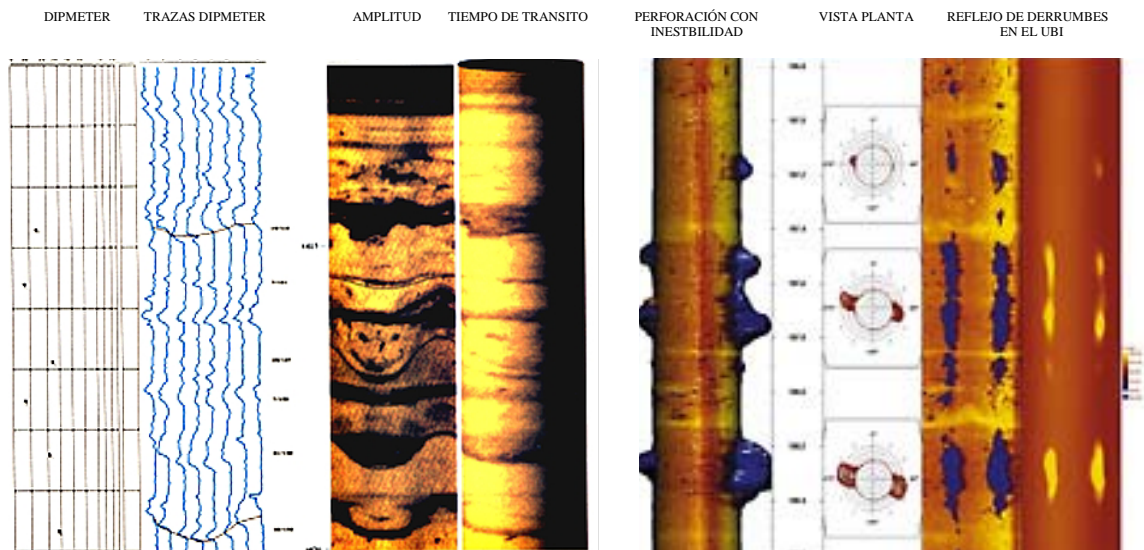


Figura 12. De izquierda a derecha: *DIPMETER*, registro producto de las mediciones hechas en el registro acústico (amplitud y tiempo); *Trazas Dipmeter*, trazas sintéticas que generaran en registro dipmeter luego expuesto; *Amplitud*, representación en dos dimensiones de los planos medidos por la herramienta, se evidencian los sinusoides que representan dichos planos, se ven planos de estratificación y fracturas; *Tiempo de tránsito*, vista en tres dimensiones del pozo; *Perforación con inestabilidad*, se muestran derrumbes o daños sufridos por las paredes del pozo (azul) debido a esfuerzos creados por actividad humana; *Vista planta*, muestra el daño en diferentes magnitudes, las zonas de compresión y extensión se presentan a 180°; *Reflejos del derrumbe en el UBI*, las extensiones o compresiones que sufre el pozo se ven reflejadas en forma de traza verticales separadas 180° la una de la otra. Tomado de www.ipims.com *Formation Evaluation. Borehole Imaging.*

❖ **Registros FMI**

Los registros de imágenes eléctricos están basados en la tecnología de los registros DIPMETER. La herramienta cuenta con una serie de electrodos montados en una almohadilla que mide la microconductividad o microresistividad de la formación en las paredes del pozo. De dichas mediciones surgirán las imágenes de las paredes del pozo. Cada uno de los electrodos en las almohadillas tienen un cubrimiento limitado en el pozo, por lo que la herramienta cubre entre un 40 a 80% de las paredes de pozo.

Las partes no iluminadas aparecen en blanco en las imágenes resultantes. Herramientas modernas utilizan cuatro o seis brazos independiente, cada uno con almohadillas articuladas que contienen múltiples electrodos (Figura 13).

Para la adquisición de los datos la herramienta es corrida dentro del pozo con las almohadillas cerradas. Cuando se comienza el registro, cada una de las almohadillas (cuatro, seis, ocho) es presionada contra las paredes del pozo. Una corriente eléctrica es forzada dentro de la roca a través de los electrodos, mientras que otra mantiene las medidas de alta resolución; sensores remotos miden la corriente después de que esta interactúa con la formación.

Las medidas varían de acuerdo con la conductividad de la formación, la cual refleja los cambios en las propiedades de los fluidos, permeabilidad, porosidad, composición de la roca y textura de los granos. Estas variaciones son procesadas y convertidas en colores sintéticos o escala de grises donde los colores brillantes indican zonas de baja conductividad (baja porosidad, baja permeabilidad y alta resistividad) y los colores oscuros zonas de alta microconductividad (alta porosidad, alta permeabilidad y baja resistividad).

De Los pozos ubicados dentro de la licencia de PIEDEMONTE, solo tienen registros FMI los pozos Pauto Sur 3, Floreña 1 y Dele 1. El resto de los pozos no posee este tipo de registros. En estos registros los datos están asociados a dos tipos de planos, estratificación y fracturas, estas últimas no fueron tenidas en cuenta para la recopilación de la información. Los registros contienen adicional a los datos de rumbo y buzamiento datos de la desviación del pozo, pero tanto los datos de rumbo como los de buzamiento no se encuentran discriminados por su calidad, es decir, no están diferenciados los de alta calidad (baja incertidumbre) con los de baja calidad (alta incertidumbre).

Debido a que no están especificados los datos de baja calidad, la información proveniente de estos registros fue considerada como prioritaria respecto a otros archivos existentes para cada pozo, esto no quiere decir que en ocasiones datos provenientes de registros FMI no fueren descartados luego de una inspección de los mismos y de la existencia de datos que se ajustaban más a la tendencia presente en cada pozo. También en inspecciones posteriores realizadas con

ayuda de un SCAT Analysis y de las secciones de datos adicionales provenientes del FMI pueden ser eliminados por su alta dispersión con respecto a la tendencia del pozo.

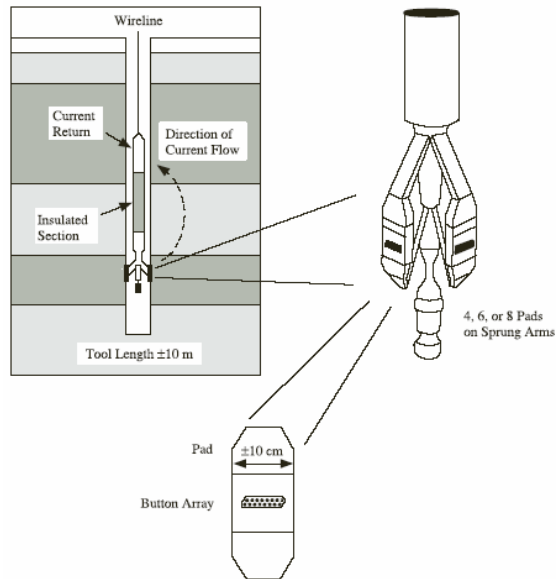


Figura 13. Herramienta utilizada para la corrida de registros de imágenes microresistivas (FMI). Esta herramienta posee cuatro brazos donde cada uno posee almohadillas con electrodos los cuales son los encargados de registrar las variaciones en microresistividad o microconductividad de las diferentes litologías atravesadas por el pozo. La corriente eléctrica originada atraviesa verticalmente las paredes del pozo y es registrada en la cabeza de la herramienta. En esencia esta herramienta es la misma utilizada para correr registros DIPMETER. Tomado de Hurley, I. 2004

3.1.3 Datos de Desviación de Pozo.

Las tablas de desviación de pozo son las que tienen asociado a cada profundidad una medición de la dirección del pozo respecto a la vertical. Pozos con desviación cero no formarán ningún ángulo y por tanto estarán completamente verticales. Adicional a esta medición se presenta el azimuth de la misma, la cual es la orientación respecto al norte.

Datos adicionales son el rumbo y buzamiento que eventualmente aparecen a algunas profundidades. Estos últimos fueron los recolectados para las tablas resumen, pero su confiabilidad es muy baja respecto a otras fuentes, debido a que el número de mediciones es pequeño y por tanto no se puede evidenciar una tendencia en los datos con el fin de mirar su consistencia. Adicionalmente no se tiene exactitud en cuanto a la procedencia de los mismos. Por lo anterior estos datos en ocasiones fueron descartados pero existen casos en los que se mantienen debido a que son la única medición a una profundidad dada. Algunos de estos datos residuales pueden ser en un futuro eliminados cuando se realicen

los SCAT Analysis para los pozos y el balanceo de las secciones a las cuales están asociados.

3.1.4 Datos Derivados de Secciones.

Los datos derivados de secciones son datos sintéticos y son calculados por softwares en cortes estructurales de modelos anteriores de la zona. En general estos datos son muy similares a la tendencia general que hay en los datos reales y adicionalmente poseen ciertos ajustes hechos por el geólogo modelador con el fin de que la sección a la que pertenecen sea lo más geológicamente coherente.

Debido a que el objetivo de este trabajo es realizar nuevas secciones para la licencia PIEDEMONTE, muchos de estos datos son eliminados pero prevalecen aquellos que constituyen una única medición para cierta profundidad. Lo anterior no impide que las nuevas secciones sean similares a las existentes, de hecho, únicamente las estructuras más profundas, las que definen los campos de interés serán las remodeladas, dejando estructuras como la de El Morro que está suprayaciendo a las anteriores intacta. Para estos sectores de las secciones los datos provenientes de secciones preexistentes son válidos y serán utilizadas.

3.2 SCAT, Statistical Curvature Analysis Techniques. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CURVAS ESTADÍSTICAS

Para la interpretación geológica de los datos producto de un registro DIPMETER existen cuatro metodologías básicas: el método “Express”; método cuantitativo; proyección estereográfica y análisis microgeométrico. Debido a la competencia de este trabajo se hablará únicamente del método cuantitativo, ya que es en este donde se encuentra incluido el SCAT Analysis.

Este método usa curvas estadísticas, buzamientos residuales y manejo de buzamientos sintéticos para análisis de desviación. En esta técnica se utilizan gráficas azimutales, angulares y vectoriales, las componentes longitudinales y transversales del buzamiento, las intersección de planos a cualquier azimuth o a lo largo de la trayectoria del pozo, gráficas cilíndricas y polares, gráficas de buzamientos versus azimuth del buzamiento, entre otros. Este método incluye los efectos del buzamiento estructural y adicionalmente permite el cálculo de los buzamientos reales las estructuras y la determinación de sus componentes.

El SCAT es una técnica estadística que es muy útil en la interpretación estructural de los datos provenientes de registros DIPMETER. El SCAT está basado en cuatro conceptos geométricos: curvatura estructural, direcciones estructurales transversales y longitudinales, superficies estructurales y perfil de buzamiento de puntos especiales e isógonos de buzamiento.

De manera general el SCAT maneja los datos en dos direcciones mutuamente perpendiculares: una componente longitudinal y otra transversal (o direcciones T o L). Para ambos casos los datos de buzamiento son graficados contra la profundidad (MD, Measured Depth). La componente transversal (Dirección T) es definida como la vista perpendicular (a través del pozo) que muestra el más alto cambio estructural, es decir, va en dirección del buzamiento; mientras que la componente longitudinal (Dirección L) es la dirección del perfil que muestra el más bajo cambio estructural, es decir, va en la dirección del rumbo de la estructura analizada (Figura14). Uno de los propósitos del SCAT es el de calcular estas direcciones directamente de los datos provenientes del registro DIPMETER, adicionalmente gráficos en direcciones de interés pueden ser realizados.

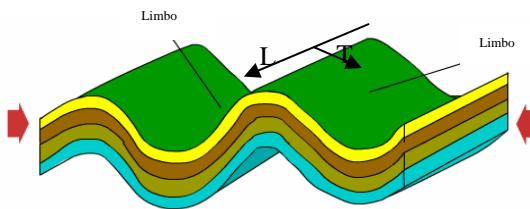


Figura 14. Orientación de la dirección longitudinal y transversal que se tienen en cuenta para la realización de un SCAT análisis, muestran la menor variación en los datos de buzamientos de las capas y la mayor variación de los mismos respectivamente. Ambas direcciones son mutuamente perpendiculares. Tomado de Kare, 2003.

Por medio de la representación de los datos de aptitud de capas provenientes del DIPMETER en las componentes longitudinales y transversales se pueden reconocer patrones que ayudan a identificar el tipo de estructura presenta en el subsuelo, ya que las morfologías de estas gráficas para ciertos rasgos estructurales ya han sido empíricamente determinadas. Los rasgos estructurales anteriormente mencionados son los siguientes:

1. La componente longitudinal del buzamiento versus la profundidad muestra la menor variación en buzamientos. En esta dirección se puede identificar la presencia de cabeceo en los pliegues o inversión en los mismos.
2. La componente transversal del buzamiento versus la profundidad muestra la mayor variación en buzamientos que cualquier otra dirección. La forma de la línea de tendencia estadística en este gráfico posee una relación uno a uno con la curvatura de los estratos en una sección transversal de la zona bajo estudio. Dentro de esta curvatura se puede identificar la ubicación de superficies estructurales como lo son planos axiales, planos kink, planos de inflexión, planos de inflexión secundaria, planos de mínima curvatura y límites de cero deformaciones. En esta línea de tendencia adicionalmente se puede reconocer la presencia de fallas.

Todos los rasgos anteriormente mencionados son reconocibles siempre y cuando éstos intersecten la trayectoria del pozo en cuestión.

Por último el SCAT tiene la capacidad de determinar la aptitud de los rasgos anteriormente mencionados, su rumbo y buzamiento. Adicionalmente a las gráficas anteriores se emplean gráficas donde se relaciona buzamiento versus dirección de buzamiento, las cuales ayudan a determinar las estructuras presentes.

3.2.1 Relación Empírica Entre Rasgos Estructurales Y Las Gráficas Producidas En El Scat Análisis.

Existe el término “*Structural Bulk Curvature*” que hace referencia a la relación que tiene la curvatura de los diferentes estratos en una estructura dada. Este término implica que cada estrato de la estructura comparte ciertas propiedades de curvatura o regularidades con otros estratos en la misma estructura. Estas regularidades pueden ser clasificadas acorde a como el ángulo de buzamiento varía en función del azimuth de buzamiento, a pesar de la ubicación de la estructura. Tres métodos diferentes están disponibles para determinar esta relación: el primero es introducir los datos básicos en un estereonet en forma de un gráfico de polos; otro método es graficar los datos en un diagrama polar tangente. Sin embargo el mejor método para la interpretación de datos dipmeter es el de graficar los datos en una representación DVA, que por sus siglas en inglés significa Dip Versus Azimuth Display (gráfico de azimuth versus buzamiento).

Dentro de los casos de estructuras que se pueden reconocer en el SCAT, se tiene que, los estratos pueden ser planares, plegados o falladas. Si un grupo de estratos es planar o plegado se puede tener que: si es planar las capas son horizontales, con un buzamiento bajo o con un buzamiento más pronunciado.

Un buzamiento de cero muestra que no existe un cambio en dichos datos en cualquier dirección, por ende, no existe una componente longitudinal y una transversal. Para los casos donde se presenta algún valor de buzamiento, la componente transversal es paralela al buzamiento y la longitudinal al rumbo. Si en lugar de planares, los estratos están plegados, se pueden presentar curvatura doble o única. Si se presenta una curvatura única la cresta del pliegue será horizontal o estará cabeceando en un ángulo constante (Figura 15).

En cualquiera de las dos situaciones, la dirección transversal será perpendicular a la cresta o línea de charnela y la dirección longitudinal será paralela a la misma. Si los estratos están doblemente curvados, el contorno de la estructura será elíptico o circular en planta (Figura 16). Si es elíptica, la geometría puede ser aproximada por dos curvaturas con cabeceos unidos por un punto central donde no hay cabeceo, en cuyo caso la dirección transversal será paralela a la dimensión más corta y la longitudinal paralela a la más larga. Si el contorno de la estructura es circular, la dirección transversal convergerá radialmente hacia el centro y la longitudinal estará dispuesta circunferencialmente alrededor del centro.

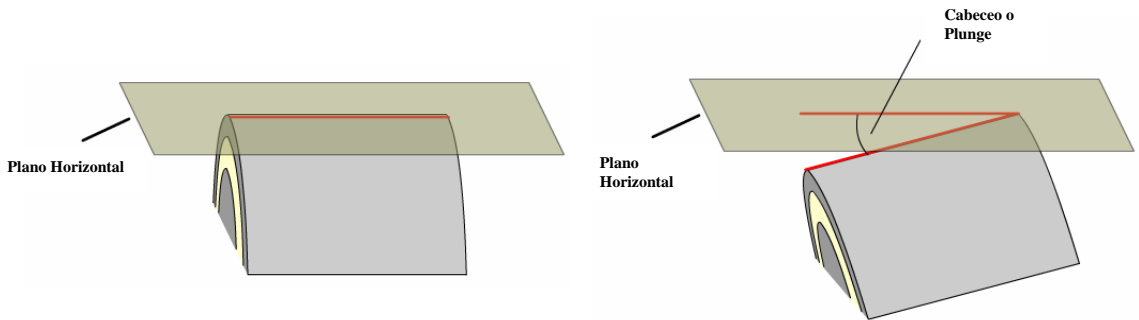


Figura 15 Representación de un pliegue sin cabeceo (izquierda) y con cabeceo (derecha). El cabeceo se presenta cuando la cresta o la línea de charnela del pliegue forma un ángulo con un plano horizontal. El cabeceo en inglés es conocido como *Plunge*. Tomado de Kare, 2003.

Cuando un grupo de datos es representado en un gráfico DVA, se pueden presentar patrones que ya han sido identificados empíricamente y que identifican las estructuras antes mencionadas, ya sea solas o una mezcla de las mismas.

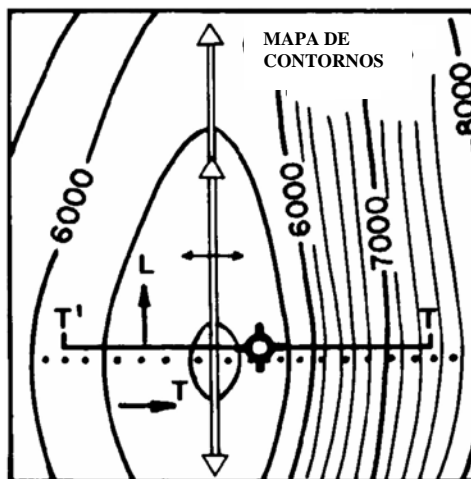


Figura 16. Mapa de contornos de estratos doblemente plegados. Tomado de Bengtson, 1981

❖ Escenarios Planares

Los escenarios planares corresponden a estratos que se encuentran totalmente horizontales, es decir, no presentan buzamiento o inclinación respecto a un plano horizontal. Este es el único escenario que no presenta componente longitudinal y transversal por lo anteriormente mencionado. Para este escenario se tiene que el gráfico de buzamiento versus dirección de buzamiento (DVA) los datos se encuentran distribuidos en la base del mismo, asemejando un buzamiento de cero (en el SCAT Análisis buzamientos de cero en ocasiones son representados por

ángulos entre 5° y 10°). Para gráficos que relacionan el azimuth del buzamiento con la profundidad se tiene que existe una gran dispersión de los datos; el gráfico de buzamiento versus profundidad muestra todos los datos muy cerca de un ángulo de cero, pero para este gráfico erróneamente se presenta un promedio de buzamientos de aproximadamente cinco grados, por las razones anteriormente expuestas. Los gráficos de componente transversal y longitudinal versus profundidad muestran un buzamiento promedio de aproximadamente cero grados cada uno, esto ratificando las características planares y horizontales de los estratos (Figura 17).

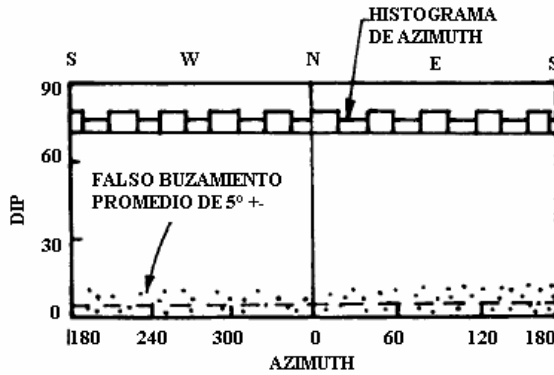
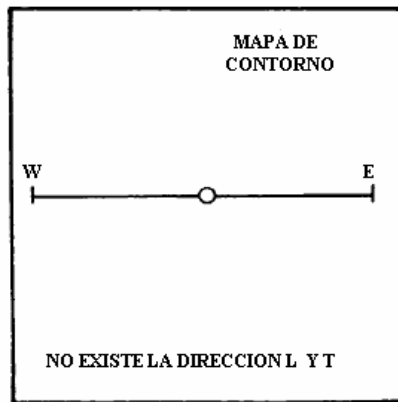
Para estructuras planares con un buzamiento de bajo a alto, se tiene que los gráficos realizados en el SCAT Analysis son muy parecidos, con la diferencia que para el segundo los datos tienen una tendencia más definida. Para el caso de un gráfico DVA, se tiene que todavía existe bastante dispersión, pero a diferencia del caso anterior, hay una preponderancia de datos en una zona determinada del mismo, lo que indica que existe una medida de buzamiento en los estratos y que adicionalmente estos tienen una orientación particular y común para todos. Para el diagrama de azimuth versus profundidad puede existir una dispersión pero adicionalmente una tendencia, cuyo promedio será la dirección de azimuth preferencial para dicha estructura. Por último, para la relación de componente transversal y longitudinal del buzamiento versus la profundidad, se tiene que para la primera existirá una tendencia de los datos, cuyo promedio será el buzamiento promedio de los estratos y para el segundo caso el promedio será cero, es decir, se tiene la menor variación de los buzamientos, se está a lo largo del rumbo de la estructura en cuestión (Figura 18).

- *Escenario de Pliegues sin Cabeceo*

Estos escenarios son caracterizados por rumbos constantes pero buzamientos variables. Para estas estructuras se pueden reconocer elementos estructurales como lo son los planos axiales de los pliegues, planos kink o planos de inflexión; cada uno de estos rasgos posee una forma de representación diferente en las diferentes gráficas que se realizan cuando se hace un SCAT Análisis.

Cuando la trayectoria de un pozo pasa de un flanco a otro de la estructura, esto se ve representado por dos tendencias o modas en los gráficos que involucran dirección de buzamiento. Para el gráfico de buzamiento versus dirección de buzamiento, se tendrán dos grupos de datos de azimuth constante que representarán cada uno de los flancos de la estructura en cuestión. Estos datos estarán separados en dicho gráfico una distancia equivalente a 180° .

En el gráfico de azimuth versus profundidad el paso a través del plano axial se verá evidenciado por un cambio abrupto en la tendencia de los datos, es decir, atraviesan el eje de 0° de derecha a izquierda o viceversa.



ESCENARIO DE NO BUZAMIENTO

1. EL AZIMUTH PRESENTA UNA DISPERSIÓN TOTAL.
2. NO EXISTE LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.

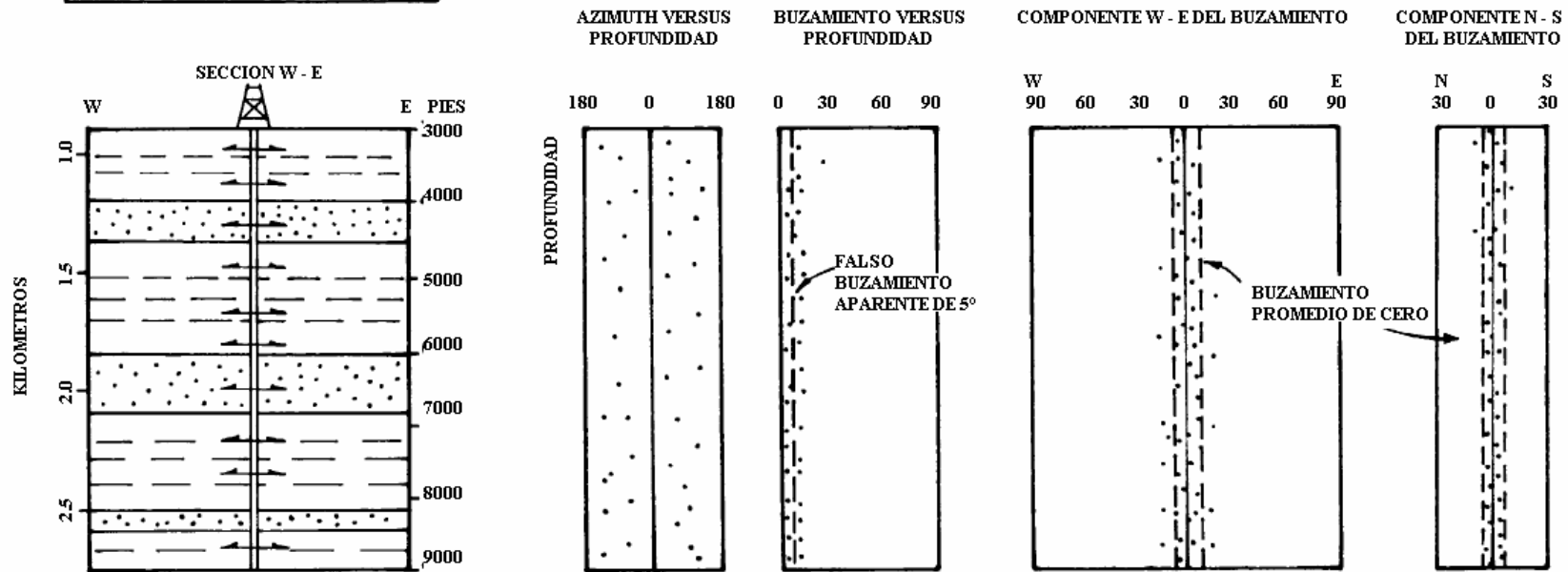


Figura 17. Gráficos del SCAT Análisis para zonas con estructuras planares, no buzantes. Izquierda, vista en planta y en sección de las unidades estratigráficas. Se resalta la no presencia de una dirección longitudinal y transversal ya que no existe una variación de la inclinación de los estratos. Derecha, gráficos del SCAT. Las componentes longitudinal y transversal del buzamiento son el mismo. Se presenta una gran dispersión del azimuth. Tomado de Bengtson, 1981.

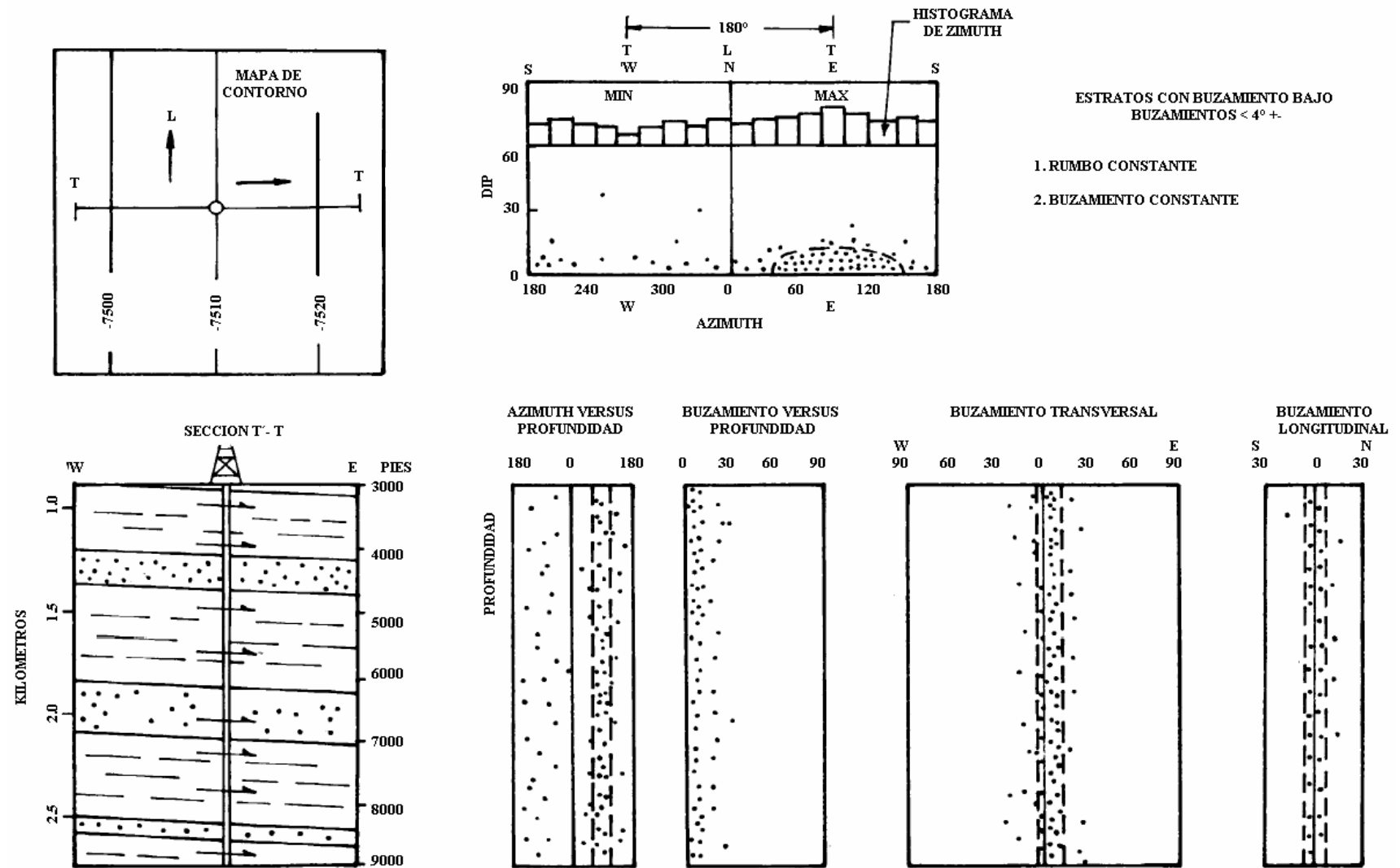


Figura 18. SCAT Análisis para estratos con buzamientos bajos. Izquierda, vista en planta y sección de lo datos mapeados. Derecha, diagramas producidos en el SCAT, para los datos de azimuth se puede evidenciar una tendencia preferencial de los mismos y los datos de buzamientos se alejan en mayor medida de un valor de cero. Tomado de Bengtson, 1981.

Los planos estructurales como lo son planos axiales, ejes de pliegues y planos de inflexión pueden ser reconocidos por el paso de los datos de izquierda a derecha o viceversa; la mayor rata de cambio en los datos graficados; y una cambio de tendencia en los datos, es decir, de aumentar pasan a disminuir o viceversa, respectivamente. Todo lo anterior en la gráfica de componente transversal del buzamiento versus profundidad (Figura 19).

- *Escenario de Pliegues con Cabeceo*

Los pliegues con cabeceo son aquellos cuyo eje axial forma un ángulo con la horizontal. En un SCAT Analysis estos pliegues son representados por una forma de “Herradura” en el gráfico de buzamientos versus azimuth de buzamiento, donde los datos de rumbo cero representan la cresta del pliegue, su azimuth y cabeceo (Figura 20). Para estos escenarios los criterios de identificación son los mismos mostrados para pliegues sin cabeceo.

- *Escenario de Pliegues con Cabeceo e Inversión*

Para estos escenarios, donde se presenta un doble cabeceo de la estructura en cuestión, los mapas de contorno evidencian esta situación, así como la gráfica que relaciona buzamiento con dirección de buzamiento. Para esta última, la distribución de los datos muestra dos parciales “herraduras” donde cada una de ellas representa un cabeceo de la estructura. Estos dos cabeceos se encuentran unidos por una zona de limbos verticales que indican un cabeceo de cero. Los diagramas del SCAT Analysis para este tipo de estructuras son muy similares a los del caso anterior “*Escenario de Pliegues con Cabeceo*”, excepto por el diagrama de componente longitudinal del buzamiento versus profundidad. En este gráfico la inversión de los estratos se evidencia por una tendencia de datos uniformes hacia el norte o hacia el sur que traspasan el eje de cero grados hacia la dirección contraria (Figura 21).

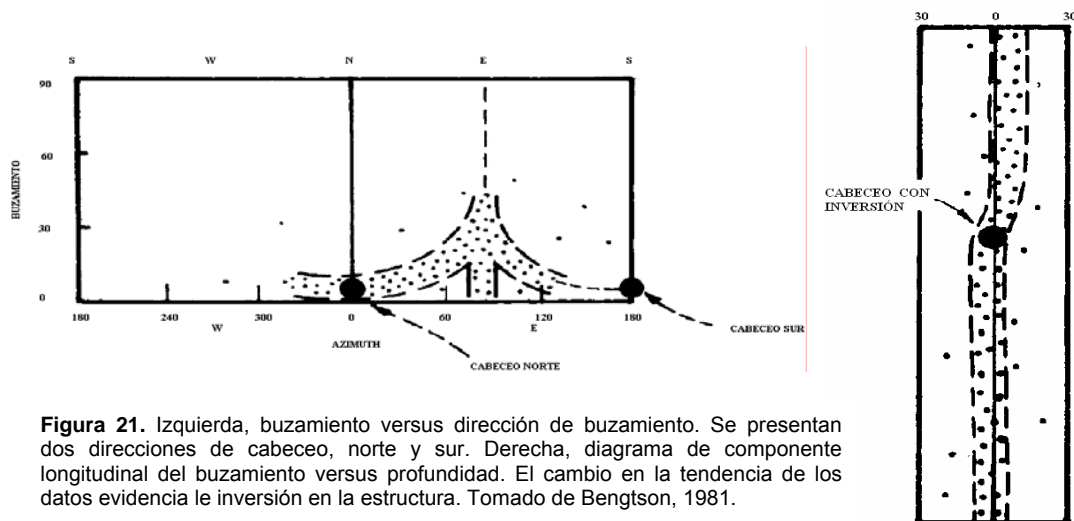


Figura 21. Izquierda, buzamiento versus dirección de buzamiento. Se presentan dos direcciones de cabeceo, norte y sur. Derecha, diagrama de componente longitudinal del buzamiento versus profundidad. El cambio en la tendencia de los datos evidencia la inversión en la estructura. Tomado de Bengtson, 1981.

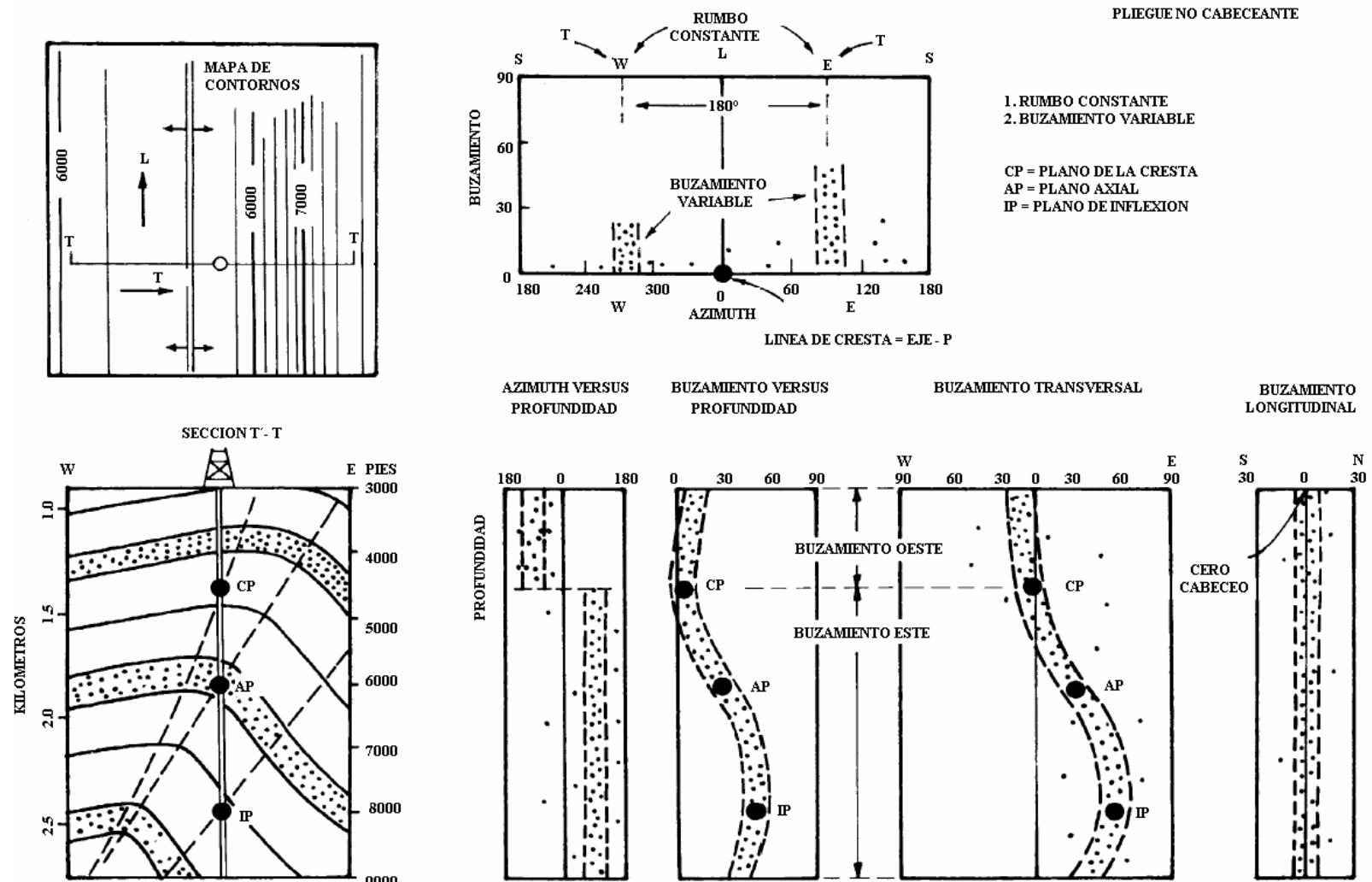


Figura 19. Gráficos del SCAT Análisis para un pliegue sin cabeceo. Izquierda, vista en planta y sección de la estructura analizada. Derecha, diagrama de buzamiento versus azimuth de buzamiento, se distinguen las dos tendencias que identifican los dos flancos de la estructura. Diagramas de componentes del buzamiento, en los cuales se puede identificar la presencia de planos axiales, eje del pliegue y planos de inflexión. Tomado de Bengtson, 1981.

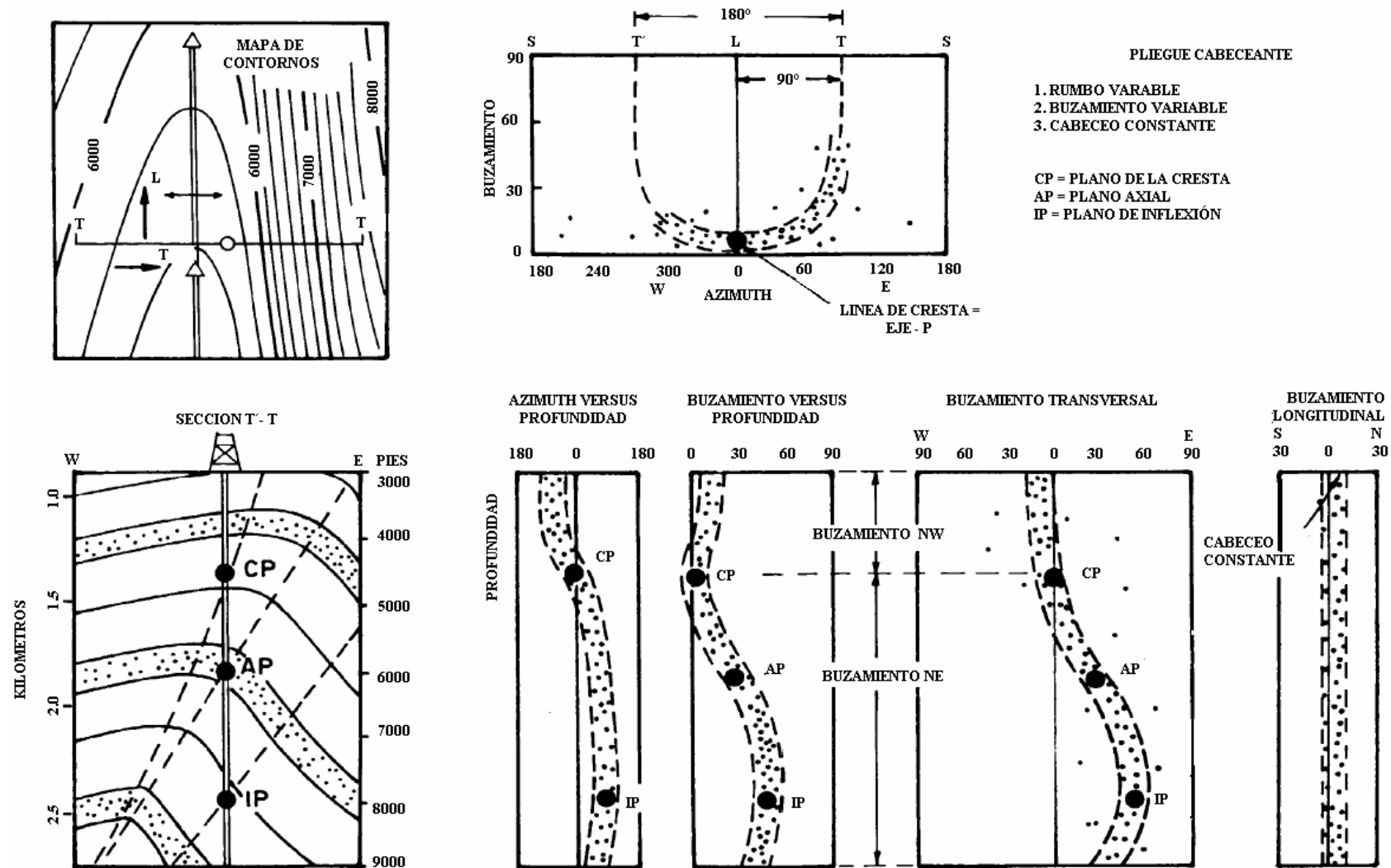


Figura 20. Gráficos del SCAT Analysis para pliegues con cabeceo. Izquierda, diagrama de contornos y sección para el pliegue representado. Derecha, diagrama de buzamientos versus azimuth de buzamientos en el cual se puede identificar el plano axial del eje. Derecha abajo, diagramas de azimuth, y componentes de buzamiento versus profundidad. En ellos se identifican los diferentes planos asociados al pliegue. Tomado de Bengtson, 1981.

❖ **Identificación y Orientación de Fallas**

Para la identificación de fallas normales, el SCAT Analysis crea nuevas tendencias de las gráficas ya conocidas, las cuales nos ayudan a identificar la presencia y aptitud de una falla cuyo plano de falla intersecta la trayectoria del pozo. Para la identificación de las fallas se debe tener en cuenta las siguientes características en las gráficas producto del SCAT Analysis:

1. Los pliegues de arrastre están caracterizados por una curvatura anticlinal en el bloque yacente y otra sinclinal en el colgante.
2. El gráfico de la componente transversal del buzamiento versus la profundidad muestra una anomalía en la cual los datos de buzamiento se mueven en dirección del buzamiento de la falla si la falla es normal, y en la dirección opuesta si es inversa. Sin embargo no hay forma de diferenciar fallas normales de inversas únicamente utilizando los datos de DIPMETER (Figura 22).
3. Una excepción a las anotaciones anteriores ocurre en las fallas lítricas, para las cuales la anomalía de los datos se presenta al lado opuesto de la dirección de buzamiento real de la falla.
4. Las zonas de los pliegues de arrastre son caracterizadas por que las direcciones T y L son mutuamente perpendiculares; pero estas direcciones pueden diferir de las direcciones T y L (transversal y longitudinal) de la estructura regional, es decir, es zonas falladas pueden existir direcciones longitudinales y transversales en la vecindad de la falla y también direcciones longitudinales y transversales regionales.
5. La máxima expresión de los pliegues de arrastre se ve evidenciado en la componente transversal del buzamiento, mientras que es imperceptible en la componente longitudinal del buzamiento (Figura 22).

De los datos provenientes de los registros DIPMETER se puede conocer la orientación de una línea contenida en el plano de falla, donde el azimuth del plano de falla es igual a la dirección longitudinal y el cabeceo es igual al promedio de la componente longitudinal del buzamiento; la dirección (pero no la cantidad) del buzamiento en la dirección transversal local.

Generalmente las direcciones locales longitudinales y transversales de las fallas y los pliegues de arrastre asociados a estas son usualmente las mismas que las regionales, razón por la cual los datos de buzamiento y la zona de pliegues de arrastre quedan incluidos dentro de la misma parte de la gráfica de buzamiento versus profundidad que los datos provenientes de zonas no falladas; el mismo fenómeno ocurre en la gráfica de la componente longitudinal del buzamiento.

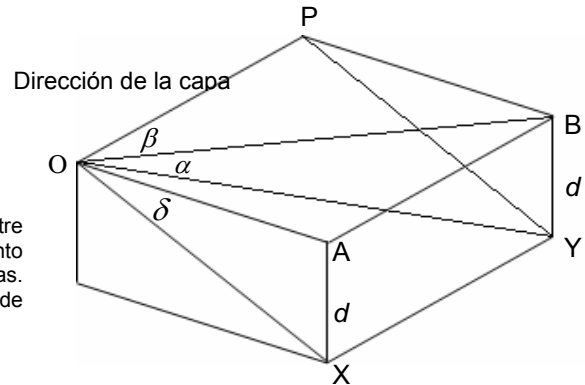


Figura 23. Bloque diagrama indicando la relación entre los diferentes elementos para el cálculo del buzamiento aparente por medio de técnicas trigonométricas. $\angle BOY = \alpha$; $\angle POB = \beta$; $\angle AOX = \delta$. Tomado de Ragan, 1980.

$$Tg \phi = \left\{ (Tg \alpha_2 / Tg \alpha_1) - \text{Cos} \gamma \right\} / \text{Sen} \gamma$$

$$Tg \delta = Tg \alpha_1 / \text{Cos} \phi$$

donde α_1 y α_2 son los ángulos de buzamiento aparente, γ es el ángulo entre los dos rumbos de buzamiento aparente, y ϕ es el ángulo entre el rumbo de α_1 y la dirección de buzamiento real.

Los resultados del SCAT Analysis junto con su interpretación, al igual que los diagramas de polos realizados serán presentados en apartes posteriores de este trabajo junto con las secciones balanceadas a las que están asociados, con el fin de presentar una interpretación estructural que sea consistente con toda la información involucrada.

3.3 TRATAMIENTOS POSTERIOES DE LOS DATOS

Después de realizados los diagramas de SCAT Analysis se hace una modificación de las tablas resumen con el fin de aplicar el formato exigido por el software de modelado estructural GEOSEC 2D. Dicho formato exige que los archivos posean extensiones *.csv* o *.idf* (import data format) y que adicionalmente los datos a incluir posean una distribución específica (Tabla 3).

Para el caso de las columnas estratigráficas asociadas a los pozos, se tomó una columna para cada una de las secciones a balancear. Por lo anterior existen pozos con la misma columna estratigráfica para el software, pero esto no quiere decir que la secuencia que el pozo perforó sea modificada. Sólo se toma un bosquejo de éstas para el software y al momento del modelado se hacen las correcciones pertinentes.

FILE DATA	TYPE	DESCRIPTION
IMPORTA_DATA_HEADE R		Keyword
000N000		(N = number of 3D well)
DATA_VERSION		Keyword
3.1		Data version
WELL_DATA_FORMAT		Keyword
COORDINATE		Well point with x, y, z coordinates.
WELL_3D		Keyword
n	Integer	Number of well points
Well_name	Simple string	Well kind code
WELL_IMPOR_3D		Keyword
x y z	Floating point	x, y, z coordinates
dip	Floating point	Dip in degrees
dip_azimuth	Integer	Dip azimuth
geo_body	Integer	Boundary code
su_label	Simple string	Stratigraphy unit label
...		
end of file]		

Tabla 3. Formato del archivo de cada uno de los pozos para importar a GEOSEC 2D. Los datos incluidos en estas tablas se deben presentar en el orden aquí indicado para que puedan ser aceptados por el software. Tomado de *Well File Format. Online Help, Geosec 2D. Paradigm.*

3.4 BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES

El balanceo de secciones estructurales es una técnica en geología estructural que conduce al entendimiento de la evolución geológica, tectónica, estratigráfica y en particular del sistema petrolífero de una cuenca; el balanceo está fundamentado en el hecho de que **“La materia no se crea ni se destruye solamente se transforma”**. Es así como el balanceo de secciones busca la construcción de perfiles estructurales geoméricamente viables que son la compilación de geología de superficie, sísmica, datos de pozos (topes formacionales y registros Dipmeter), gravimetría, etc. Para probar la viabilidad de una sección hecha a mano se parte del hecho que los estratos estuvieron originalmente sin deformar, ya que una sección que no puede ser geoméricamente restaurada a su estado pre-deformado es imposible que exista. Una sección que balancea no necesariamente es cierta, pero una que no lo hace es absolutamente errónea.

Para la realización de una sección en primera instancia se debe escoger la línea por la cual se va a realizar la sección. Para esto la línea de sección escogida debe ser paralela a la dirección del transporte, es decir, es paralela a los esfuerzos principales que actúan en la zona de interés. El indicador más común del

transporte tectónico es el promedio de la tendencia de las estructuras a escala regional; es así como la línea de sección es seleccionada perpendicular a los mayores fallamientos, ejes de los plegamientos mayores. Los pliegues y fallas de escalas menores no deben ser usados para determinar la dirección del transporte, especialmente en estratos muy delgados y en áreas de alta deformación adyacentes a fallas.

Después de determinar la dirección del transporte tectónico es necesario seleccionar una ubicación específica para la primera sección que se vaya a realizar. No importa cual es el propósito o la extensión areal de la zona de estudio; la primera sección debe ser regional y se debe extender hasta la zona no deformada, es decir, el **foreland**. Esta sección debe ser construida cerca a áreas con gran desplazamiento, generalmente cercano a la parte central de las estructuras.

3.4.1 Incorporación de Información Estratigráfica.

De manera general hace referencia a la selección de la información estratigráfica necesaria para el balanceo, tal como es los espesores de las diferentes unidades involucradas en la sección, la existencia de discordancia, acuñaientos, etc. Si se llega a trabajar con espesores estratigráficos incorrectos, la sección posiblemente balancee y pueda ser restaurada pero será inaceptable (geometría vs realidad). Cuando se utilizan espesores subestimados, puede ser necesario adicionar estratos fallados extra para llenar espacio en la sección; si por el contrario los espesores son sobreestimados el geólogo se ve forzado a profundizar más el basamento o a alterar la sección para acomodar el volumen extra que se presenta. Errores como estos en la industria repercuten en zonas de acomodamientos menores o mayores para el hidrocarburo y por tanto un erróneo cálculo de reservas y evaluación del yacimiento.

Datos correctos de espesores pueden ser obtenidos de medidas de afloramiento, literatura, datos de pozo o datos sísmicos. Los espesores pueden ser también obtenidos por medio de cálculos utilizando la solución de tres puntos en mapas geológicos o fotografías aéreas.

3.4.2 Identificación de Familias Estructurales.

Los elementos estructurales plasmados en una sección deben ser evidenciables en el terreno, en secciones sísmicas o en pozos. Las características de las estructuras deben ser dibujadas en la sección tal como aparecen en los datos recopilados. Así, las diferentes variaciones que pueden presentar una estructura o una unidad lítica estructural deben ser tenidas en cuenta en la sección, ya que en secciones regionales extensas se pueden presentar variación en el estilo estructural, al igual como se pueden cruzar zonas con metamorfismo incipiente o fallamiento que incluya el basamento.

3.4.3 Diagramas de Separación Estratigráfica.

Los diagramas de separación estratigráfica relacionan las unidades estratigráficas del bloque colgante versus las unidades estratigráficas de el bloque yacente en una base geográfica. Estos diagramas son utilizados para identificar el cambio en la separación estratigráfica a lo largo de las trayectorias de las fallas (flat – rampa – flat). Estos diagramas generalmente son construidos a lo largo del rastro de la falla. Una preparación cuidadosa de los diagramas de separación estratigráfica discrimina los cambios longitudinales en la geometría de la falla de los cambios en la dirección del transporte. Los diagramas de separación estratigráfica dan mucha información de cómo dibujar la trayectoria del fallamiento en el subsuelo.

3.4.4 Calculo de la Profundidad del Basamento.

En busca de determinar el límite inferior de la sección, es necesario determinar la profundidad del basamento autóctono no deformado debajo de la capa plegada mas profunda. En muchos terrenos, el basamento estructural coincide con un basamento estratigráfico de rocas cristalinas. El calculo de la profundidad del basamento se puede realizar utilizando métodos geofísicos, datos preexistentes, es decir, bibliográficos, datos de pozo, o espesores en superficie de paquetes estratigráficos en una faja fallada.

Los métodos geofísicos incluyen medidas magnéticas superficiales y aerotransportadas, gravimetría, magnetotéluricos y datos sísmicos. De los anteriores métodos, solo el sísmico proporciona los datos más confiables a cerca de la profundidad del basamento, ya que los otros se pueden ver seriamente afectados por las características de la roca medida. Cuando no se poseen pozos, un promedio de las velocidades puede ser utilizado para obtener una profundidad aproximada del basamento.

3.4.5 Cálculo de la Profundidad de Despegue.

El cálculo de la profundidad del despegue está basado en el principio de conservación del volumen. Se asume deformación plana para así reducir el escenario a una conservación del área. Si la sección por encima del despegue (decollement) es acortada por plegamiento, entonces el lado derecho de la sección se moverá hacia delante por una cierta cantidad e acortamiento. El área generada por la traslación que produce el plegamiento será igual al área del pliegue resultante por encima del datum no deformado. Es decir, el área del acortamiento, A_t , es igual al espesor de la sección deformada, t . La Figura 24 muestra los diferentes elementos involucrados en el cálculo de la profundidad del despegue.

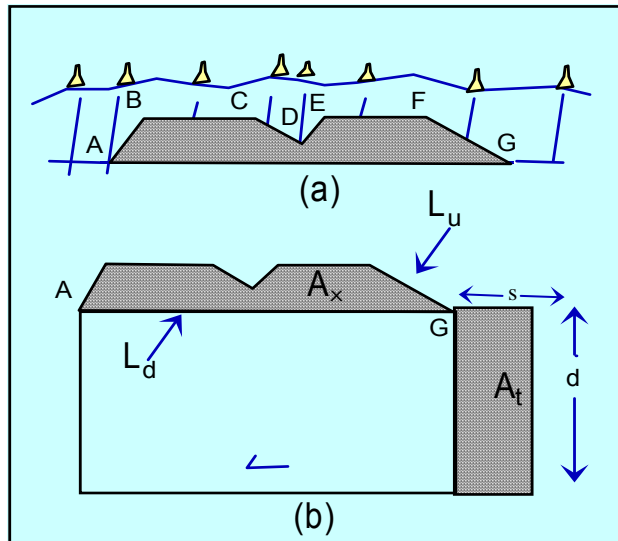


Figura 24. Elementos que conforman una sección estructural y que son utilizados en el cálculo de la profundidad del despegue de las estructura. Tomado de Murillo y Sarquez, 2004.

$$A_t = d \cdot s$$

Debido a que A_t y A_x son iguales:

$$A_x = d \cdot s$$

y

$$d = A_x / s$$

El acortamiento, s , es igual a la diferencia entre L_u y L_d .

$$s = L_u - L_d$$

Entonces,

$$d = A_x / (L_u - L_d)$$

El espesor de la sección deformada y la profundidad del despegue.

3.4.6 Retrodeformación de la Sección.

La restauración de la sección es un proceso iterativo donde se busca ubicar los estratos en las posiciones que se encontraban antes de la deformación. Si la deformación de una capa involucra únicamente plegamiento y fallamiento, el volumen y por lo tanto el área de la capa no debe cambiar durante la deformación. La conservación del área no puede ser asumida por deformación que involucra grandes pérdidas de volumen por disolución por presión (clivaje). También se debe tener en cuenta que la longitud de un estrato n debe variar durante la deformación.

- Restauración basada en el balanceo del área. En general si las capas durante la deformación cambian significativamente de espesor, no podemos únicamente estirar las capas y restaurar la sección; debemos restaurar la

sección, de tal forma que las áreas de la sección deformada y restaurada sean las mismas. A continuación se describen los pasos utilizados para restaurar por área (Mashak y Woodward, 1988) (Figura 25):

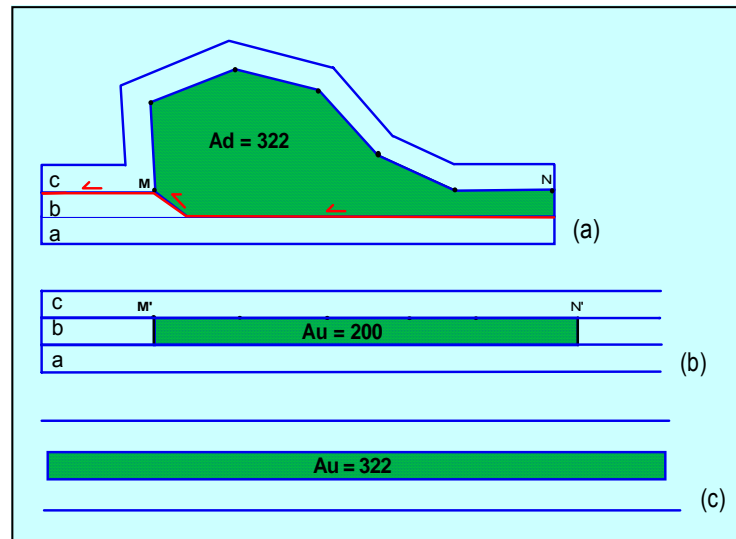


Figura 25. Pasos para realizar una restauración por balanceo por áreas. Tomado de Murillo & Sarquez, 2004.

- ♦ Se crea un arreglo estratigráfico teniendo en cuenta el espesor de la capa que se mantenga estable en otra parte de la sección.
- ♦ Se mide el área de la capa restaurada y se compara con la deformada. $A_u \approx A_d$
- ♦ Si el área no coincide, la capa se alarga hasta que el área sea la misma en las dos secciones (deformada – restaurada), $A_d = A_u$.
 - Restauración basada en el balanceo por longitud. La longitud de las capas en la sección deformada debe ser la misma que en la sección restaurada. Se mide la longitud de la capa deformada, y se restaura desde la línea de inicio (*pin line*), con la misma longitud, teniendo como referencia el nivel regional (Marshak y Woodward, 1988).

Por último se debe tener en cuenta la terminología utilizada en la realización de secciones estructurales y el balanceo de las mismas. La Figura 26 muestra los diferentes elementos identificados en una sección y cuya relación geométrica entre los mismos darán origen a las leyes del balanceo.

- ♦ **HanginWall:** bloque colgante de una falla de cabalgamiento.
- ♦ **Footwall:** bloque yacente de una falla de cabalgamiento.

- ♦ **Cutoff:** punto de intersección entre un contacto (estrato), y una falla. Existen **cutoff** en el **hangingwall** y en el **footwall**.

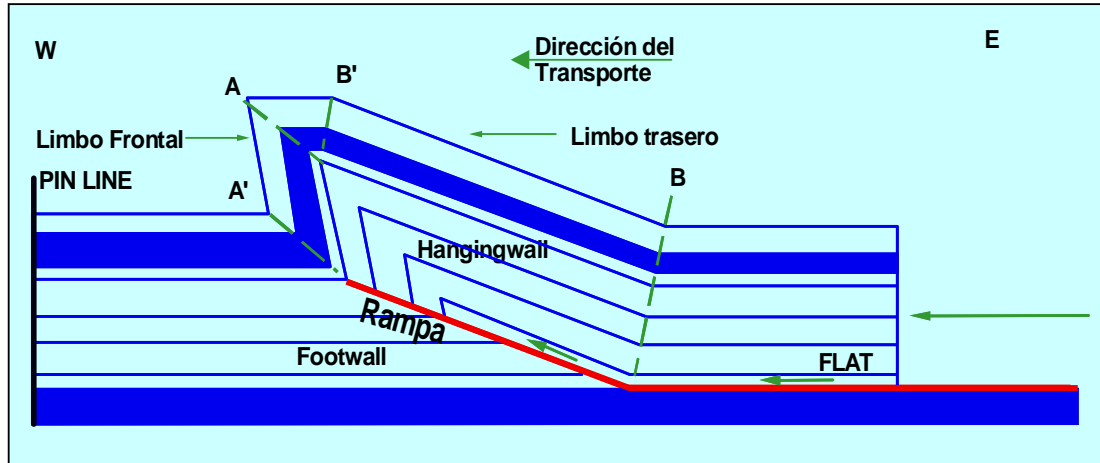


Figura 26 Terminología utilizada para cada uno de los elementos estructurales dentro de una sección a restaurar. Tomado de Murillo & Sarquez, 2004.

- ♦ **Loose line:** línea de referencia que se utiliza a un ángulo de la estratificación en algunos sitios de la sección para mantener el control del desplazamiento entre dos puntos. La discontinuidad o el zig-zag en el **loose line** puede ser vista como un indicativo que la restauración de la capa no es consistente, en la Figura 27 se muestra las formas admisibles del **loose line** para secciones balanceadas.
- ♦ **Pin line:** línea de referencia desde donde se inician las mediciones de longitud en la sección. Estas pueden ir desde superficie hasta el basamento. Esta línea es el inicio en el procedimiento de la restauración, se localiza idealmente en el área donde no haya deformación.
- ♦ **Rampas:** es la parte de una falla de cabalgamiento que corta la estratificación, existen rampas en el **hangingwall** y en el **footwall**. Comúnmente tiene ángulos entre 10° y 30°.
- ♦ **Flat:** es la parte de una falla de cabalgamiento, la cual es paralela a la estratificación, o paralela a la superficie de **datum** regional. Existen **flats**, tanto en el **hangingwall** y en el **footwall**.
- ♦ **Acortamiento:** es la distancia en porcentaje que resulta de restar la longitud de la sección deformada de la restaurada.

Ya conociendo los diferentes elementos que conforman una sección estructural, se debe tener en cuenta las siguientes reglas para que el proceso de retrodeformación culmine exitosamente: (Marshak y Woodward, 1988),

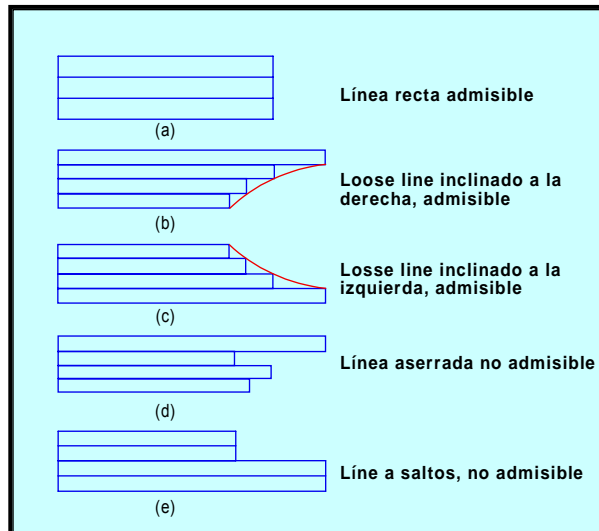


Figura 27. Tipo de *Loose line* en las secciones restauradas. Tomado de Murillo & Sarquez, 2004.

- Deformación en el plano. En general se debe utilizar el método de balanceo en regiones donde masas considerables de rocas no hayan sido movidas hacia dentro o hacia fuera del plano.
- Número de **flats** y **rampas**: para que los bloques de una falla coincidan sin traslapes ni vacíos durante la restauración se debe tener en cuenta,
 - El número de **flats** y rampas debe ser igual en el **footwall** y en el **hangingwall**.
 - La longitud de los **flats** debe ser aproximadamente igual, no así en las rampas.
 - El ángulo de las rampas tanto en el **hangingwall** como en el **footwall** debe ser igual.
- El nivel estratigráfico en el que se encuentra una falla debe ser igual tanto para el **hangingwall** como para el **footwall**.
- Conservación en el desplazamiento de las fallas: la magnitud del desplazamiento de una falla debe ser constante a lo largo de su trazo o debe variar de una manera explicable.

La restauración se puede realizar manualmente o asistida por computador, en ambos casos la sección en cuestión es dividida en dominios, los cuales son restaurados uno por uno por medio de traslación, rotación y deformación de tal

forma que todos ajusten en una configuración sin deformar. La restauración de cada dominio está descrita por una ecuación de transformación Euleriana.

4. RECONOCIMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES BASADOS EN EL SCAT ANALYSIS. CONSTRUCCIÓN Y BALANCEO DE SECCIONES ESTRUCTURALES

El propósito de este capítulo es el de presentar los diagramas producto del SCAT Analysis de cada uno de los once pozos involucrados en el área de trabajo, con el fin de analizar dichos resultados y por ende identificar la presencia de algunos rasgos estructurales importantes. De manera general la evaluación de estos pozos se hizo teniendo en cuenta los diferentes diagramas producto del SCAT y algunos gráficos realizados con la ayuda de Excel y el demo del software Tectonics FP. La presentación de estos resultados se dará por sección, es decir, los pozos serán agrupados según la sección sísmica a la que están asociados (Tabla 1).

Para la realización de las secciones es fundamental que las coordenadas geográficas de los pozos y la sección sísmica base para la sección estructural sean próximas, es decir, la proyección de estos pozos en la sección incluya el menor margen de error posible. Adicionalmente debido a que se tomó como base las secciones estructurales oficiales de la compañía, fue necesario determinar la orientación de las mismas para mirar su compatibilidad con las líneas sísmicas. En caso de que las secciones ya mencionadas no tuvieran la misma orientación de la línea sísmica, era entonces necesario proyectarla a las coordenadas deseadas.

Para realizar esta inspección se realizó un gráfico en el cual se relaciona la orientación de las líneas sísmicas, la orientación de las secciones estructurales del modelo existente y la ubicación de los pozos. Esto se presenta en la Figura 28, en la que se puede apreciar claramente que cuatro de las cinco secciones estructurales hechas para la interpretación anterior coinciden con las líneas sísmicas que serán usadas en este proyecto. La línea PM-93-56 que no coincide fue objeto de un proceso de migración con el fin de ser habilitada para su uso. Lo anterior brinda la posibilidad de tomar como base estas secciones para iniciar el proceso de balanceo, ya que como se mencionó en apartes anteriores de este trabajo algunas estructuras como la de EL MORRO no será modificada, de hecho, las estructuras que forman los campos de FLOREÑA, PAUTO y VOLCANERA sufrirán modificaciones pero tomando como base la interpretación existente. El mapa que es resultado de esta depuración se presenta en la Figura 29, la cual es el mapa utilizado por el software GEOSEC para el trabajo realizado.

Para el caso de los pozos se puede apreciar la cercanía de los mismos a las secciones a balancear, sin embargo para su utilización es necesario proyectarlos a las secciones de forma normal con la ayuda del software. La proyección normal consiste en recalcular los datos pertenecientes a cada pozo en la sección deseada de manera perpendicular, es decir, calcular los buzamientos y rumbos de buzamientos aparentes del pozo para este plano.

ORIENTACION DE LÍNEAS SÍSMICAS Y SECCIONES ESTRUCTURALES DE LA INTERPRETACIÓN EXISTENTE

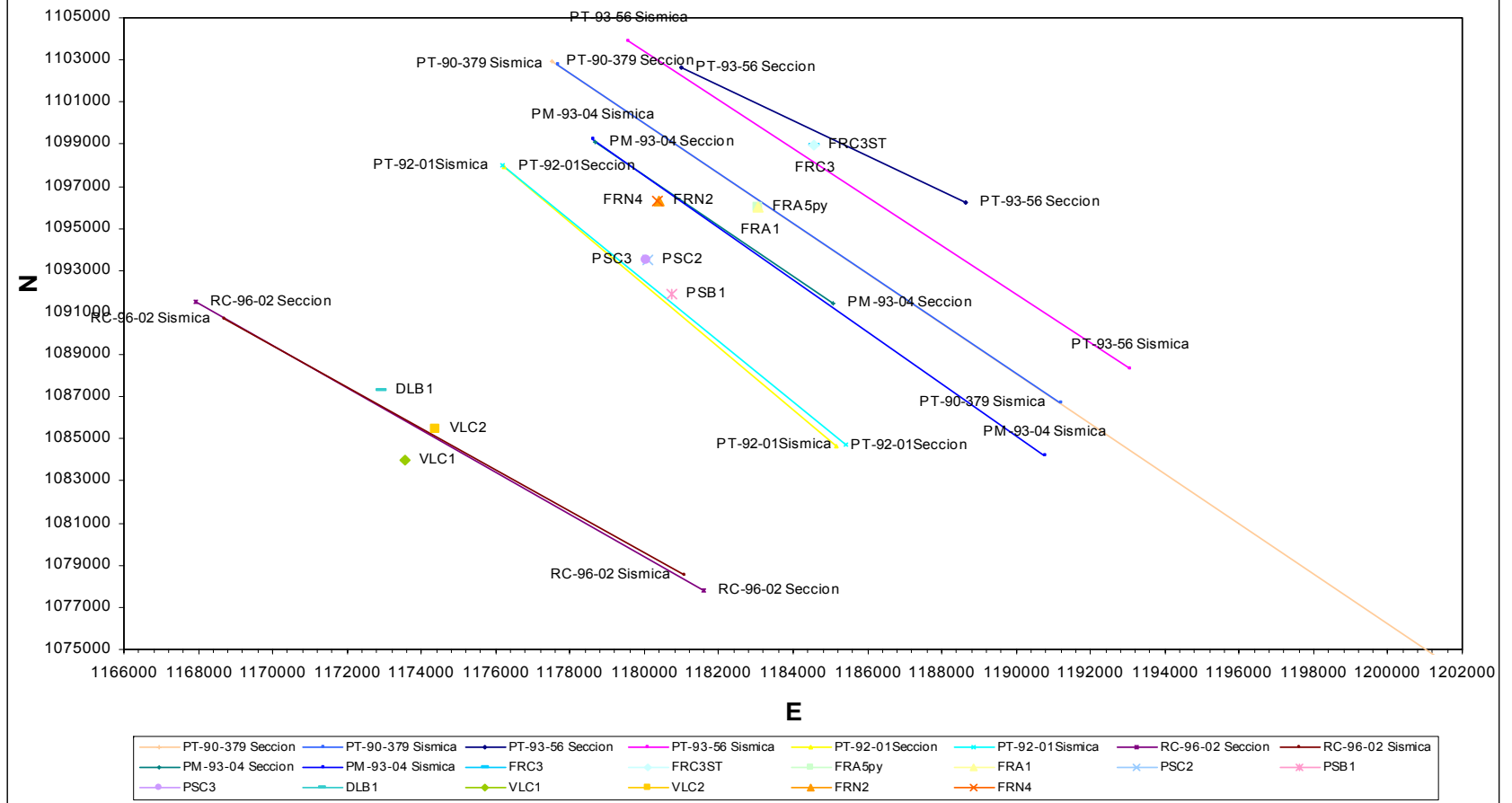


Figura 28. Distribución espacial de las líneas sísmicas, las secciones estructurales de la interpretación oficial existente y los pozos asociados. De las secciones existentes es necesario proyectar sobre la línea sísmica únicamente la sección asociada a la línea sísmica PM-93-56, asociada al pozo FRC3.

Ya con los pozos proyectados en las secciones a usar se procedió a eliminar los datos anómalos o muy dispersos por medio de inspección visual, estas correcciones también fueron aplicadas al SCAT Analysis realizado; con esta información lista para cada pozo se procedió a realizar la interpretación de los resultados arrojados por el SCAT, con el fin de validar por medio del reconocimiento de los rasgos estructurales la interpretación oficial con la que cuenta la compañía. La descripción de cada una de las secciones se realizará en sentido sur – norte, es decir, se inicia con la sección de los campos Dele y Volcanera y se terminará con la estructura del campo Floreña.

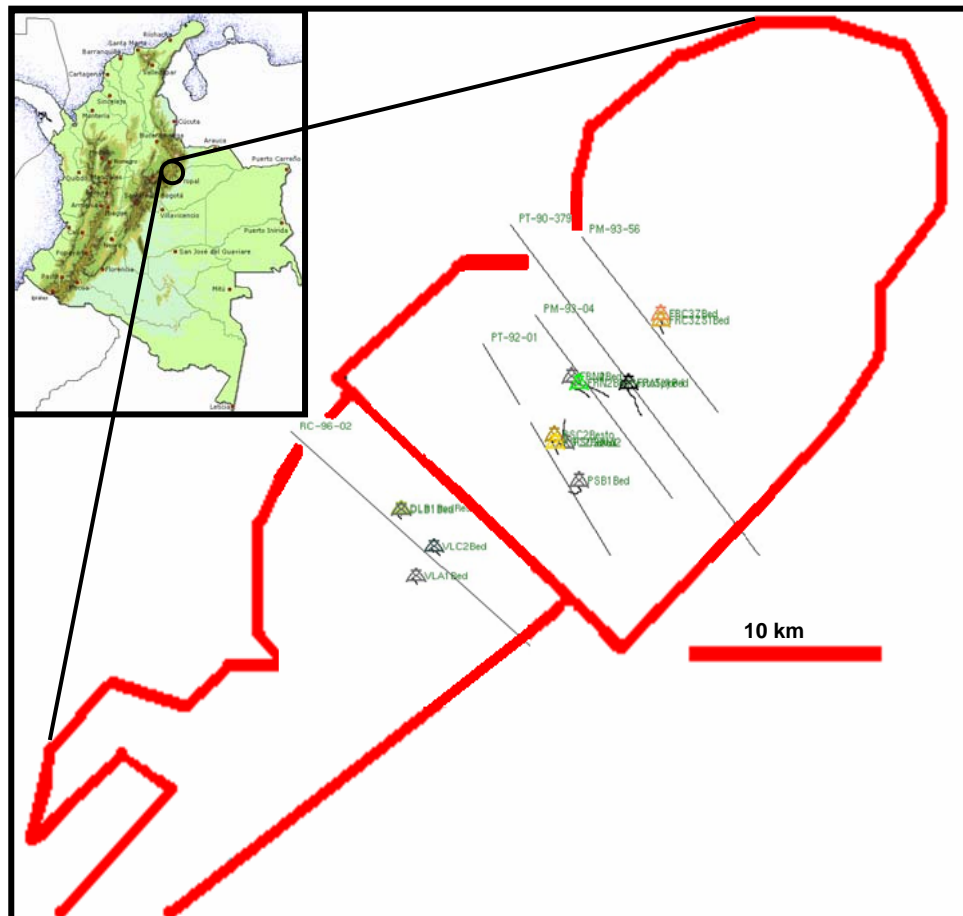


Figura 29. Ubicación geográfica de las licencias de Piedemonte y Recetor con ubicación de las líneas sísmicas y pozos utilizados para este trabajo.

4.1 SECCIÓN RC-96-02 – POZOS DELE 1, VOLCANERA 1 Y VOCANERA 2.

4.1.1 Pozo Dele 1.

Pozo ubicado hacia el sector más NW de la sección. La principal característica de este pozo es la poca densidad de datos existentes y la distribución de los mismos en ciertos sectores de la trayectoria del pozo. Lo anterior crea zonas en las cuales no se presentan datos estructurales.

Las gráficas del SCAT Analysis derivadas de los datos de este pozo (Figura 30) permiten reconocer diferentes rasgos estructurales, teniendo en cuenta los criterios de interpretación explicados en el Capítulo 2. Algunos de estos elementos ya habían sido identificados en trabajos anteriores y otros son nuevos aportes de éste trabajo. La Figura 30 muestra el elemento identificado y el comportamiento al cual está asociado en la gráfica.

Dentro de las estructuras reconocidas están: falla asociada al sistema imbricado del flanco frontal de la estructura de El Morro; falla de la estructura de El Morro; plano axial en la estructura del campo Dele. Adicionalmente se identifica dos nuevas fallas a -4079 m y -4200 m. La primera de ellas con una zona de arrastre pequeña y el plano de falla tiene un rumbo que corta el rumbo regional de las estructuras, con buzamiento hacia la izquierda.

En la gráfica de azimuth versus profundidad se reconocen dos patrones de datos, el primero que va de -3400 m a -3700 m y cuya magnitud es de 120° aproximadamente. El segundo tren es de más o menos 300° y va de -3700 m al TD. Este cambio es producto del cabalgamiento de la estructura de Dele sobre la de Volcanera producto del fallamiento.

La dirección longitudinal calculada para la estructura asociada es de 35° y la transversal es de 125° , con un cabeceo de 23° . Éste último dato carece de confiabilidad debido a que existe una dispersión muy alta de mediciones de buzamiento longitudinal calculado (Figura 30). En la Figura 31 se muestra la vista en planta de la dirección longitudinal y transversal, la cual coincide con el tren regional de las estructural aflorantes.

Por último se revisan los diagramas de polos y el diagrama DVA para determinar la dirección de cabeceo y la magnitud del mismo, así como el tipo de estructura representada por los datos medidos. El diagrama DVA permite identificar un pliegue con único cabeceo, cuyo eje tiene rumbo de aproximadamente 270° de azimuth. Lo datos medidos en los diferentes registros corresponden a uno de los flancos de la estructura, el cual tiene rumbo NW. Por otra parte el diagrama de polos muestra una distribución donde el plano que mejor representa los datos

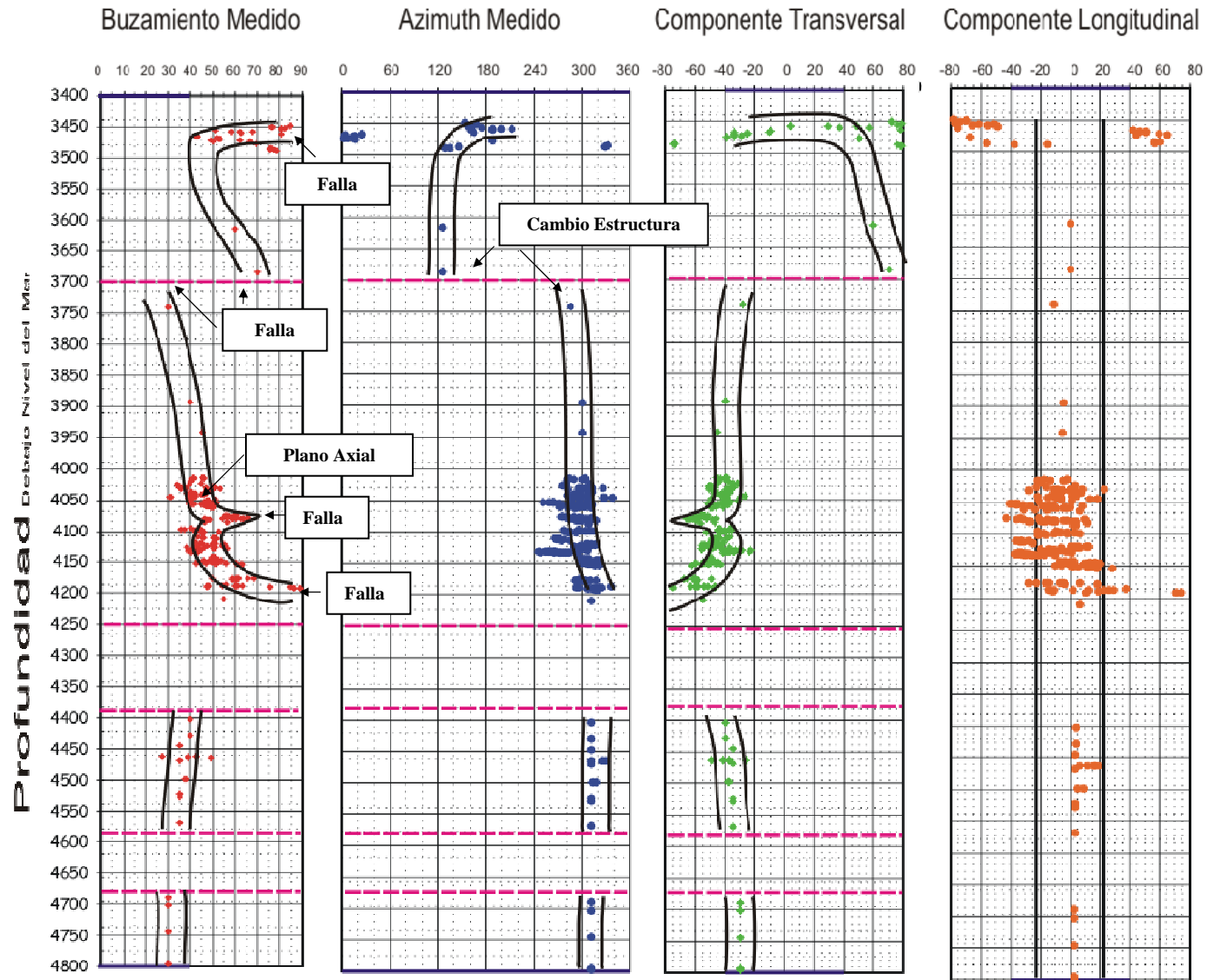


Figura 30. Diagramas del SCAT Análisis para los datos estructurales medidos en la estructura del campo Dele en el pozo Dele 1.

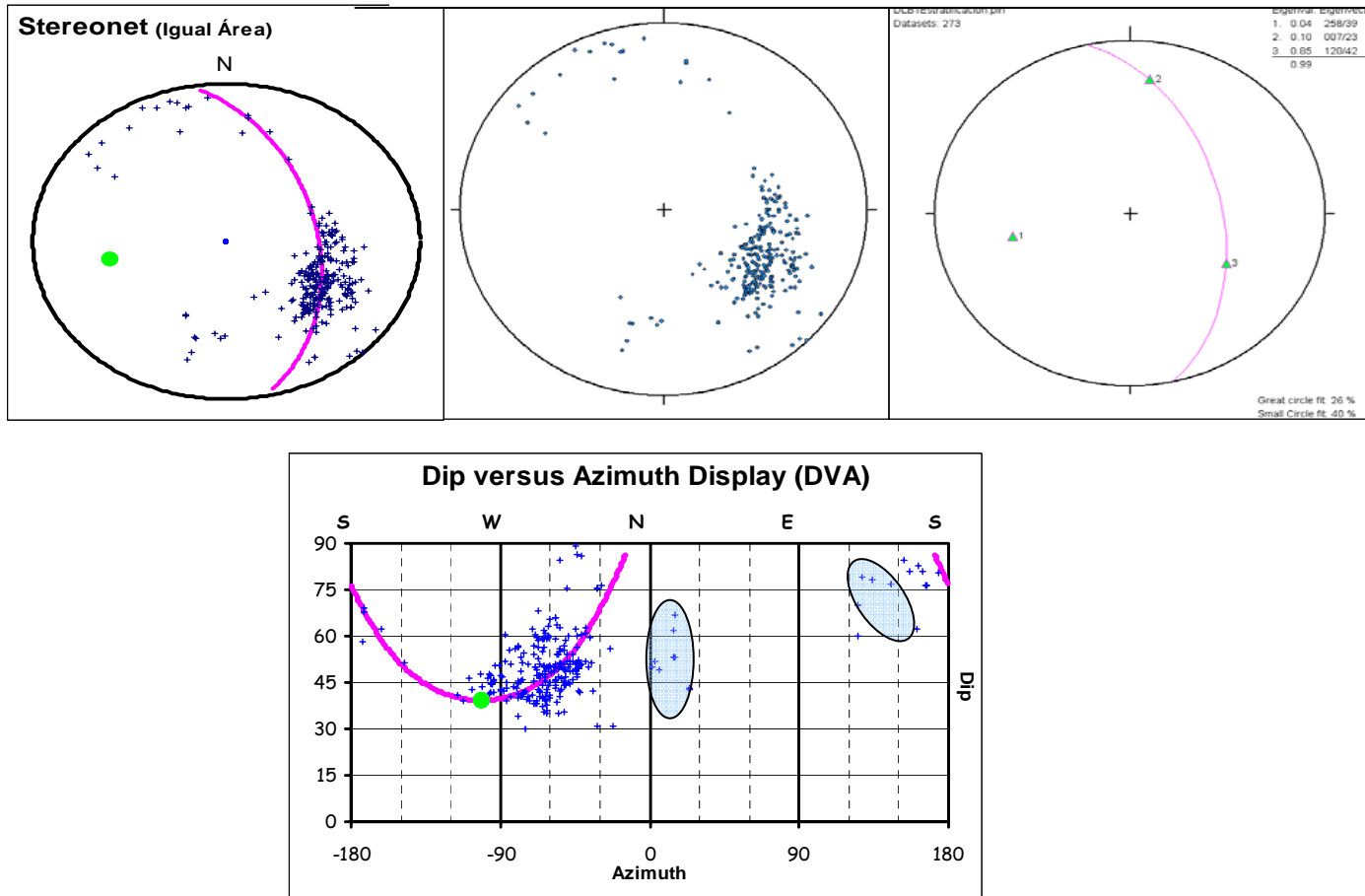


Figura 32. Pozo Dele 1. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis donde se indica el plano que mejor representa los datos y el polo del mismo. Este último corresponde al eje de la estructura. Centro arriba, diagrama de polos realizado con Tectonics FP. Derecha arriba, ejes de simetría de los datos calculado con Tectonics. El vector 1 corresponde al polo del plano descrito por los vectores 2 y 3. La dirección y buzamiento del plano corresponde al rumbo del cabeceo y la magnitud del mismo. Abajo, diagrama DVA donde se indica los datos anómalos los cuales pueden estar asociados a planos de laminación o facturas. El diagrama a demás indica que la estructura presenta un alto cabeceo.

tiene un rumbo de 259° y un buzamiento de 39° . Estos datos corresponden a la dirección y magnitud del cabeceo respectivamente (Figura 32).

Una representación en planta de la dirección y magnitud del cabeceo de la estructura se aprecia en la Figura 31. En ella se evidencia que la dirección de cabeceo coincide en gran medida con el tren regional de las estructuras, ya que el cabeceo está en sentido NE – SW como lo indica el diagrama.

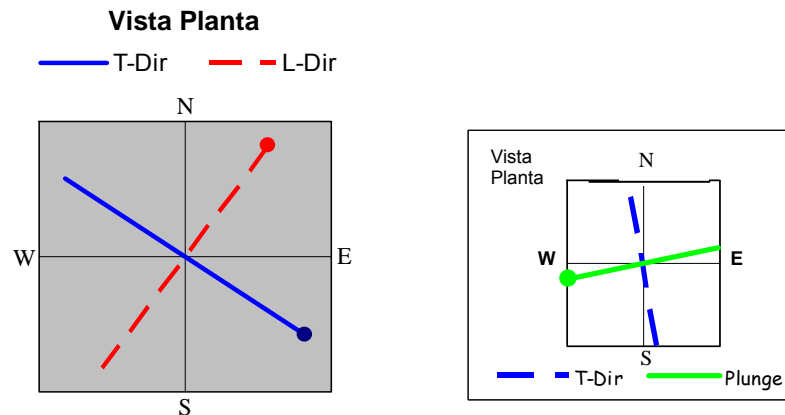


Figura 31. Izquierda, vista en planta de la dirección longitudinal y transversal asociada a los datos del pozo Dele 1, la cual coincide con la tendencia de las estructuras aflorantes en la zona. Derecha, vista en planta de la dirección de cabeceo y dirección transversal a la misma.

4.1.2 Pozo Volcanera 1.

Pozo ubicado en la parte más SE de la sección, donde la mayor parte de los datos registrados corresponden al Sinclinal de Nunchia. Adicionalmente el objetivo de este es la estructura más profunda en la sección.

De manera general la gran mayoría de datos medidos en este pozo a las profundidades de interés, es decir, donde se centran las estructuras objetivo del pozo son bastante homogéneos. Para la gráfica de azimuth medido, se tiene como rasgo importante un cambio de 180° , donde los datos pasan de 130° a 310° . Lo anterior es interpretado como el paso de un flanco a otro en una estructura o el paso por flancos opuestos en estructuras montadas. Esto último es lo que sucede con este pozo, ya que debido a la estructura de dúplex se facilita este fenómeno (Figura 33).

Pasando a los gráficos que relacionan buzamiento medido y componente del mismo, se tiene que para el buzamiento medido todos los datos son de 5° . Para el buzamiento transversal calculado, hasta una profundidad de -3800 m los datos tienen un valor de 5° (Figura 34). A -3800 m pasan a -5° , este paso indica que las

estructuras buzan en sentido contrario al presentado en las mediciones anteriores, pero con la misma magnitud. Lo anterior apoya la presencia de dos estructuras superpuestas en la trayectoria del pozo. Adicionalmente este cambio podría indicar la presencia de un plano axial en alguna de las estructuras involucradas.

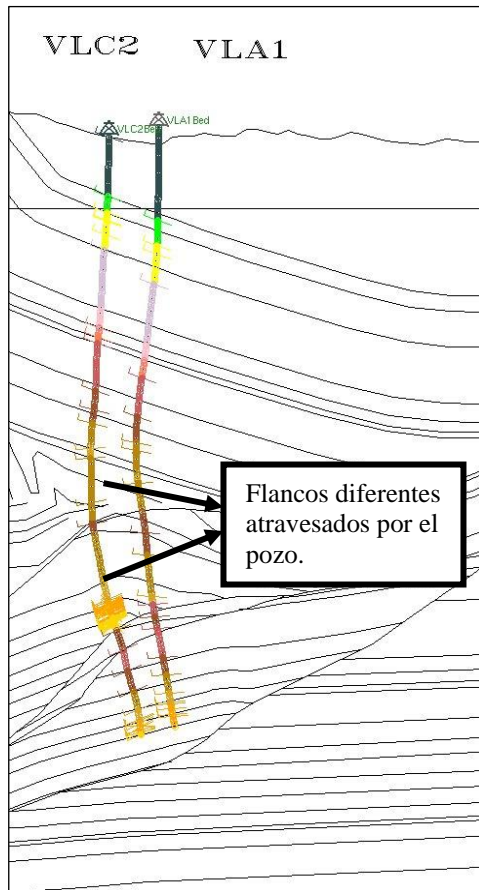


Figura 33. Trayectoria del pozo Volcanera 1 y Volcanera 2. A - 3800 m el pozo Volcanera 1 para del flanco trasero de una estructura anticlinal al flanco trasero de una estructura anticlinal subyacente.

Por último para el buzamiento longitudinal calculado, se tiene que todos los datos se alinean perfectamente en los ceros grados, lo cual indica que las estructuras involucradas no presentan cabeceo. Con este gráfico se puede determinar una dirección longitudinal de las estructuras de 35° y una transversal de 125° . Estos resultados coinciden con los arrojados para el pozo Dele 1. Una vista en planta de estas direcciones se puede apreciar en la Figura 35.

Para la gráfica DVA de los datos trabajados, se tiene que se evidencia la presencia de dos flancos con un mismo buzamiento. Adicionalmente se ve la orientación del eje del plano y el hecho de que éste no presenta cabeceo. El diagrama de polos muestra también una magnitud de cabeceo de cero (Figura 36).

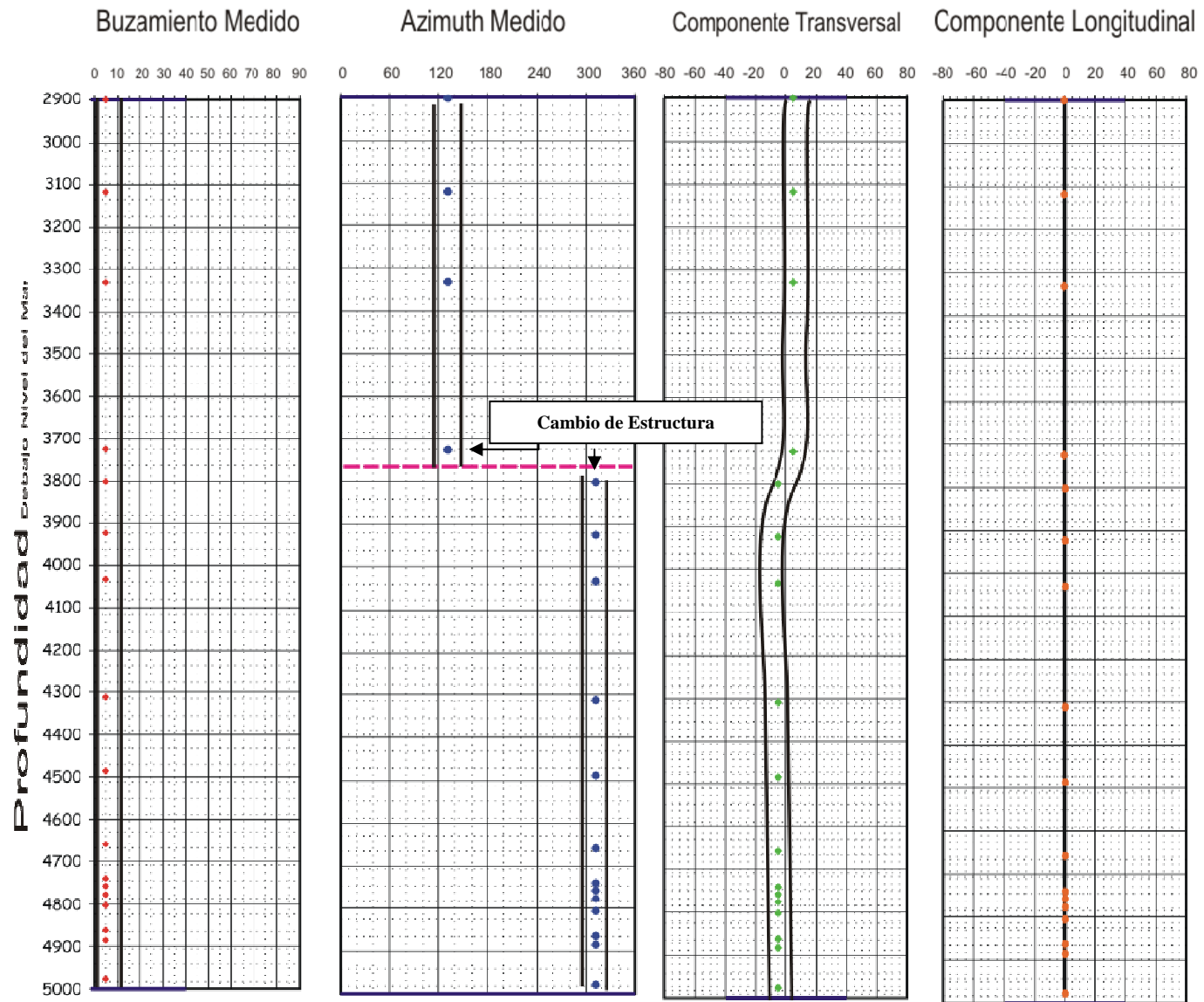


Figura 34. Diagramas producto del SCAT Analysis de los datos estructurales medidos correspondiente a la estructura del campo Volcanera, pozo Volcanera 1.

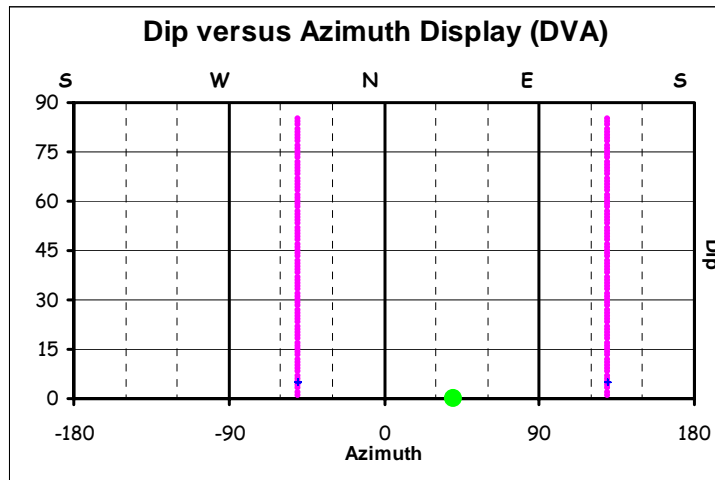
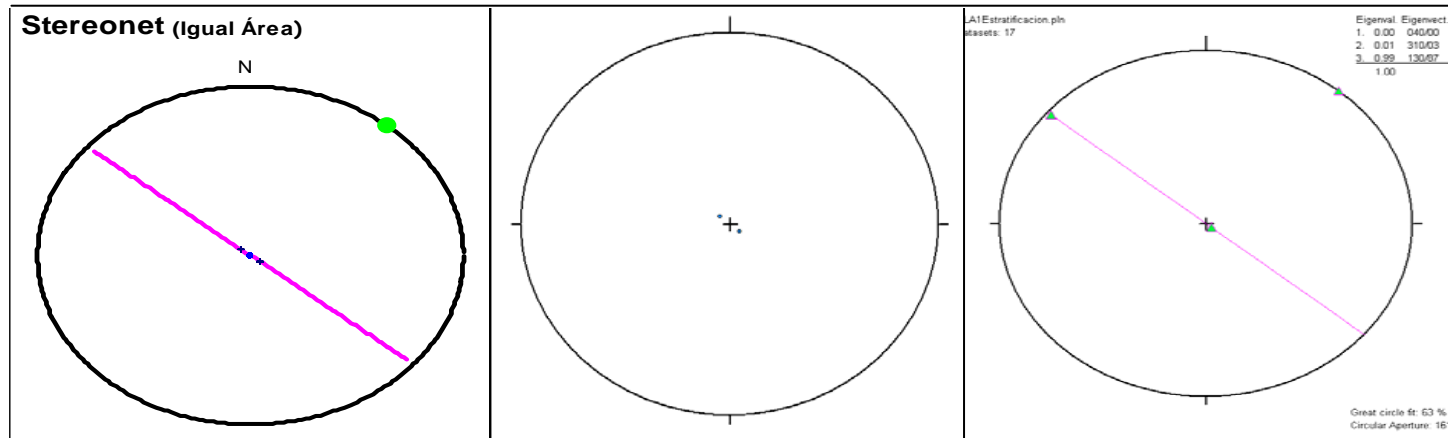
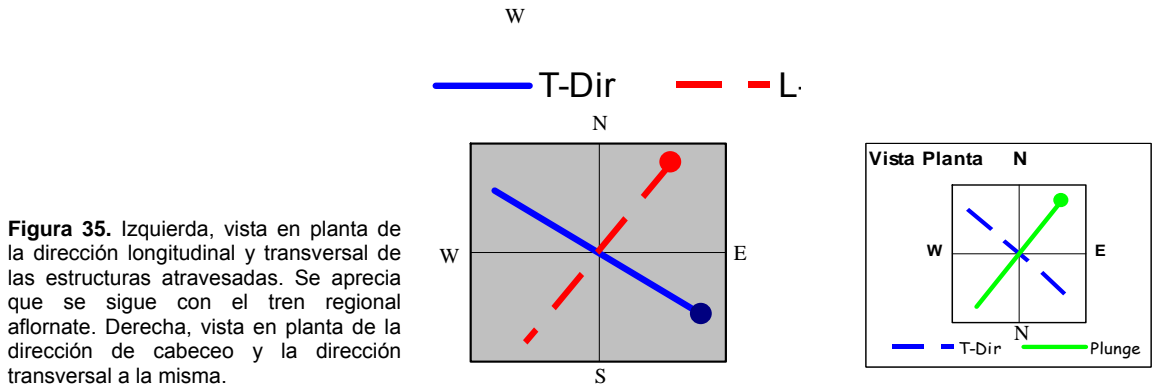


Figura 36. Pozo Volcanera 1. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del DVA con el plano que describen y el polo del mismo. Centro arriba, diagrama de polos de Tectonics. Debido a que todos los datos son de 5 grados o -5 grados se ven sólo dos datos en el diagrama. Derecha arriba, diagrama de vectores de simetría de los datos. El vector 1 hace referencia al eje de la estructura y el cabeceo del mismo. Abajo, diagrama de buzamiento medido versus azimuth de buzamiento. Los datos hacen referencia a dos flancos atravesados por el pozo. El punto verde es el eje de los mismos.



4.1.3 Pozo Volcanera 2.

Pozo ubicado entre los dos pozos anteriores. Al igual que el pozo Volcanera 1, gran parte de su trayectoria involucra la estructura del Sinclinal de Nunchia. La estructura objetivo de este pozo es la ubicada estructuralmente encima del objetivo del pozo Volcanera 1.

La interpretación de las gráficas asociadas a este pozo arroja la identificación una falla y un plano axial, cuya ubicación se muestra en la Figura 37. El primero de esto ya estaba reconocida en trabajos anteriores. Para la identificación de estos elementos estructurales es necesario el análisis en conjunto de todas las gráficas del SCAT Analysis; pero sólo en la gráfica de Buzamiento medido versus Profundidad será señalado el elemento (Figura 37).

El gráfico de la componente longitudinal del buzamiento permite calcular una dirección longitudinal de la estructura de 45° y otra transversal de 135° (Figura 38). Al igual que en los pozos anteriores se obtiene un resultado esperado con pequeñas variaciones, en este caso de 10° en cada una de las direcciones.

Para el gráfico de Buzamiento medido versus Azimuth se tiene que los datos corresponderían a un flanco de una estructura cuyo eje está aproximadamente a 356° de azimuth. Adicionalmente se muestra que dicho eje presenta un cabeceo de 19° . La Figura 37 muestra una vista en planta de estas direcciones. Por último, es este diagrama se puede evidenciar que los diferentes datos medidos corresponden a un solo flanco, ya sea de una misma estructura o de flancos de estructuras superpuestas. Existen datos dispersos que pueden estar asociados a mediciones de planos de laminación o fracturas (Figura 39).

En resumen, se tiene que para los pozos Volcanera 1 y Volcanera 2 los diferentes rasgos estructurales reconocidos ya se encuentran reconocidos en la sección preexistente. Por otro lado, los rasgos identificados en el pozo Dele 1 en su gran mayoría no están contemplados en la sección oficial. La Figura 40

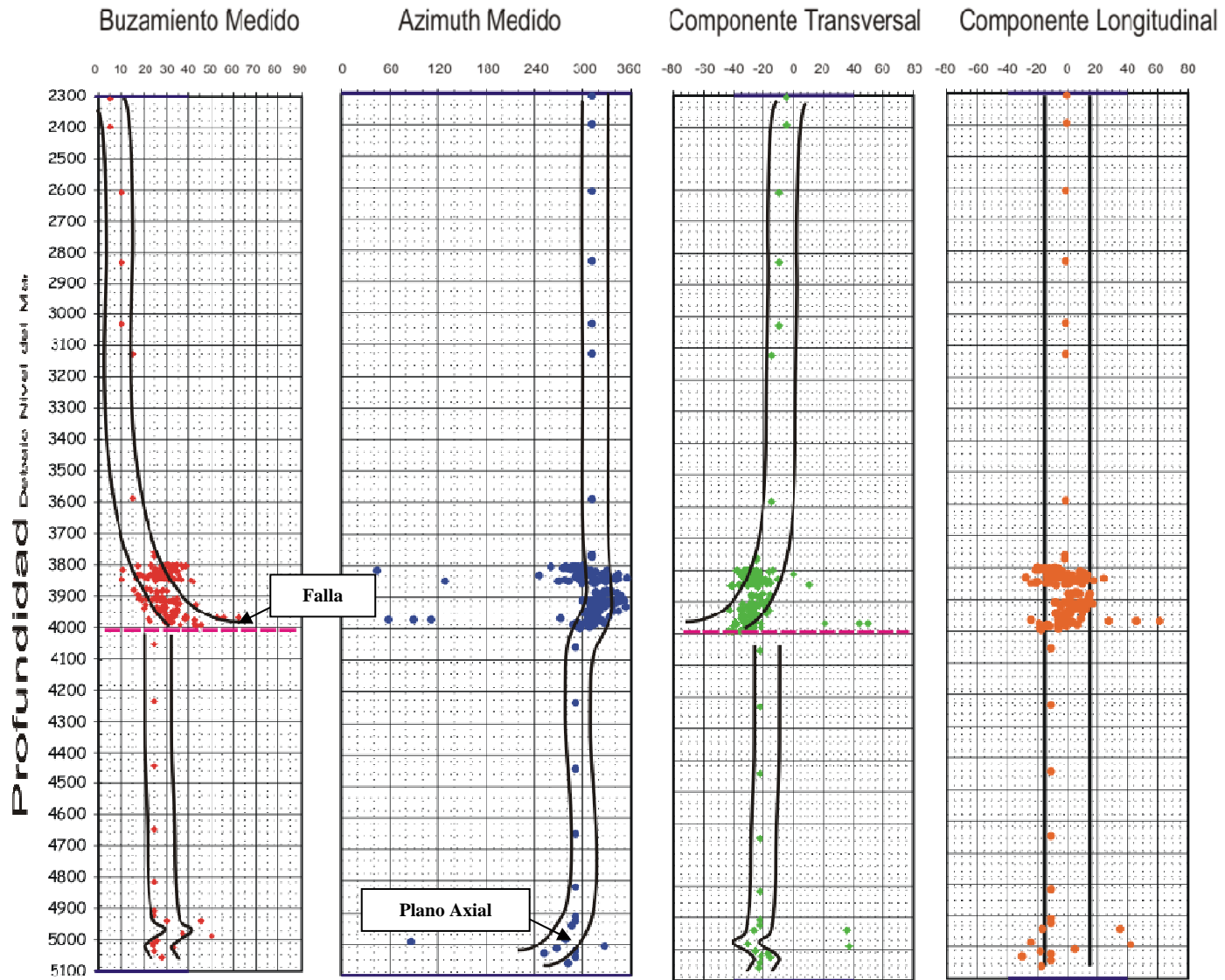


Figura 37. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos estructurales asociados a la estructura de Volcanera en el pozo Volcanera 2.

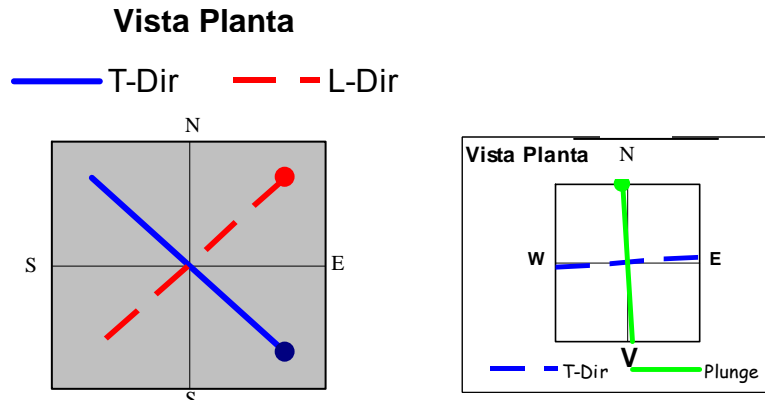


Figura 38. Izquierda, vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de las estructuras atravesadas. Derecha, dirección de cabeceo, ésta no muestra la dirección esperada.

muestra un resumen de los diferentes rasgos y la profundidad a la que se propone su ubicación.

Después de la identificación de los rasgos anteriores se revisa la sección sísmica asociada a estos pozos con el fin de analizar la interpretación existente con el fin de identificar qué rasgos se ajustan a la sección estructural y cual no. Lo anterior se traduce en la identificación de horizontes o fallas cuya interpretación no es en gran parte subjetiva y que es susceptible a cambios. Adicionalmente se busca que dichos cambios se puedan ajustar a lo poco que se ve en la sísmica.

La Figura 41 muestra la línea sísmica en cuestión y la interpretación que se tiene de la misma, la cual tiene como sustento los topes identificados en cada uno de los pozos. Dichos topes se encuentran asociados a las crestas y los flancos frontales de cada una de las estructuras. También se puede apreciar que los flancos traseros de las mismas estructuras no son resueltas satisfactoriamente por la sísmica lo que permitiría un comportamiento diferente de estos sectores al propuesto por la sísmica. Lo anterior permite que para dichos sectores nuevas geometrías sean propuestas, tales como las presentadas en este trabajo.

Para el caso de esta línea se tiene que la sísmica resuelve satisfactoriamente las estructuras de el sinclinal de Nunchia, el anticlinal de Monterralo y la estructura de El Morro en las parte más somera, es decir, los horizontes de Mirador, Los Cuervos y tal vez Barco. Por último, el **foreland** es fácilmente identificable, pero no así, el límite del mismo con las estructuras de interés. Por otra parte las estructuras más profundas, como son las de Dele y Volcanera, únicamente parte de sus crestas y flancos frontales son identificados.

Ya analizada la línea sísmica se realiza la sección estructural incluyendo los cambios propuestos tratando de ajustarse lo más posible a lo que se puede ver en la sísmica. En esta sección se presenta entonces un sistema tipo dúplex que se

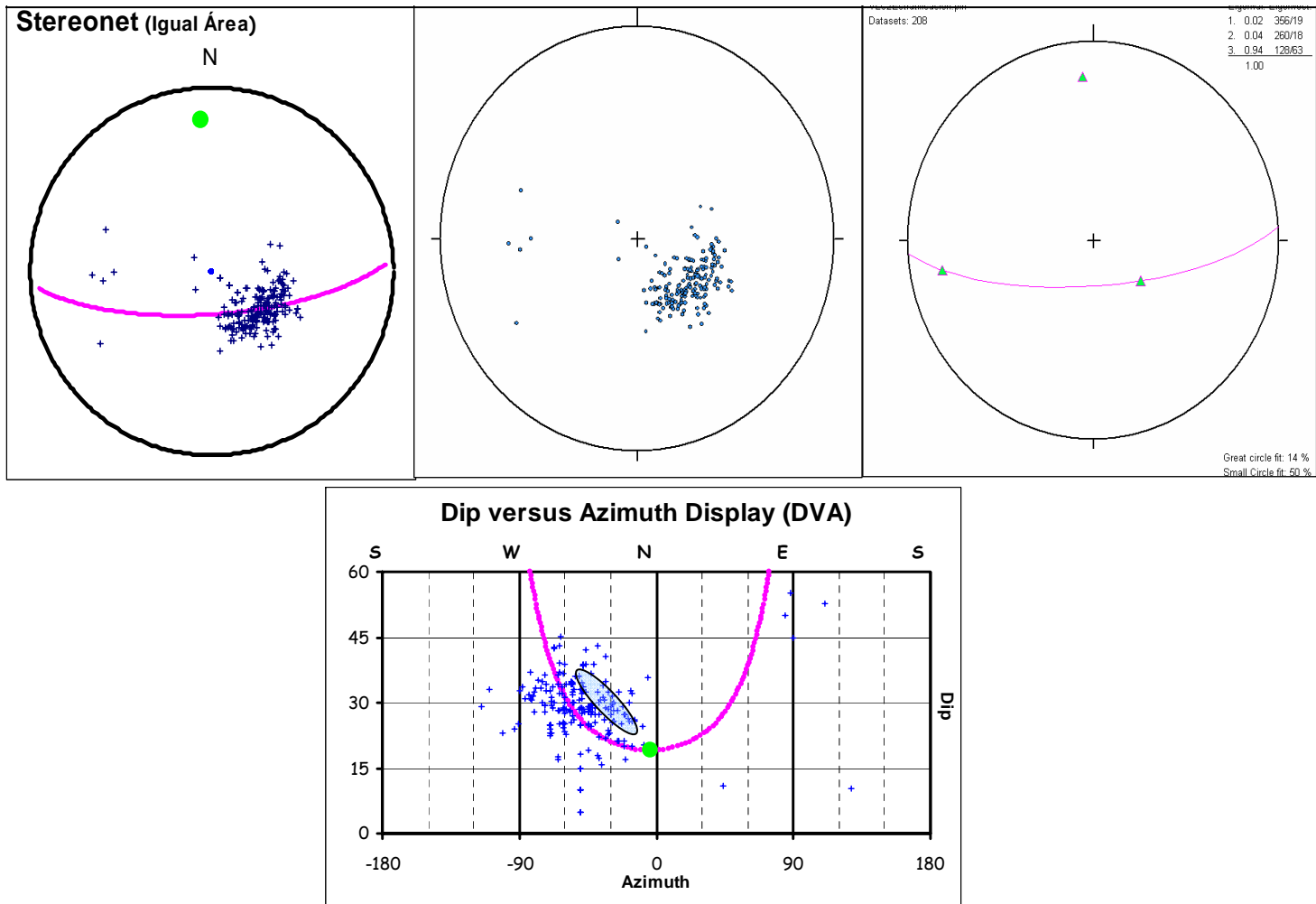


Figura 39. Pozo Volcanera 2. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis con el plano que mejor representa los datos y el polo del mismo que representa el eje de la estructura. Centro arriba, diagrama de polos producido por Tectonics. Derecha arriba, vectores de simetría de los datos graficados. El vector 1 corresponde al eje de la estructura involucrada. Abajo, Buzamiento medido versus azimuth del buzamiento. Los datos medidos se ajustan a un solo flanco de las estructuras involucradas.

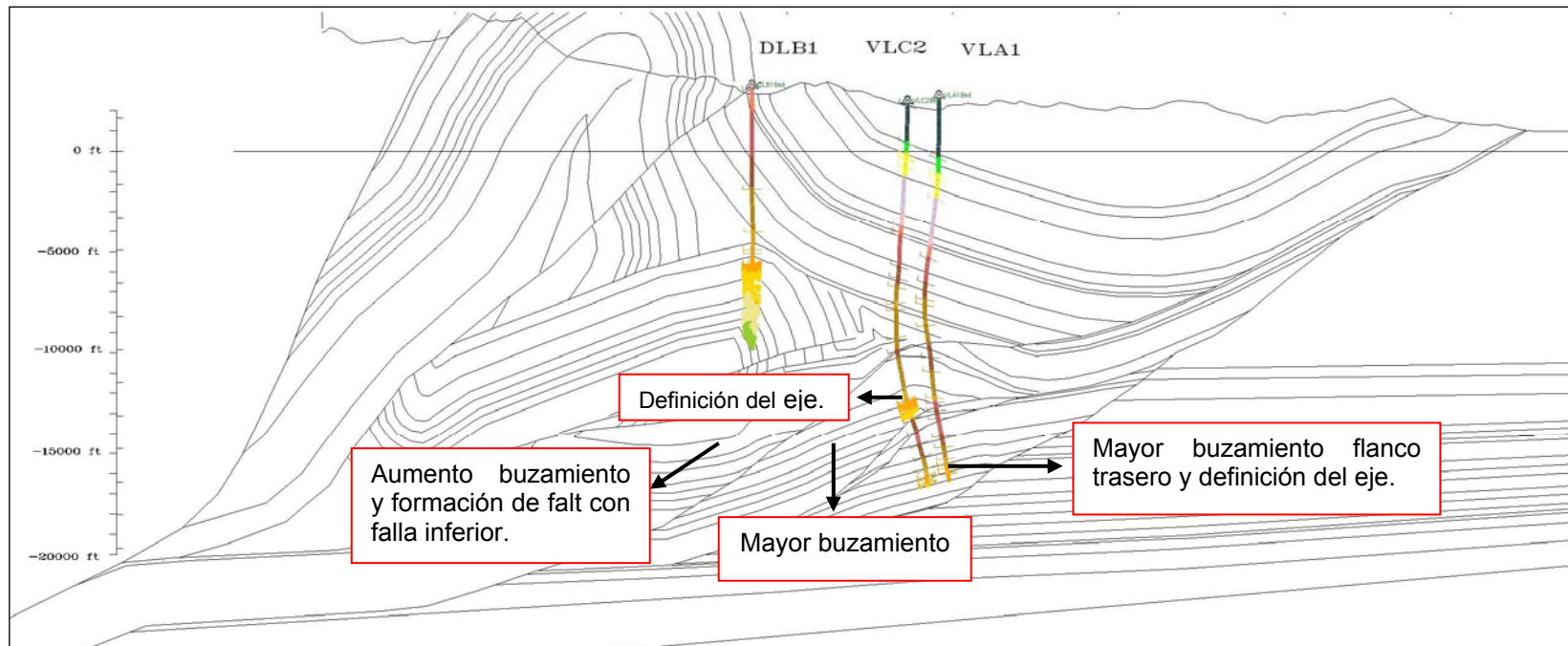


Figura 40. Resumen de los diferentes rasgos identificados con el SCAT Analysis para este pozo y la ubicación de los mismo con respecto a la sección anterior.

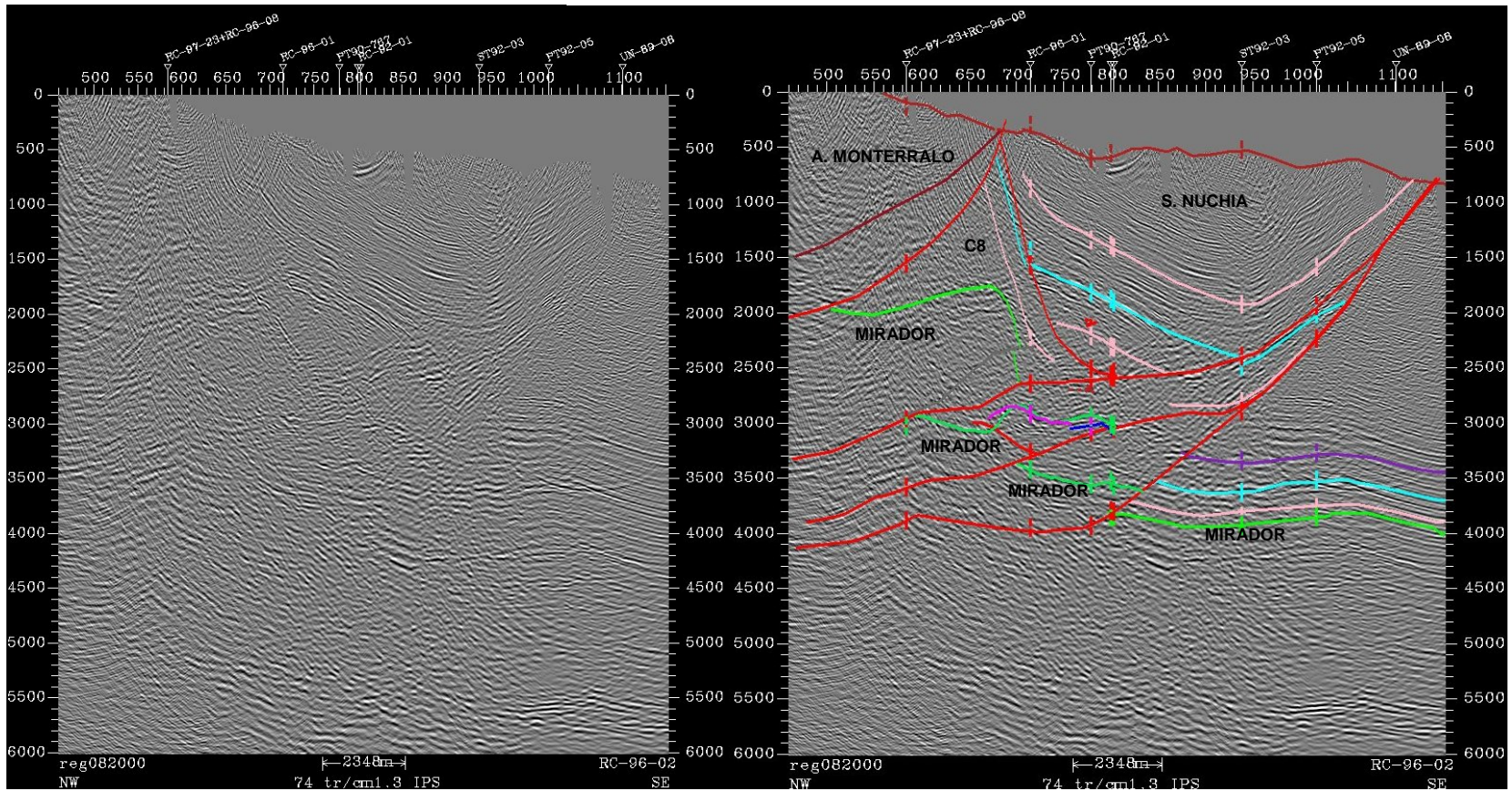


Figura 41. Sección sísmica asociada a los pozos de Dele 1 y Volcanera 1 y 2. Izquierda, sección sin interpretar, en la cual fácilmente se identifican las estructuras más someras y el *foreland*. Derecha, sección interpretada. Las estructuras más profundas son difícilmente interpretadas, especialmente el flanco trasero de las mismas.

encuentra enmarcado en un sistema triangular de fallas. Dichas fallas presentan una terminación en superficie y adicionalmente marcan el cambio entre elementos estructurales diferentes. La primera falla del sistema es la que pone en contacto el **foreland** con la zona deformada de la sección. La segunda falla marca la separación entre las estructuras de tipo anticlinal del sistema dúplex con el sinclinal de Nunchia. La última falla es la que facilita la expresión en superficie del anticlinal de Monterralo. Esta configuración triangular de las fallas y la relación de las mismas con los diferentes estilos estructurales de la sección se repite a lo largo de toda la Licencia trabajada.

Analizando las estructuras atravesadas por los pozos, se toma primero la más somera, es decir, el anticlinal de El Morro. Dicha estructura en esta sección es un pliegue asimétrico cuyo flanco frontal es casi vertical y que adicionalmente ha sufrido un fallamiento sucesivo. Lo anterior genera un sistema imbricado en dicho flanco (Figura 42). En algunos casos el salto generado por las fallas del imbricado puede sobrepasar 1 Km. de distancia.

En segundo lugar aparece la estructura de Dele, la cual es un anticlinal también asimétrico pero un poco más abierto que El Morro. Su flanco trasero es bastante buzante debido a las fallas subyacentes y en adición se encuentra formando un flat con la falla que da origen a dicho anticlinal. Se plantea que esta estructura es lateralmente continua con la asociada al pozo Pauto Sur 2. La estructura asociada al pozo Dele 1 sería estaría entonces ubicada estructuralmente más profundo que lo presentado al norte y también mostraría que hacia el sur dicha estructura presenta un tamaño menor.

La estructura objetivo del pozo Volcanera 2 posee una geometría antiformal – sinforme – antiformal, donde la estructura más somera es la perforada por el pozo. En esta estructura los flancos traseros presentan una inclinación menor a los de la suprayacente y se tiene que forman *flats* con la falla que genera la estructura (Figura 42). Por último esta estructura se encuentra limitada por la falla dos fallas inversas del sistema dúplex que limitan la extensión de las unidades involucradas. Lateralmente se tiene que esta estructura es continua con la asociada al pozo Pauto Sur 2. Para esta estructura como en la anterior, se tiene que está estructuralmente más baja y que presenta un menor tamaño. Por último se resalta que la interpretación de la Formación Mirador, lo anterior implicaría un cambio sustancial en el mapa estructural de la zona.

Por último se tiene una última escama analizada es perforada tanto por el pozo Volcanera 1 como el Volcanera 2. Esta estructura es un anticlinal bastante abierto cuyo flanco frontal es casi horizontal y el flanco trasero forma un flan con la falla que origina el pliegue. Al igual que en el caso anterior, la estructura se encuentra limitada por dos fallas de tipo inverso del sistema dúplex. Esta estructura representa el primer estadio en la formación de un sistema imbricado en las

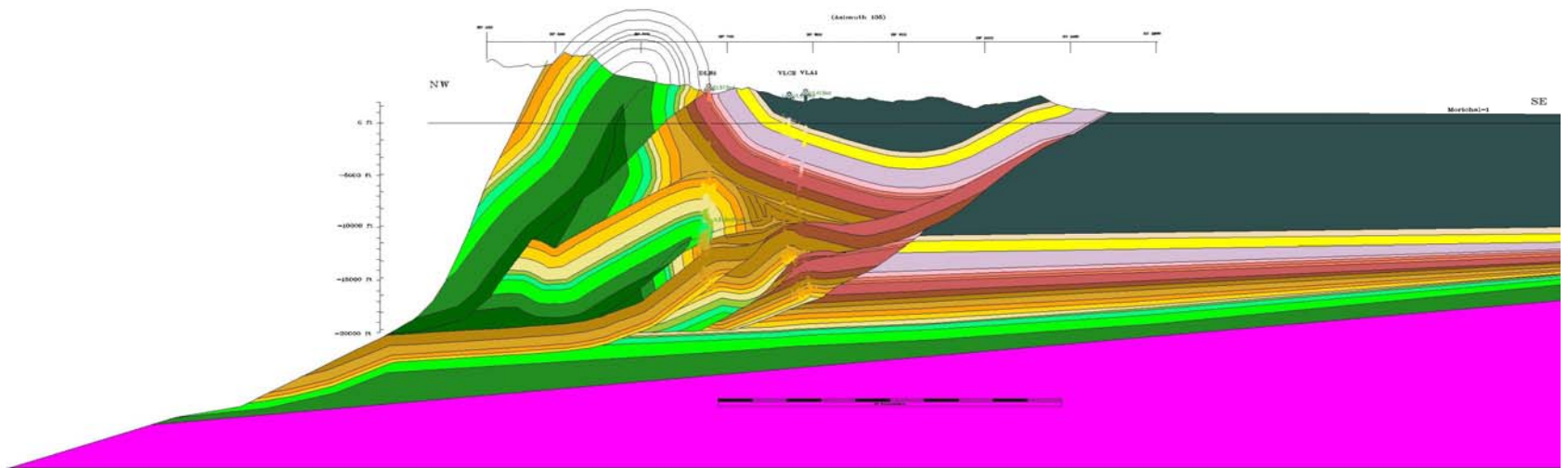


Figura 42. Sección estructural asociada a los pozos Dele 1, Volcanera 1 y Volcanera 2. Se evidencian las tres fallas que enmarcan el sistema dúplex que involucra las estructuras anticlinales y la geometría de las mismas. Adicionalmente se muestra la trayectoria de cada uno de los pozos y su relación con cada una de las estructuras.

secciones siguientes ubicadas más hacia el norte de la Licencia. En esta zona el sistema imbricado va disminuyendo de tamaño para darle cabida a estructura suprayacentes más grandes.

4.2 SECCION PT-92-01 – POZOS PAUTO SUR 1, PAUTO SUR 2 Y PAUTO SUR 3. CAMPO PAUTO

4.2.1 Pozo Pauto Sur 1

Analizando los gráficos derivados del SCAT Analysis realizado a este pozo se identificaron los rasgos que a continuación se mencionarán. Cambios de flanco en la trayectoria del pozo, ya sea sobre la misma estructura o de una estructura subyacente; fallas intraformacionales; fallas que provocan el cabalgamiento de estructuras; datos anómalos registrados y disposiciones diferentes de horizontes.

Los cambios en los datos de azimuth de buzamiento están asociados a fallamiento y por ende la trayectoria del pozo estaría atravesando dos estructuras diferentes, más aún, pasaría por flancos opuestos de estructuras superpuestas, es decir, estaría pasando por el flanco frontal de la estructura mas somera y luego por el flanco trasero de la subyacente o viceversa.

Para las fallas identificadas, se tiene que según los regímenes de mayor deformación mostrados por la literatura para esta zona las fallas serían de tipo inverso, ya que la tectónica regional es de tipo compresivo. La dirección de la vergencia de los datos en la gráfica buzamiento aparente transversal para fallas inversas indica la dirección contraria en la que buza la falla. Adicionalmente estas fallas están relacionadas con el tope de la formación BARCO. El cambio formacional posibilitaría entonces la presencia de una falla, ya que se daría una zona de despegue propicia para la misma.

Los datos anómalos identificados hacen referencia a planos de fracturas y laminación presente en las formaciones atravesadas. Asociados al segmento C7 de la estructura de FLOREÑA; y con el tope del MIRADOR, formación arenosa en la estructura de PAUTO. La Figura 43 muestra un resumen de las estructuras identificadas y el comportamiento que tienen asociado en las gráficas del SCAT Analysis.

A -4343 m en adelante se presenta una cierta homogeneidad en los buzamientos medidos versus profundidad, es decir, alrededor de 5°, lo que indica una medida bastante baja para esta profundidad comparado con el propuesto en la sección oficial que se tiene (Figura 44). Es por eso que se propone entonces la modificación de este segmento con el fin de hacerlo concordante con los datos

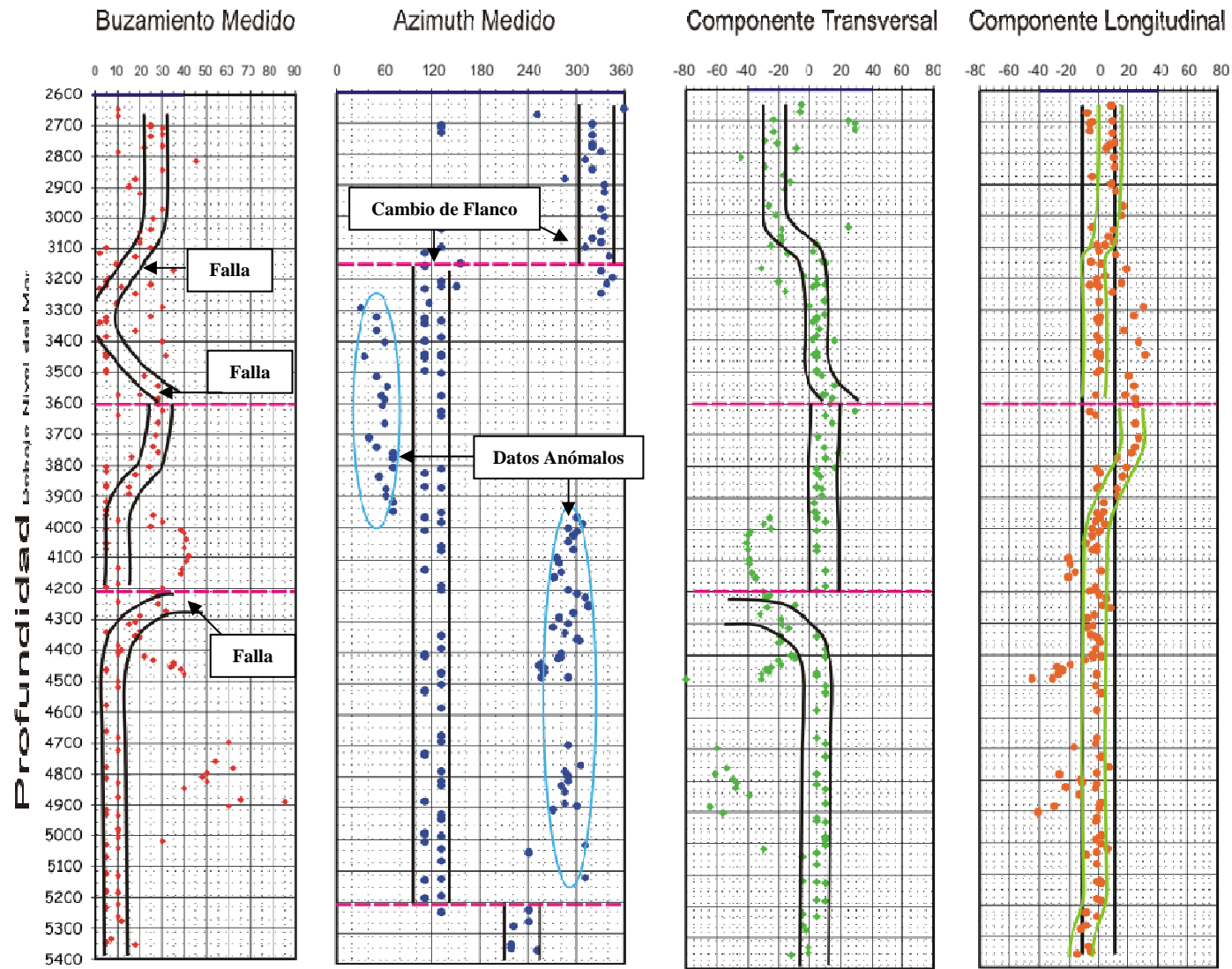


Figura 43. Diagramas producto del SCAT Analysis de los datos asociados a la estructura del campo Pauto, pozo Pauto Sur 1. Los círculos hacen referencia a los datos anómalos medidos en este pozo, los cuales están relacionados con planos de fracturas o laminación.

aquí propuestos, es decir, pasar de unos estratos de alto buzamientos a otros de expresión más suave.

Para el Buzamiento aparente longitudinal existe un paso de los datos que va de 12° a 0° a una profundidad de -3092 m, seguido por una cierta estabilización de los datos alrededor del 0° . Al final del pozo a -5233 m hay un segundo paso del tren de datos que va de 0° a los -12° . Teniendo en cuenta el comportamiento anterior, según Bengtson (1980) esto indicaría una estructura de doble cabeceo. Pero analizando los gráficos asociados, así como el gráfico DVA (Dip Versus Azimuth Display) para este pozo este comportamiento no es claro, en lugar de eso parece una estructura con un único cabeceo (Figura 46).

Este último gráfico arroja una dirección longitudinal de la estructura de 30° y una transversal de 120° con un cabeceo de 11° (Figura 45). Se resalta la coincidencia de estos resultados con la orientación de las estructuras aflorantes de la zona de estudio, dentro de las cuales está el Sinclinal de Nunchira, el Anticlinal de Monterralo y la Falla del Borde Llanero.

A pesar de esto, se puede presentar el caso en el cual la dirección transversal y longitudinal puede diferir de las direcciones transversales y longitudinales regionales, es decir, son direcciones locales para las estructuras representadas en los datos. Lo anterior puede ser la explicación para que las direcciones longitudinales y transversales predichas por los diferentes diagramas usados no sean exactamente los mismos, la dirección longitudinal para la estructura y para el cabeceo no es la misma. Son similares.

Por último revisando el diagrama de polos y el DVA (Dip Versus Azimuth Display), los cuales fueron usados para determinar el tipo de estructura principal y la dirección y magnitud del cabeceo, si existe. Para el análisis de estos gráficos fue necesario el uso de dos técnicas diferentes: el SCAT Analysis y el demo del software Tectonics.

Como era de esperarse las tendencias por ambos medios es la misma, con la diferencia de que con Tectonics se puede apreciar mejor el comportamiento de los datos, así como el cálculo de la dirección de cabeceo y el ángulo del mismo es hecho por el software. Esto es hecho por medio de los eigenvectors que son una solución estadística donde la posición de cada vector representa la solución de inercia del sistema, es decir, los ejes de simetría de la dispersión de los polos, lo cual es equivalente a un diagrama de cabeceo⁵.

⁵ Jairo Alonso Osorio, Ingeominas Bogotá. Comunicación oral. 2006.

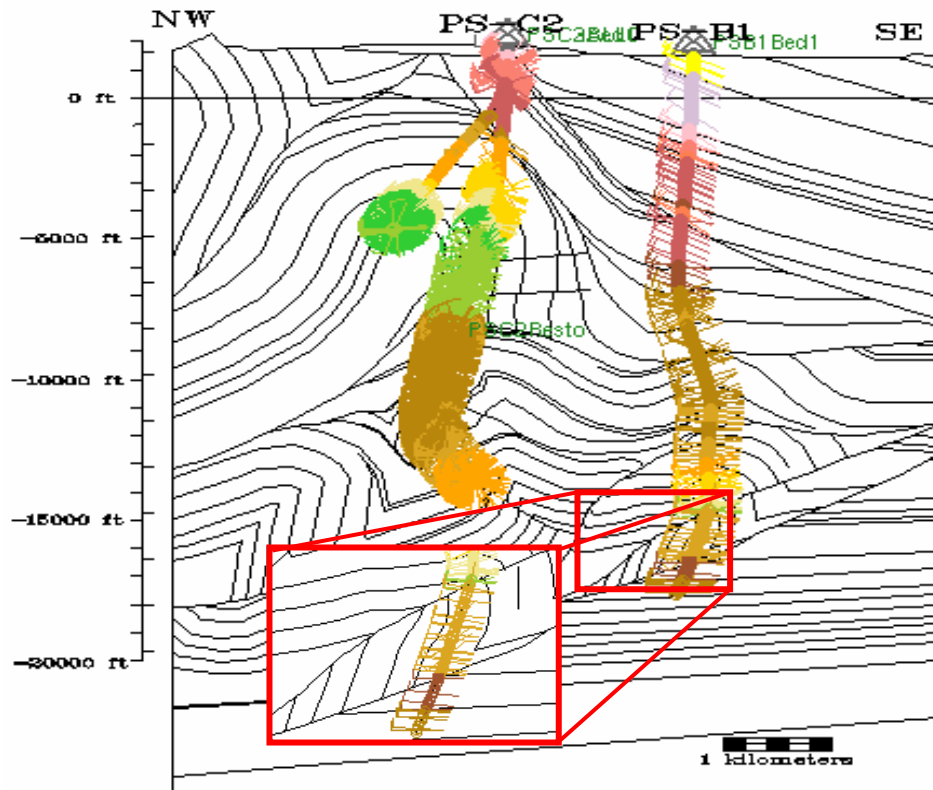


Figura 44. Interpretación oficial de la sección analizada con la proyección de los pozos ya corregidos en este trabajo. En el recuadro ampliado se puede apreciar que los datos estructurales medidos para esta zona no concuerdan con la geometría propuesta en esta sección. Es por eso que se plantea el cambio de la misma de tal forma que la disposición de los estratos honren los datos estructurales aquí mostrados.

La diferencia de estos resultados con los arrojados por el SCAT Analysis radica en la determinación del mejor plano que representa la dispersión de los datos y el polo asociado a este (el eje del pliegue y el cabeceo), son determinados a criterio del usuario. Debido a lo anterior los resultados arrojados por Tectonics fueron utilizados para calibrar la interpretación basada en el SCAT Analysis.

De manera general ambas técnicas aplicadas al diagrama de polos muestran que los datos presentan preferencialmente valores de buzamiento menores a 35° y que el plano que estadísticamente contiene mejor estos datos tiene una orientación de $107^\circ/88^\circ$. El polo del mismo que representa la dirección del cabeceo y el ángulo del mismo está en $17^\circ/02^\circ$, estos últimos basados en el Tectonics; con el SCAT Analysis la orientación y magnitud del cabeceo es de $15^\circ/4^\circ$. Una vista en planta de esto es la presentada en la Figura 45.

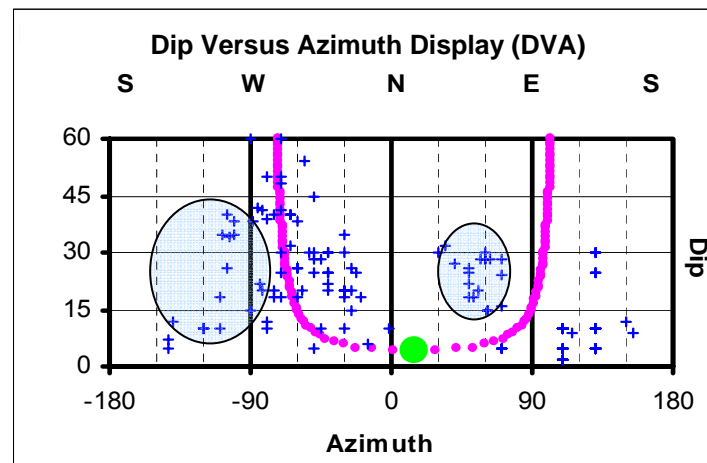
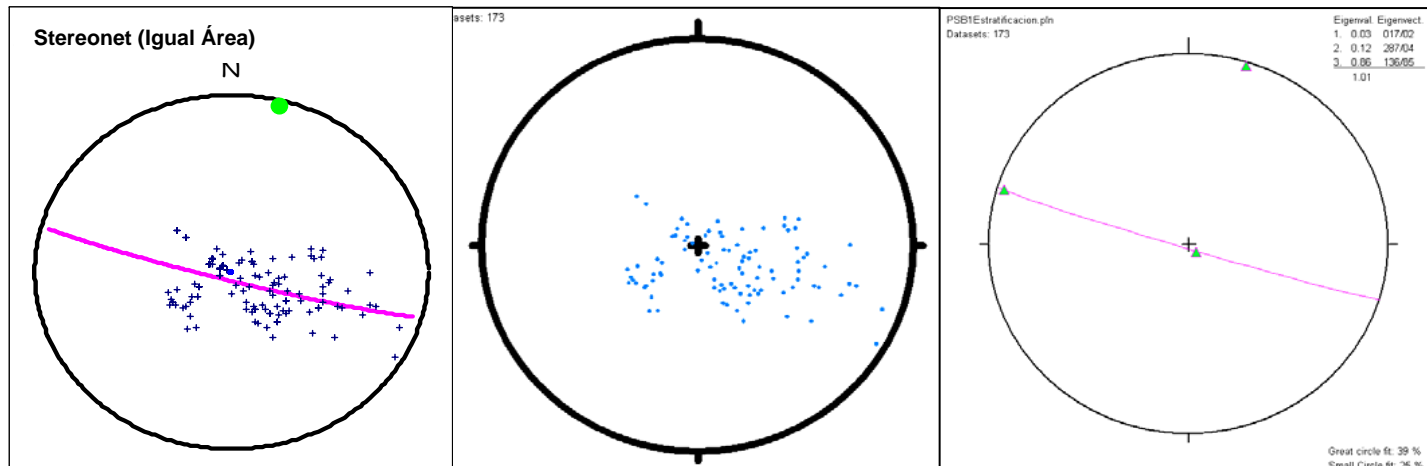


Figura 46. Pozo Pauto Sur 1. Izquierda arriba. Diagrama de polos producido con el SCAT Analysis que contiene la orientación del plano que mejor representa los datos graficados, así como el polo del mismo que muestra la dirección y magnitud del cabeceo. Centro arriba. Diagrama de polos producido por Tectonics. Derecha arriba. Orientación de los vectores de simetría, los vectores 2 y 3 conforman el plano que mejor reproduce los datos y el vector 1 es el polo del mismo. Abajo. DVA (Dip Versus Azimuth Display) producido por el SCAT Analysis, indicando el eje de la estructura y los flancos de la misma. Los círculos muestran los datos dispersos que se creen corresponden a mediciones en planos de laminación o fracturas.

Se cree que estos datos son producto de las fallas antes descritas y de mediciones en planos diferentes a la estratificación como la laminación o fracturas (Figura 46).

4.2.2 Pozo Pauto Sur 2.

Pozo ubicado mas hacia el sector NW de la sección y adicionalmente es el pozo con mayor número de datos medidos. Éste pozo comparte en superficie el path con el pozo PSC3.

Inicialmente para este pozo cabe resaltar la alta dispersión de los datos utilizados, adicionalmente la densidad de los mismo es bastante alta, lo que hace que los gráficos producto del SCAT Analysis no sean muy coherentes y difíciles de interpretar. A pesar de esto, se identifican algunos patrones que indican la presencia de algunos rasgos: un eje de una estructura, fallas y datos anómalos. Estos últimos coincidentes con la aparición de la formación Mirador que debido a sus características arenosas produce lecturas erradas. La Figura 47 muestra un resumen de las estructuras identificadas y su relación con las gráficas del SCAT Analysis.

Una de las fallas identificadas en trabajos anteriores había sido caracterizada como una falla de *backthrust* (-3173 m). Revisando el SCAT se ve que la curva formada por los datos es hacia la derecha y como son regímenes compresivos lo mas seguro es que sea una falla inversa, por tanto, el buzamiento de la falla sería hacia la izquierda y no hacia la derecha, lo que haría que esta falla no fuera un *backthrust* como está propuesto sino una falla inversa que sigue el tren que trae el sistema.

Para en el diagrama de buzamiento aparente longitudinal versus profundidad, a esta profundidad los datos van aumentando de valor de 0° a 32° mostrando un movimiento de izquierda a derecha, lo que según la bibliografía indicaría un doble cabeceo de la estructura, lo cual no está aun determinada (Figura 47). Adicionalmente la dirección longitudinal de la estructura es de 20° y la transversal de 110° con un cabeceo de 22° (Figura 48).

Los diagramas de polo y los DVA muestran la dirección de cabeceo de la estructura y la magnitud del mismo, 25° y 1° respectivamente. La estructura atravesada por el pozo es un pliegue con cabeceo, aunque existe una gran dispersión de los datos al igual que en los gráficos anteriores (Figura 49).

Recordando que el vector 1 de los eigenectores calculados por Tectonics corresponde a la dirección y la magnitud del cabeceo siempre y cuando las mediciones son de planos de estratificación, entonces la dirección según este software sería de 208°/2°. Como se puede ver no existe una gran diferencia, pero se puede incurrir en un error ya que para este caso el software está arrojando en

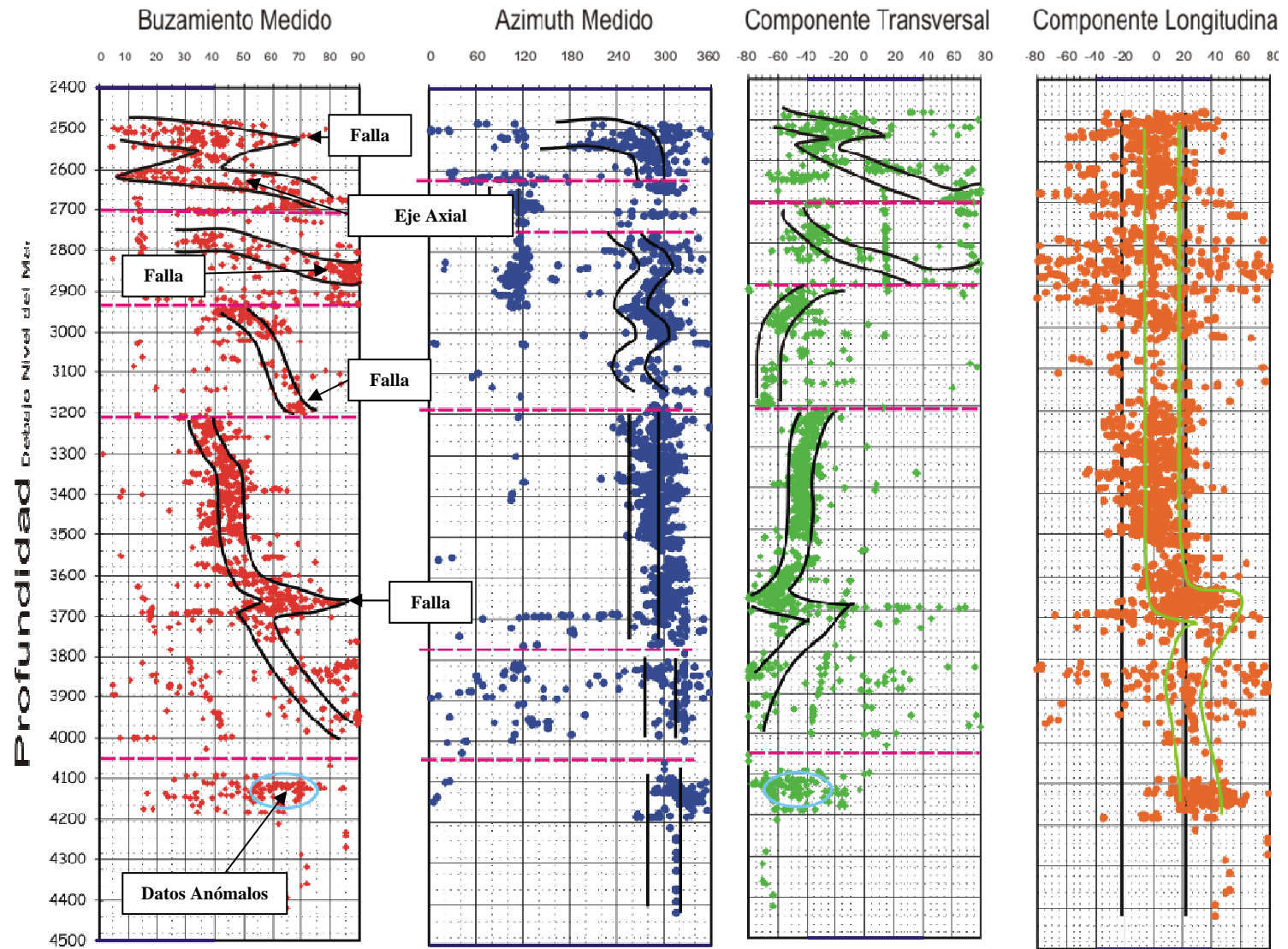


Figura 47. Diagramas del SCAT Analysis de los datos asociados a la estructura de Pauto en el pozo Pauto Sur 2. Se indica también los datos anómalos asociados a este pozo en el último segmento del mismo.

ángulo en el cuadrante equivocado, es decir, el rumbo correcto es de 28° , lo cual se ha podido corregir con la ayuda de los diagramas del SCAT Análisis.

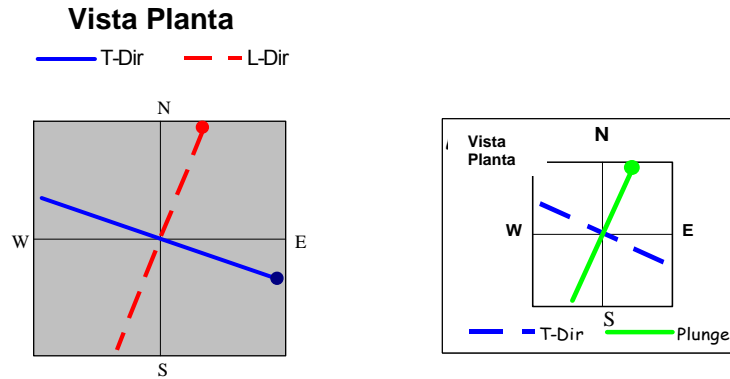


Figura 48. Izquierda. Dirección longitudinal y transversal de la estructura atravesada por la trayectoria del pozo Pauto Sur 2. Se resalta su similitud con la del pozo PSB1, pero esto es debido a que ambas estructuras obedecen a regímenes de esfuerzos regionales iguales que tienen la dirección de compresión en sentido SE. Derecha. Diagrama de dirección transversal y cabeceo de la estructura. En este caso la diferencia entre la dirección longitudinal y la de cabeceo es de 9° .

Por último, se reconoce que dentro de los datos usados existen dos poblaciones que representarían los flancos de una estructura, pero al revisar la sección existente, estos flancos corresponden a estructuras diferentes montadas una encima de otra (Figura 50).

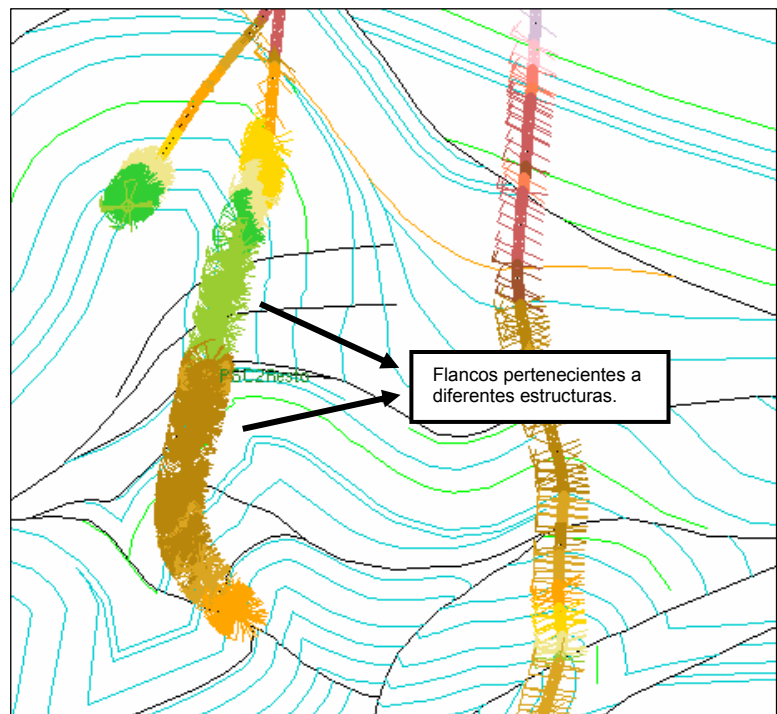


Figura 50. Trayectoria del pozo Pauto Sur 2 en la sección. Los datos tomados al pozo pertenecen a flancos contrarios de estructuras superpuestas.

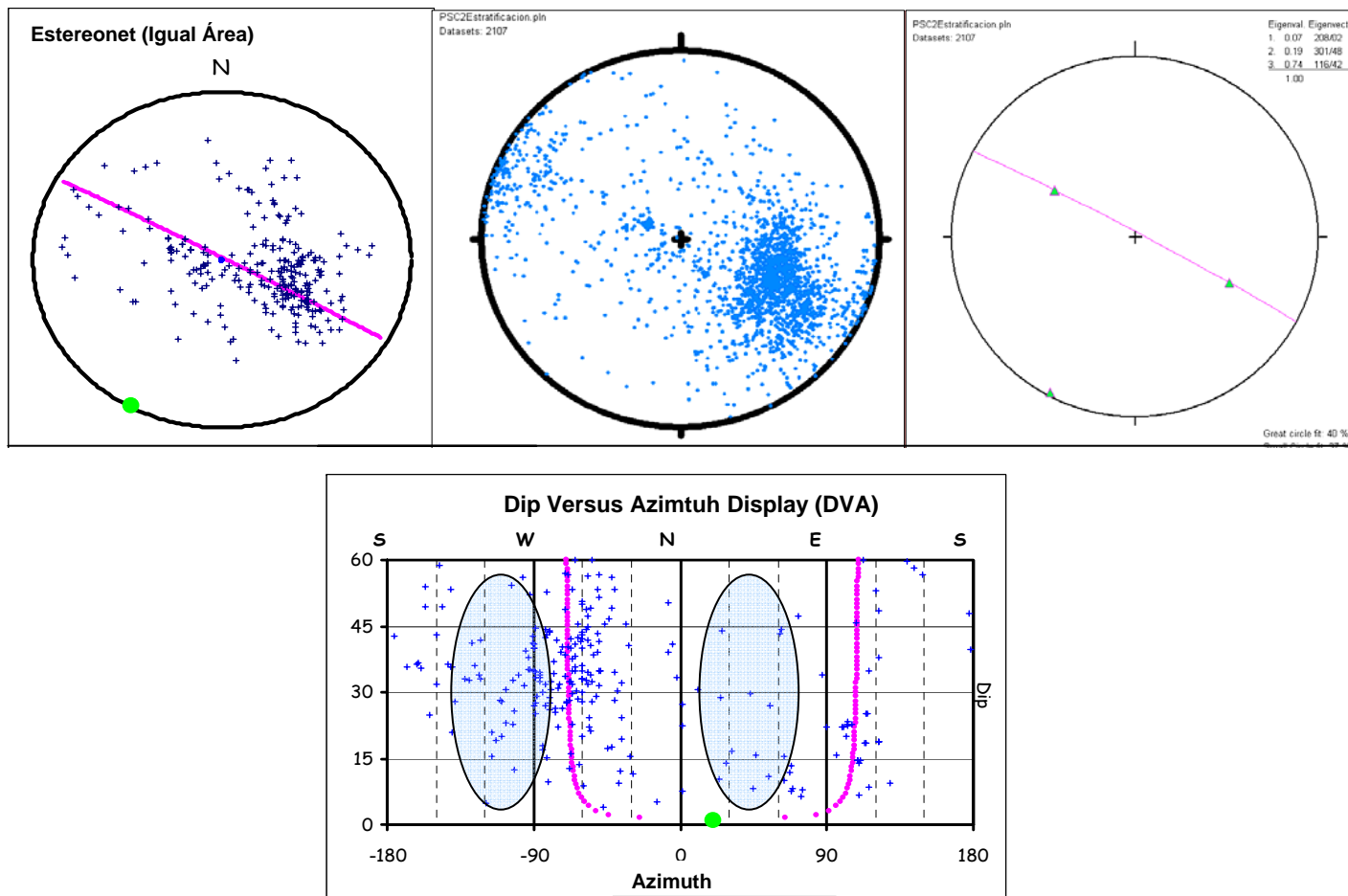


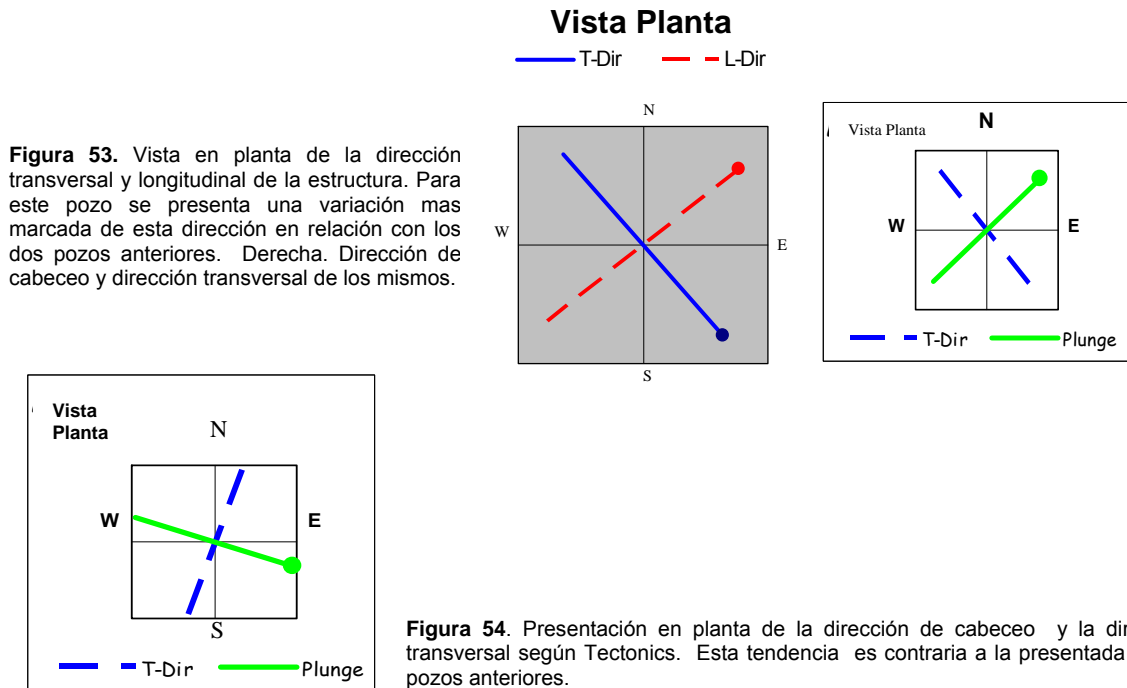
Figura 49. Pozo Pauto Sur 2. Izquierda arriba. Diagrama de polos producto del SCAT Analysis con el eje la estructura diagramado y la magnitud del cabeceo. Centro arriba. Diagrama de polos producido por Tectonics, se resalta la alta densidad de datos y la alta dispersión que se presenta en los mismo, a pesar de eso se puede definir el plano formado por los eigenectores 2 y 3, el cual tiene como polo el eigenvector 1. Existe una gran similitud con lo predicho con ayuda del SCAT. Abajo, DVA producto del SCAT con los flancos y el eje de la estructura.

4.2.3 Pozo Pauto Sur 3

Inicialmente se resalta el hecho de que la trayectoria de este pozo no atraviesa las estructuras de interés, las cuales son las de Pauto y Floreña, por el contrario únicamente registra la estructura mas somera que es la de El Morro, la cual como ya se mencionó no será modificada en este trabajo.

En los diferentes diagramas de buzamiento versus profundidad y azimuth no se reconoce ningún rasgo claro que indique la presencia de una falla o pliegue, por el contrario se presenta un muy alta dispersión de los datos. A una profundidad de -1204 m se dan dos tendencias para las gráficas. De estos datos los que mejor representan la estructura asociada a ellos son los que tienen buzamientos alrededor de 45° en adelante con un rumbo que va de 270° a 360° y otros de 90° a 180° . Los datos con valores diferentes en los diagramas de polos se ven mas claramente como un grupo aislado, es decir, anómalos (Figura 51).

La dirección longitudinal y transversal de la estructura es de 50° y 140° respectivamente (Figura 53). Se indica además un cabeceo de 15° , todo lo anterior basados en la gráfica de buzamiento aparente longitudinal versus profundidad. En el diagrama de DVA (Dip Versus Azimuth Display), la estructura que puede ser inferida con los datos aportados por este pozo es la de un pliegue con un cabeceo de 2° . La Figura 52 muestra los diagramas de polos de los datos como el gráfico de Buzamiento medido versus Azimuth de buzamiento.



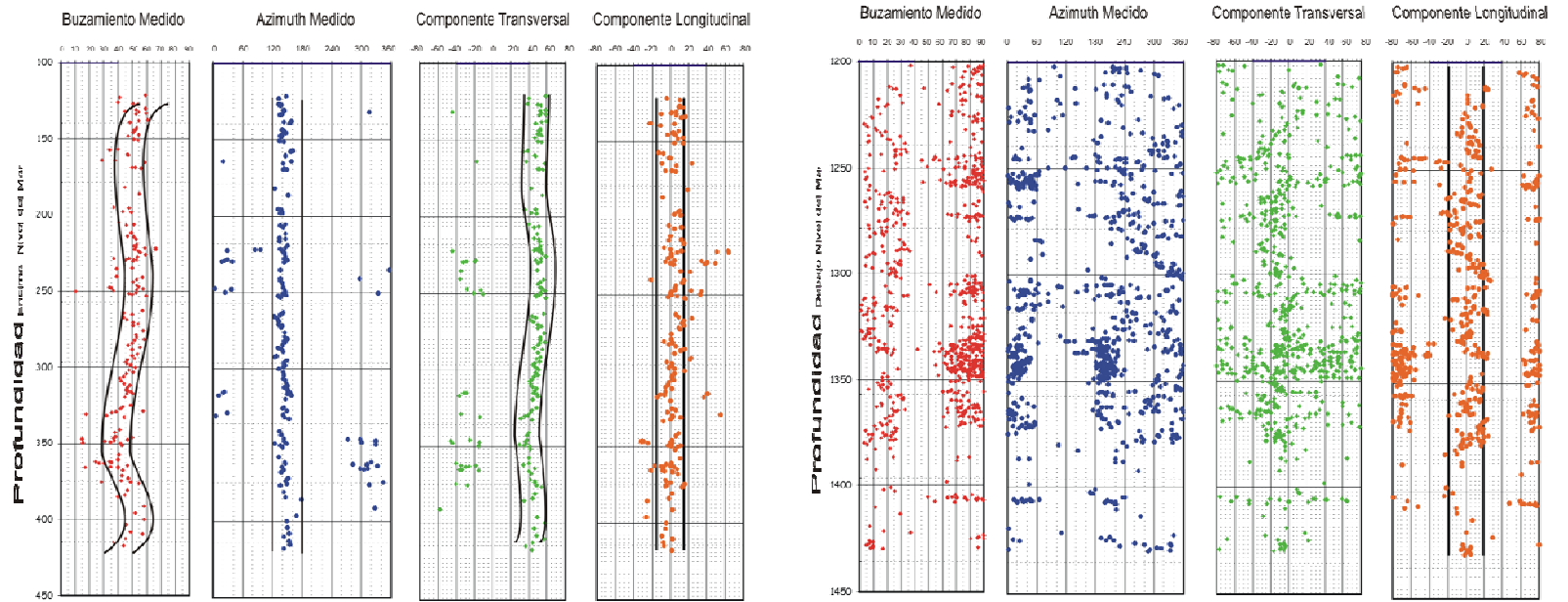


Figura 51. Diagramas del SCAT Analysis para los datos medidos en el pozo Pauto Sur 3. Estos datos corresponden a la estructura de El Morro.

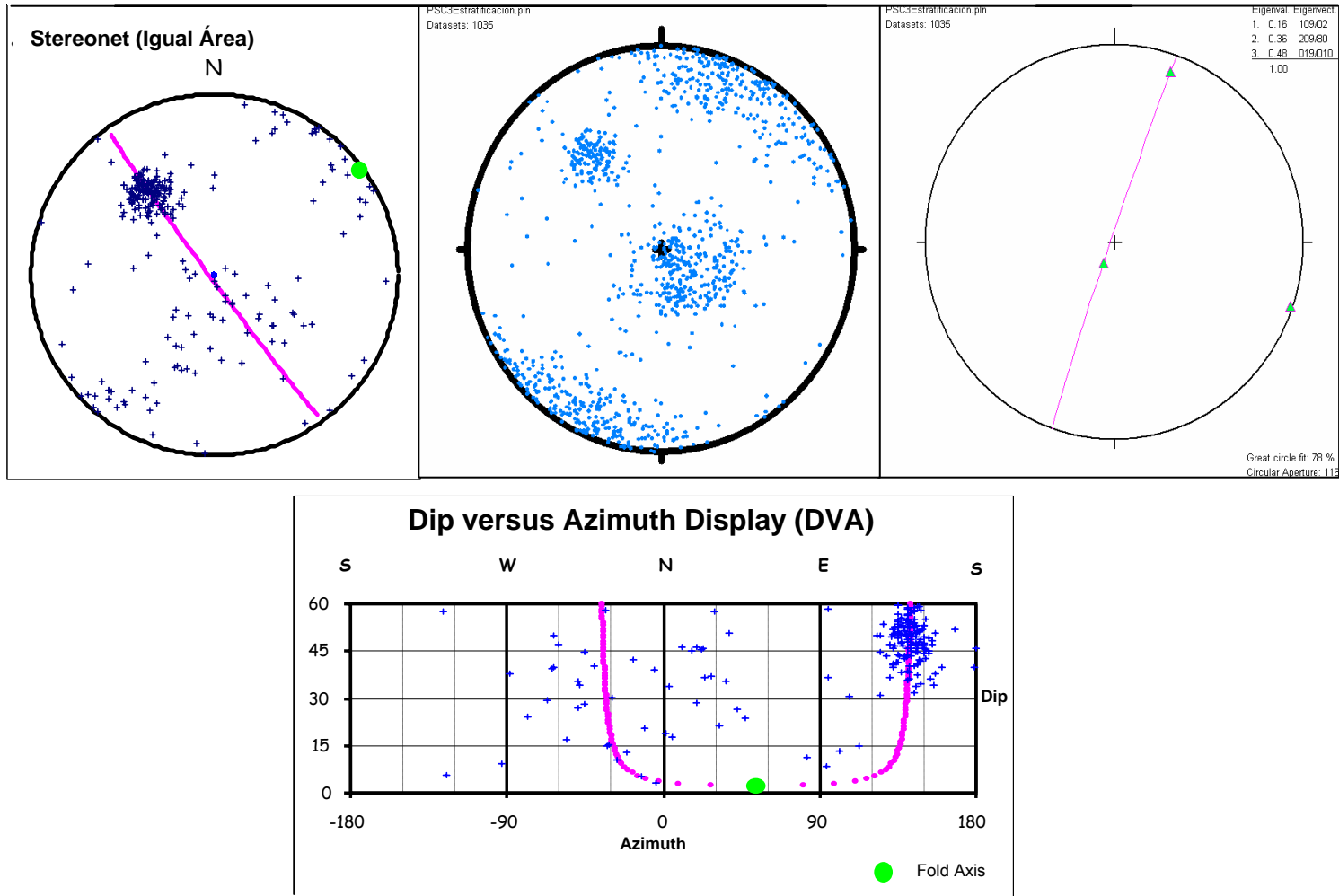


Figura 52. Pozo Pauto Sur 3. Izquierda arriba. Diagrama de polos producto del SCAT Analysis indicando dirección de cabeceo y la magnitud del mismo. Centro arriba. Diagrama de polos producto de Tectonics, alta densidad de datos anómalos que dan la sensación de un pliegue. Derecha arriba. Orientación calculada por Tectonics para el cabeceo de la estructura. Izquierda abajo. Representación de la estructura y ubicación del eje.

Evaluando los resultados de los diagramas de polos ya sea usando Tectonics o el SCAT Analysis, la diferencia entre ambas técnicas es apreciable, ya que fundamentalmente estas conducen a interpretaciones diferentes. Para el caso de Tectonics, la dirección de cabeceo y magnitud de cabeceo es de $109^{\circ}/02^{\circ}$ (Figura 54). Esta predicción propone entonces una dirección transversal de la estructura casi perpendicular a la tendencia que se viene trayendo en los otros pozos. Por el contrario, la dirección de cabeceo estimado con el SCAT Analysis es de $49^{\circ}/02^{\circ}$, lo que es más concordante con los resultados anteriormente encontrados. Por lo anterior esta última interpretación será la que se tendrá en cuenta.

Como resumen, en la Figura 55 se presenta la ubicación y los tipos de estructuras identificadas con ayuda del SCAT Analysis y Tectonics. Algunas de estas estructuras ya existían en la sección previa que asocia estos pozos, pero ciertos rasgos como fallas y buzamiento de estratos no se encontraban incluidos. Como se mencionó anteriormente el pozo Pauto Sur 3 no muestra aportes en este sentido debido a su trayectoria en la sección, así como la dispersión de los datos por él aportados.

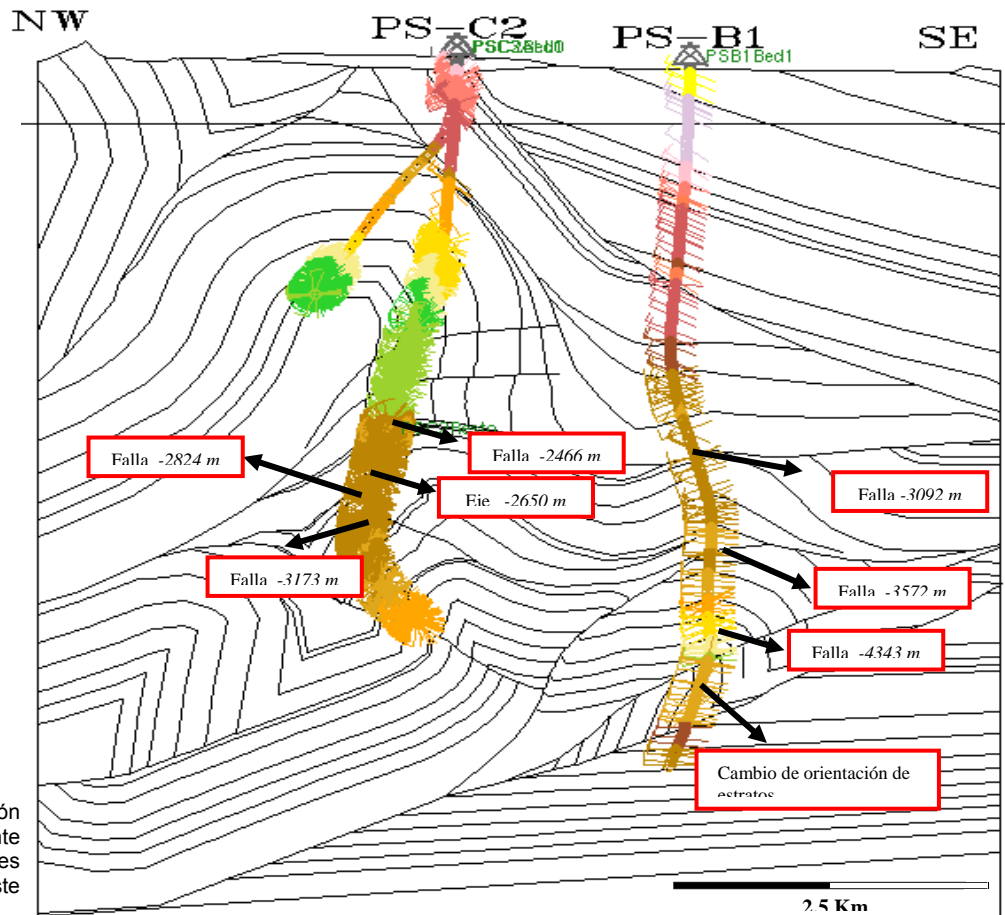


Figura 55. Sección estructural existente con las modificaciones planteadas en este trabajo.

Revisando la línea sísmica asociada a esta sección, se tiene en primer lugar que las estructuras allí involucradas no son desarrolladas o captadas muy bien por la sísmica lo que conlleva a diversas interpretaciones. Este fenómeno se presenta en todas las líneas sísmicas de PIEDEMONTE debido a la complejidad estructural de la zona (Figura 56). A pesar de lo anterior, se han podido identificar con cierta confiabilidad los topes de algunas formaciones como Mirador y Barco en las estructuras más someras de las líneas sísmicas. Adicionalmente se puede también apreciar el sistema de fallas triangulares que conforma los límites del sistema dúplex (Martínez, 2005).

Posterior a los análisis realizados, los cuales conllevaron a la identificación de varios rasgos estructurales en la zona del campo Pauto, se procede con la realización de la sección estructural, la cual tendrá como base la sección oficial de la compañía pero se incluyen las modificaciones aquí propuestas, dentro de las cuales se contempla la eliminación de la estructura de *backthrust* en la sección.

En la sección resultante (Figura 57) se evidencia en primer lugar la eliminación del *backthrust* asociado a la estructura objetivo del pozo Pauto Sur 2, el cual es reemplazado por un *thrust* que es concordante con la tendencia regional que se presenta en la zona. La flexión de dicha falla es la que da origen entonces al anticlinal objetivo del pozo y no es por el contrario una falla que afecta el flanco trasero de dicha estructura.

A realizar esta modificación en la vergencia de la falla identificada, se posibilita el planteamiento del flanco trasero del anticlinal. Teniendo en cuenta el número de flexiones en la falla asociada al pliegue principal y el desplazamiento sufrido por las unidades, se plantea un segundo anticlinal. La ubicación de dicha estructura secundaria es entonces después del segundo *flat* que forman las unidades el bloque colgante con la falla planteada.

En segundo lugar en la sección se ubican varias fallas inversas sucesivas asociadas al horizonte C7, el cual constituye el tope o la zona de despegue de la falla que da como origen a la estructura de El Morro. Esta sucesión de fallas son utilizadas para explicar la repetición de C7 que se presenta en los pozos Pauto Sur 2 y 1. Lo anterior es debido a que los espesores reconocidos para esta unidad son aproximadamente una tercera parte de lo registrado por estos pozos. Adicionalmente estas fallas permiten explicar también la presencia del horizonte C8 en intervalos cortos en el pozo Pauto Sur 2.

Avanzando en profundidad en la sección se pasa a la estructura objetivo del pozo Pauto Sur 1. En primer lugar la falla de *backthrust* es eliminada de dicha estructura debido a que los resultados arrojados por el SCAT Analysis para dicho pozo no reconocen la presencia de una falla en esta zona. Lo anterior, al igual en

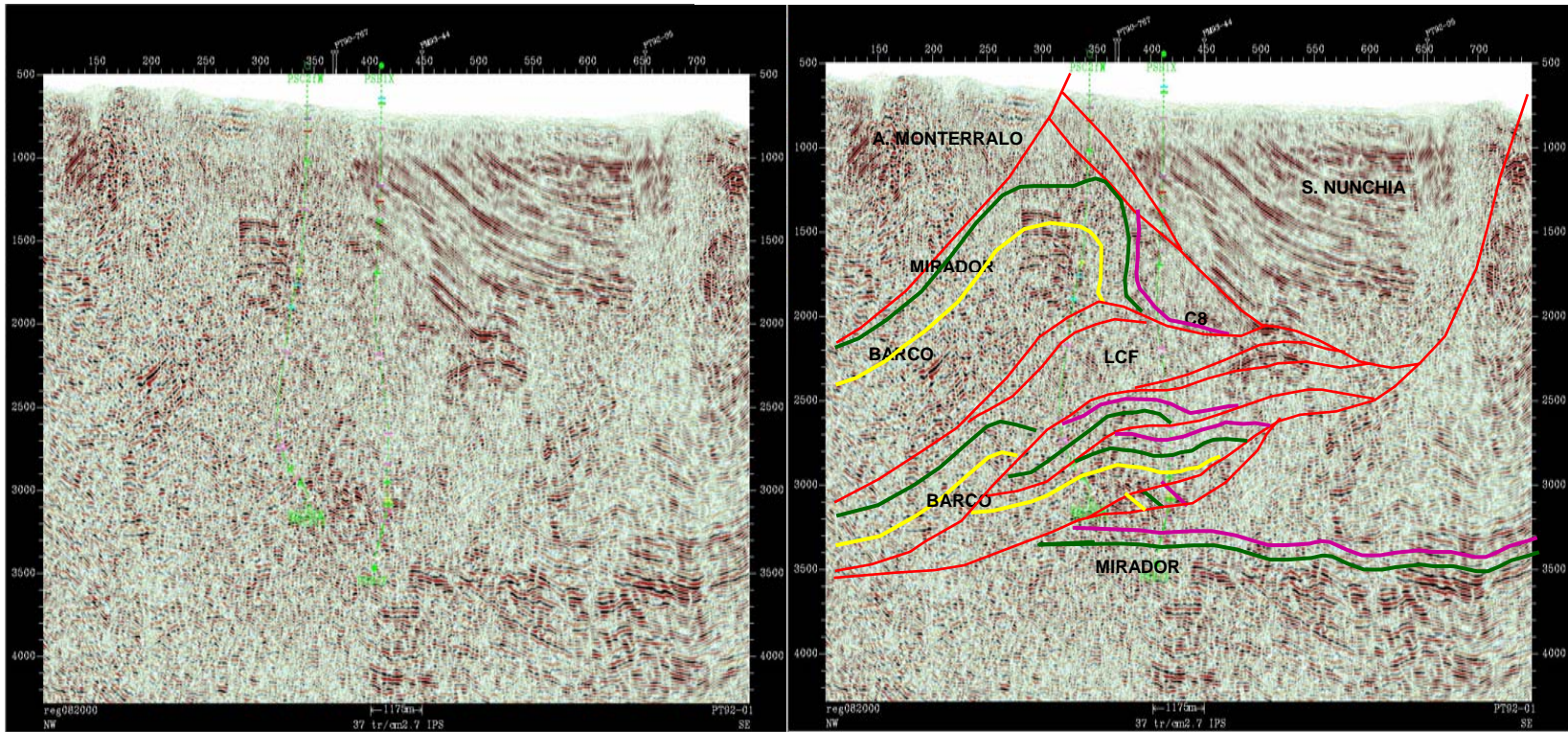


Figura 56. Línea sísmica PT-92-01 que corresponde al campo Pauto. Izquierda, línea sísmica sin interpretar. Se puede apreciar que sólo las estructuras más someras son fácilmente interpretables y parte del *foreland*. Derecha, interpretación de la línea. Solo los topos de las formaciones Mirador, Barco y C8 pueden ser interpretadas, esto con la ayuda de los pozos. Se evidencia una estructura tipo dúplex la cual involucra los campos de la Licencia.

la estructura suprayacente, permitió el desarrollo del flanco trasero de la estructura. Para este caso, y gracias a datos dinámicos de presión se propone una continuidad lateral del horizonte de Mirador en el pozo Pauto Sur 1 con el segundo Mirador perforado en el pozo Pauto Sur 2. Por lo anterior se propone una estructura de dos anticlinales cilíndricos asociados, donde la cresta de cada uno constituiría aproximadamente la zona perforada por cada uno de los pozos.

Por último en esta sección, se plantea un sistema imbricado asociado a la parte basal de la estructura con doble cresta antes mencionada. Dicho imbricado es usado como medio para explicar la sucesiva repetición, en este caso del horizonte C8 en el pozo Pauto Sur 1. Los datos que apoyan la presencia de este imbricado de tres escamas son los datos estructurales, que muestran horizontes casi verticales. En segundo lugar un espesor casi tres veces mayor al registrado para esta unidad en otros pozos y en afloramiento y por último el reconocimiento de una falla en esta zona con ayuda del SCAT Analysis.

Analizando la continuidad lateral de cada una de las estructuras, en este trabajo se propone que el anticlinal objetivo del pozo Dele 1 es lateralmente continuo con la estructura perforada por el pozo Pauto Sur 2, con la diferencia de que en esta última sección la estructura forma un anticlinal más grande y que está estructuralmente más arriba. Para el caso de la estructura del pozo Pauto Sur 1, esta sería lateralmente la misma perforada por el pozo Volcanera 2, con la diferencia de que en la primera sección (pozo Pauto Sur 1), la estructura está estructuralmente más alta y está conformada por dos anticlinales asociados.

Ya realizada la sección estructural se procede al balanceo de la misma. Dicho proceso puede acarrear algunos cambios leves en la geometría de las fallas y de los pliegues con el fin de que la sección cumpla con las reglas del balanceo. Pero en esencia la sección es la misma estructuralmente.

Para esta como para la sección asociada a los pozos de Floreña 1 y 5, el proceso de balanceo se hizo con ayuda de el software Geosec 2D. Este software tuvo entonces en cuenta una conservación de longitud y de desplazamiento en el proceso de balanceo.

El balanceo se inició con la estructura más somera en la sección, es decir, el anticlinal aflorante de Monterralo y sucesivamente se fue profundizando en la sección hasta la estructura de Pauto. El proceso se hizo de esta forma debido a que la complejidad estructural y el estilo de deformación de las diferentes estructuras involucradas es bastante parecido, es decir, son pliegues por flexión de falla.

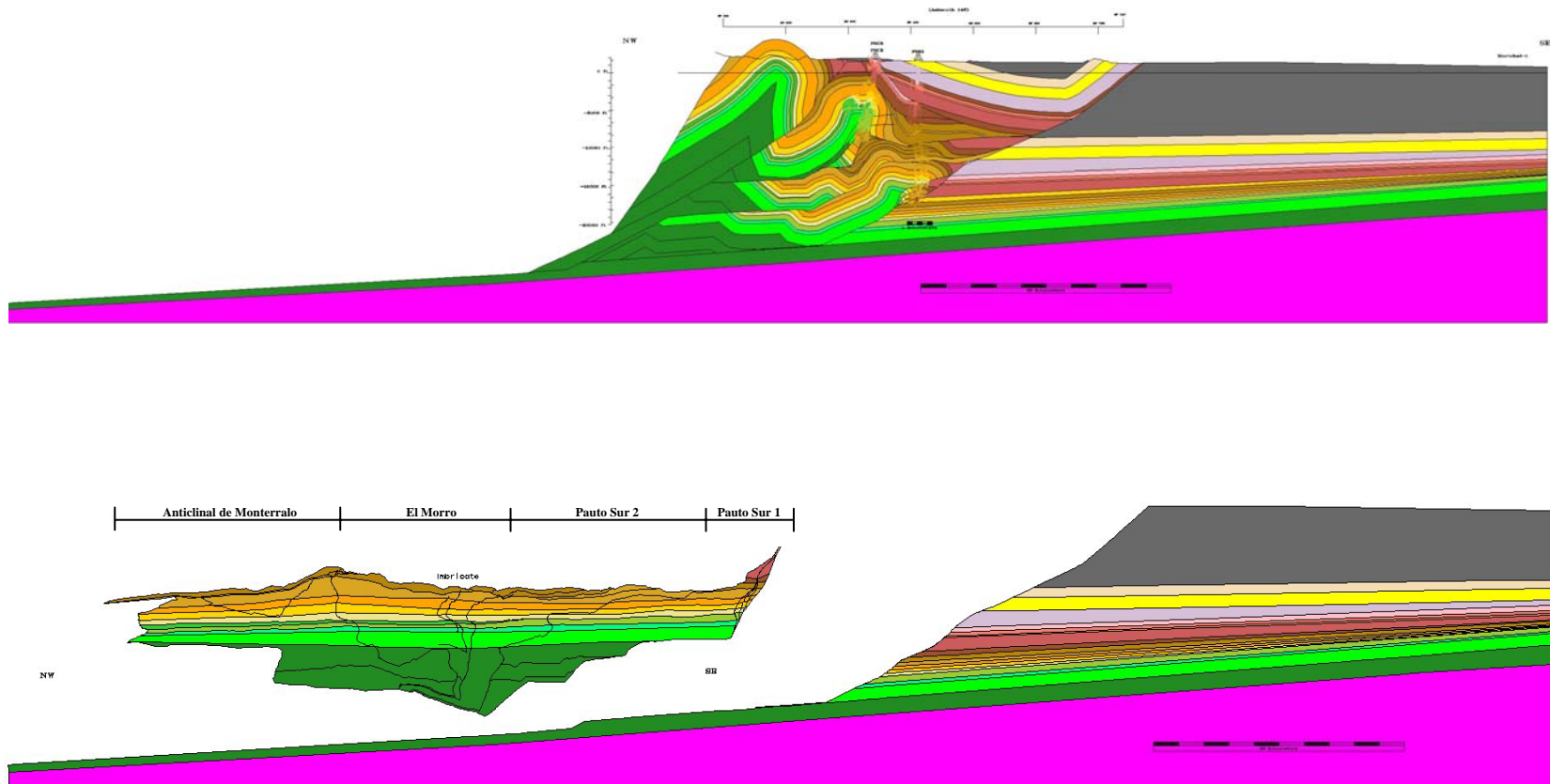


Figura 57. Arriba, Perfil estructural de la línea sísmica PT-92-01, que incluye los pozos Pauto Sur 1, 2 y 3. El aporte principal hecho en esta sección radica en la eliminación de una estructura de *backthrust* que afecta los objetivos de cada uno de los pozos. En esta sección se puede evidenciar los datos estructurales medidos en cada pozo y la formación a la que están asociados. Abajo, restauración de la sección superior. Las estructuras identificadas fueron aquellas cuyo balanceo fue posible. La restauración de dichas estructuras con el **foreland** no ha sido posible.

Un mecanismo de retrodeformación paralelo se realizó con los dos diferentes imbricados que se presentan en la sección con el fin de ajustarlos a las estructuras más grandes a los que están asociados. Este proceso consiste en un desplazamiento paralelo de cada una de las unidades a través de la falla del imbricado relacionada. Lo anterior permite restaurar el imbricado con la estructura mayor de la cual fue derivado. Esta metodología en ocasiones es utilizada en fallas que involucran basamento o fallas de corto salto.

De manera general, para esta sección en el proceso de balanceo se encontraron dos dificultades. En primer lugar, la estructura del sinclinal de Nunchia no fue posible de balancear debido a que las fallas sucesivas asociadas al miembro C7 de la Formación Carbonera daban como resultado un aumento en el espesor de dicho miembro. Debido a esto la acomodación del segmento de este miembro asociado a este sinclinal no fue posible de balancear, y por tanto el sinclinal completo. Afortunadamente este sinclinal poco o nada afecta la distribución de las estructuras de interés en este trabajo y el balanceo de dichas estructuras si fue posible.

Adicionalmente a lo anterior, se debe tener en cuenta que las dos fallas principales que controlan el sistema triangular en el que están comprendidas las estructuras, es decir, la falla de Guaicáramo y la falla de la base del sinclinal de Nunchia. A pesar de ser inversas, presentan una componente de rumbo. Lo anterior hace que existan movimientos por fuera del plano de la sección trabajada, y por tanto pérdidas o adiciones de volumen en el mismo plano. Esto facilitado por la presencia de unidades no competentes, cuyo volumen es fácil de desplazar del plano de la sección.

De manera general todas las estructuras fueron balanceadas a excepción del sinclinal de Nunchia por las razones ya explicadas. La Figura 57 muestra las estructuras balanceadas. El acortamiento sufrido por la sección en el proceso de deformación para el sector que fue posible restaurar fue de 51.23%. Lo anterior es evidencia de la alta componente compresiva que existe en la zona debido al efecto causado sobre la placa Sur Americana por parte de las placas de Nazca al occidente del continente y la Caribe en la parte norte del mismo. Dichos esfuerzos sumados a la presencia del escudo de la Guyana en la parte oriental, hacen que la zona trabajada una alta compresión como la revelada por el acortamiento calculado.

El segundo inconveniente presentado en el balanceo de esta sección está en la forma de la falla basal que marca el inicio del **foreland** en la sección. La morfología actual de dicha falla no permite su balanceo con respecto a las otras estructuras de la sección, por lo cual el **foreland** no aparece en la sección balanceada, por el contrario se muestra su ubicación con respecto a las estructuras restauradas. Para este problema se plantea una redefinición de dicha falla, ya que su forma está basada en la interpretación estructural existente, la cual

con métodos de reprocesamiento permitiría una definición más clara de la falla y no tan supuesta como está actualmente.

Por último, en cuanto al *loose line* de la sección restaurada, se tiene que ésta no muestra la geometría que se desearía en una restauración, debido a que la línea no es homogénea y presenta salientes o bajos. Pero en anterior comportamiento tiene una explicación. Para el caso de la saliente al inicio de la sección y que está asociada al miembro C7 de la formación Carbonera, se tiene que es producto de la restauración de el sistema de fallas sucesivo que presenta el miembro. Estas fallas son la única explicación hasta ahora que se tiene al gran espesor que presenta este miembro en el pozo Pauto Sur 2. Esta anomalía en el *loose line* de la sección restaurada como el aumento anómalo en el espesor del miembro C8 perteneciente también a la formación Carbonera, confirma entonces la presencia de movimientos de rumbo que están por fuera del plano de la sección y que son los causantes del movimiento de masa en el mismo. Para este caso sería una adición de la masa en estos niveles estratigráficos.

La segunda anomalía que se presenta en el *loose line* corresponde a un bajo. Esta anomalía puede ser explicada por el acuñamiento sufrido por el miembro superior de la formación Guadalupe, ya que éste grupo de estratos se presenta en el pozo Pauto Sur 3 y Pauto Sur 2 y no en el Pauto Sur 1. Debido a lo anterior se propone un pinchamiento de este miembro en el flanco trasero de la estructura del pozo Pauto Sur 2. El bajo que se presenta en el *loose line* a la altura de esta formación puede ser explicado si el pinchamiento sufrido no está ubicado en la posición correcta, restándole masa al miembro. Si la posición del pinchamiento es modificada más hacia la izquierda de la sección, es posible lograr un *loose line* que tiende hacia en occidente, gracias a la eliminación del bajo.

4.3 SECCION PM-93-04 – POZOS FLOREÑA 2 Y FLOREÑA 4

4.3.1 Pozo Floreña 2.

Para esta sección se tiene que están dos pozos asociados a ella, los cuales comparten un mismo path. Lo anterior hace que ambos pozos tengan trayectoria en la primera parte perforada y que posiblemente tengan como objetivo la misma estructura, como este caso.

El pozo Floreña 2 es aquel cuya trayectoria está ubicada hacia la parte más SE de la sección. Los datos asociados a éste pozo presentan un buena densidad y poca dispersión de los mismos. Lo anterior facilita el reconocimiento de varias estructuras a diferentes profundidades. Otro rasgo importante de este pozo es que la representación de sus datos estructurales muestra varias discontinuidades en

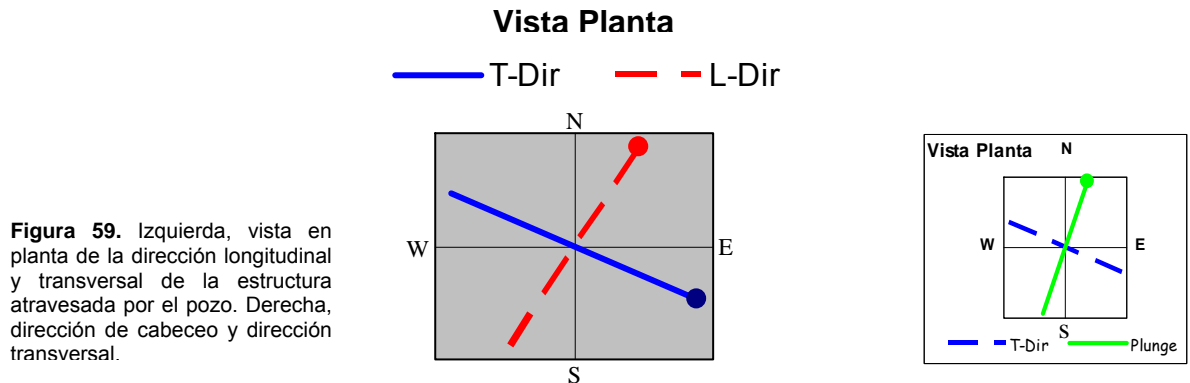
los mismos, lo cual podría estar asociado con el paso a través de estructuras superpuestas.

Dentro de las estructuras identificadas se destacan varios grupos de fallas y un eje axial. De manera general el primer grupo de fallas reconocidas están asociadas a los miembros C7 y C8 que se encuentran en la parte superior de la estructura de Floreña. Dichas fallas marcan la transición entre la estructura de Floreña y la de El Morro. Dichas fallas conforman entonces un sistema imbricado que como se mencionó anteriormente marca el paso entre la estructura de Floreña y de El Morro. Éste imbricado tiene su origen en una falla inversa principal que separa estas dos estructuras y que da origen al Morro.

Para el último grupo de datos, donde se identifica un eje axial y una falla, se tienen que éstos corresponden al eje de la estructura de Floreña y a la falla cuya flexión genera el campo respectivamente. La Figura 58 muestra un resumen de las estructuras identificadas y su expresión en las gráficas del SCAT Analysis.

Se pueden identificar también los datos anómalos registrados por la herramienta y que fueron interpretados como planos de estratificación. Dichos datos indican un aumento en la densidad de fracturas en la zona perforada.

En la gráfica de la componente longitudinal del buzamiento versus la profundidad, se tiene que la gran mayoría de los datos se alinean al 0° . Este comportamiento permite calcular una dirección longitudinal de 28° y una transversal de 118° . El cabeceo asociado a las estructuras atravesadas es de 12° . Una representación en planta de la dirección longitudinal y transversal de las estructuras se muestra en la Figura 59. En ella se puede evidenciar que se continúa con el tren traído por las estructuras en pozos anteriores pero aún así se presenta un mayor acercamiento al sentido N – S. Lo anterior es concordante con la geología de superficie, ya que el rumbo de las estructuras aflorantes se acerca más a la dirección N – S a medida de que se avanza hacia el norte de la Licencia.



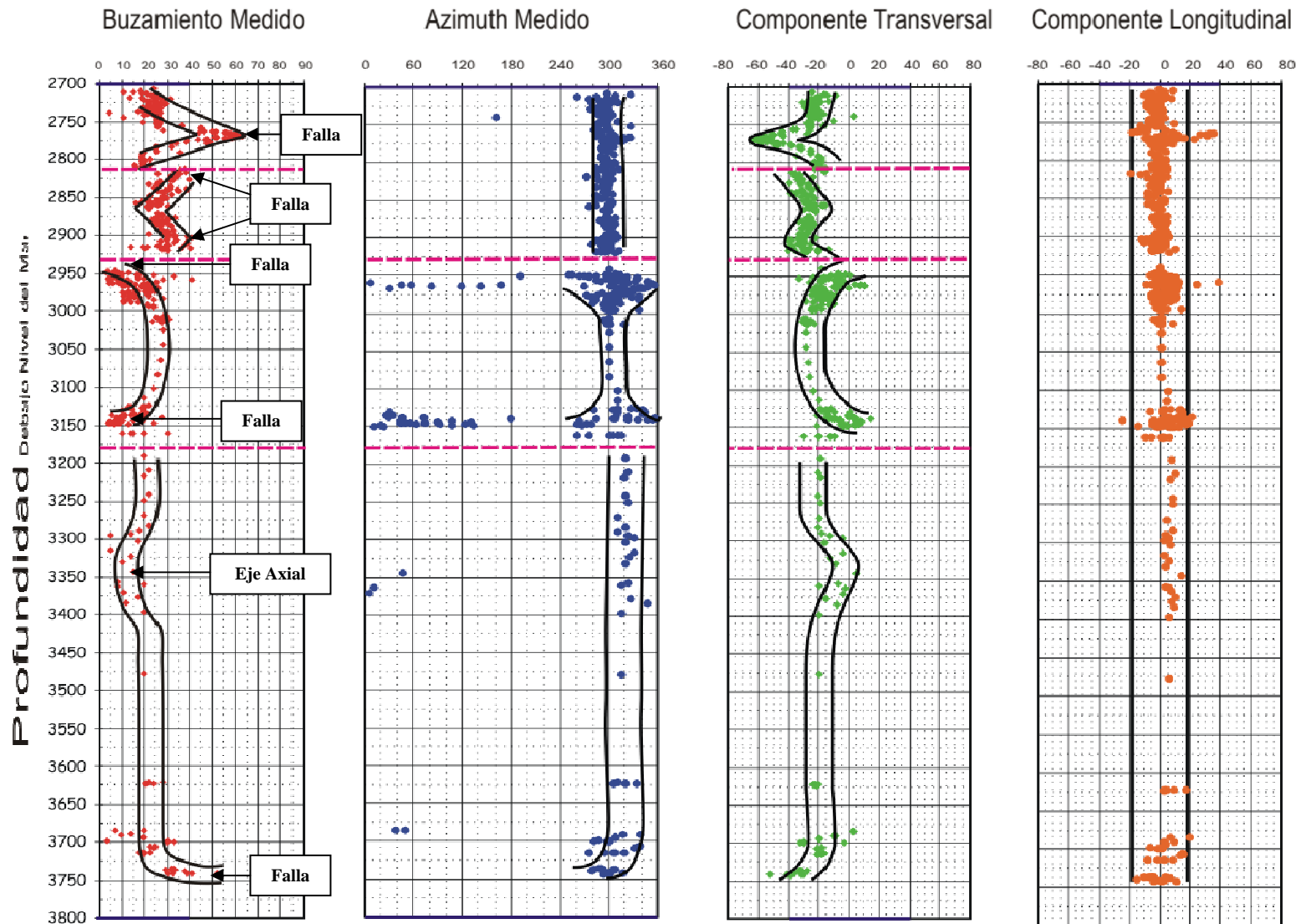


Figura 58. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos estructurales medidos en el pozo Floreña 2 asociados a la estructura de Floreña.

Pasando al segundo grupo de gráficas, las cuales son las de Buzamiento versus Azimuth y el diagrama de polos. Para la primera gráfica se tiene que es posible identificar un pliegue donde los datos medidos están asociados a sólo un flanco de la estructura. Para este caso el flanco sería el trasero.

La orientación del eje de la estructura se puede determinar con ayuda del diagrama de polos de los datos medidos. Dicho eje presenta un rumbo de 23° (Figura 60) y una magnitud de cabeceo de 4° . Con este resultado se plantea entonces una magnitud de cabeceo de la estructura que va de 4° a 8° .

La Figura 60 muestra el diagrama de polos producto del SCAT Analysis y del software Tectonics FP. Igualmente se presenta el diagrama de DVA (Dip Versus Azimuth display), diagrama de Buzamiento versus Azimuth de Buzamiento. Los diagramas de polos realizados por medios diferentes muestran que el diagrama producto del SCAT Análisis no grafican la totalidad de los datos medidos. Por lo anterior se hace necesario un segundo medio de graficación, con el fin de hacer una evaluación de los resultados arrojados por el SCAT Analysis.

4.3.2 Pozo Floreña 4.

De manera general para los diferentes diagramas producto del SCAT Analysis se tiene una dispersión bastante baja o nula de los datos, lo cual facilita la interpretación de los mismos. Adicionalmente se cuenta con una densidad pequeña de mediciones.

Dentro de las estructuras identificadas se encuentra una falla que pone en contacto dos estructuras diferentes, que para este caso son la estructura de El Morro y Floreña. Por tanto la falla aquí descrita marcaría el inicio de la estructura de Floreña en la sección analizada. Un segundo rasgo está marcado por la homogeneidad en los datos, lo cual es interpretado como un flanco de la estructura de Floreña. Por último una falla que afecta el flanco frontal de la estructura de Floreña. Para estas fallas no es posible identificar la presencia o tipo de arrastre generado por la falla, debido a la poca densidad de datos.

La Figura 61 muestra un resumen de las diferentes estructuras y su expresión en el SCAT Analysis realizado a este pozo.

En la componente longitudinal del buzamiento la tendencia esta alrededor de 0° , con un solo dato que se aleja de dicha tendencia agresivamente. Con esta gráfica se estima un cabeceo de 8° ; la dirección longitudinal de la estructura es de 39° y la transversal de 129° (Figura 62). Todo lo anterior concordante con los resultados mostrados por secciones aledañas analizadas también en este trabajo. Igualmente es coherente con las tendencias mostradas en la geología de superficie, ya que las estructuras aflorantes poseen sus ejes bastantes paralelos a la dirección longitudinal aquí propuesta.

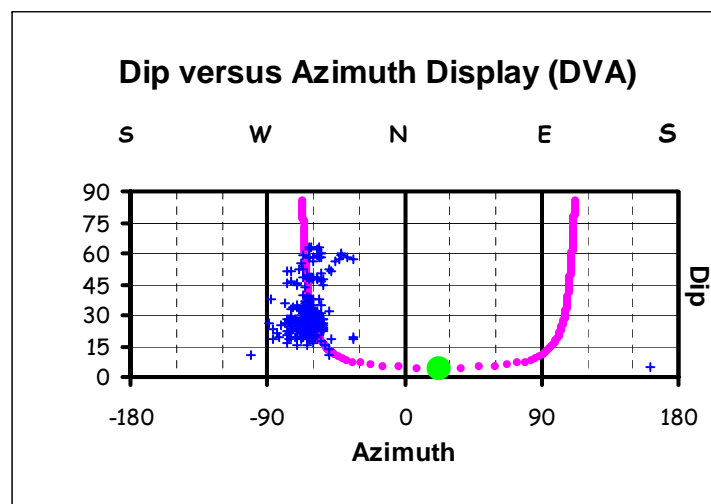
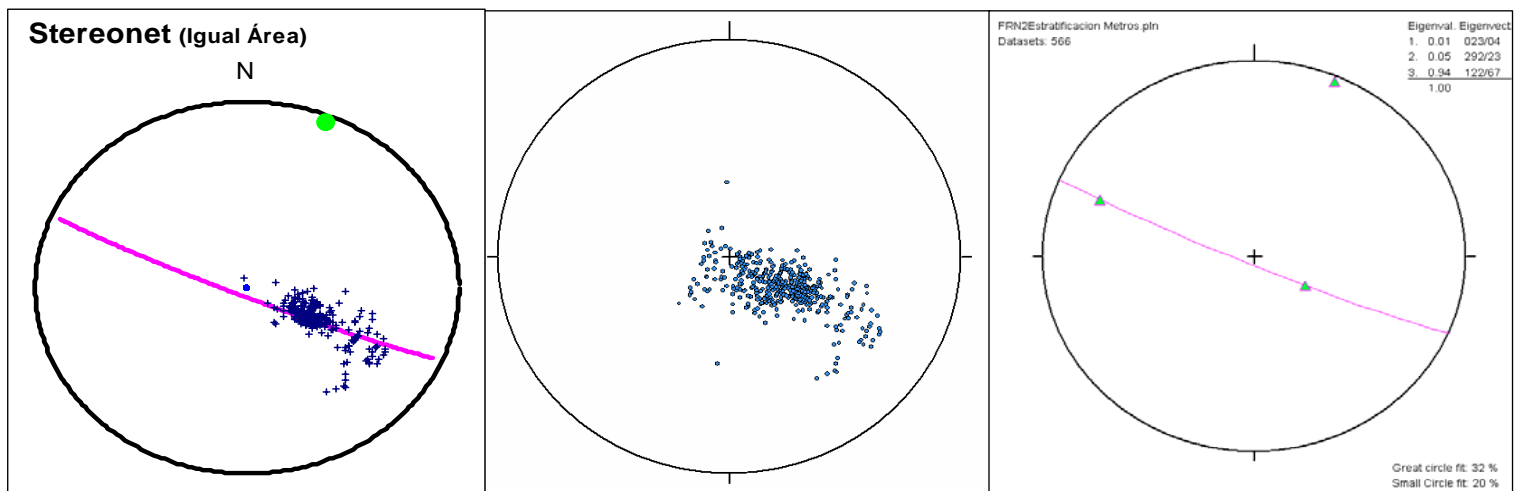


Figura 60. Pozo Floreña 2. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis junto con el plano que mejor representa la dispersión de los datos. El polo de dicho plano representa el eje de la estructura atravesada por el pozo. Centro arriba, diagrama de polos producido con Tectonics. Se aprecia la mayor densidad de datos, no tenidos en cuenta en el diagrama anterior. Derecha arriba, diagrama de vectores de simetría de los datos. El vector 1 corresponde al eje de la estructura. Abajo, Buzamiento versus Azimuth de buzamiento. Los datos trabajados corresponden a un solo flanco de la estructura.

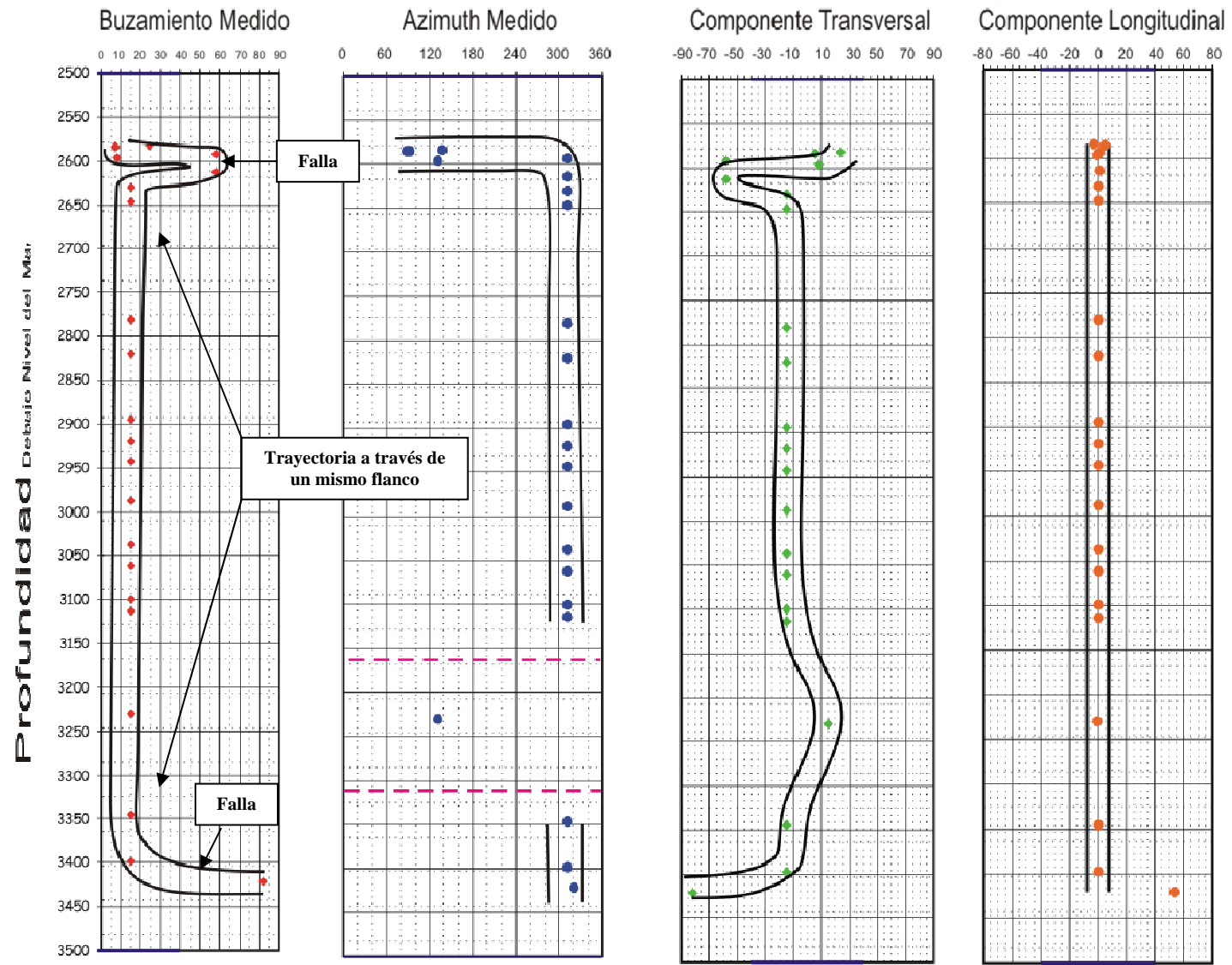
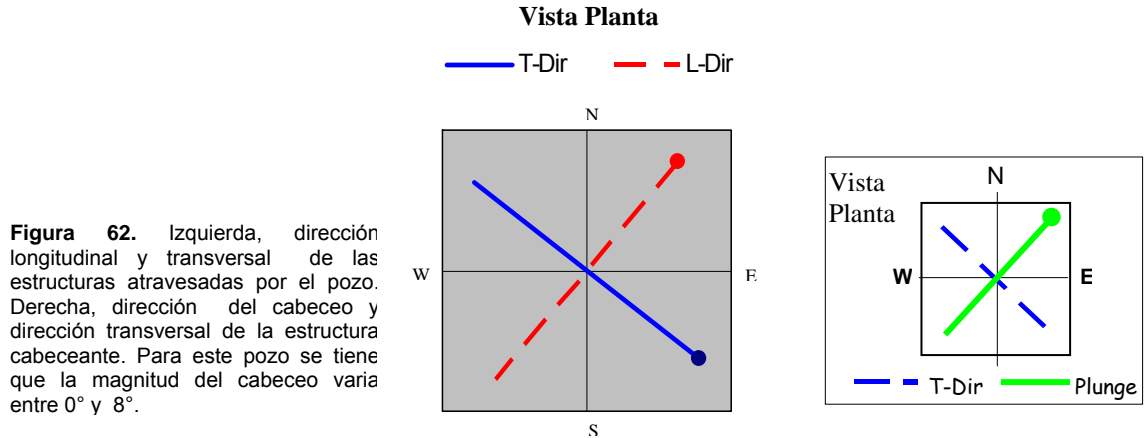


Figura 61. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos estructurales pertenecientes a la estructura de Floreña medidos en el pozo Floreña 4.

El segundo grupo de gráficas son las que muestran la relación entre el buzamiento medido y el azimuth de dicha inclinación (gráfica DVA); y el diagrama de polos del mismo grupo de datos. Para la primera gráfica se presentan dos tendencias, la primera a un azimuth de -45° y la segunda a 45° . Según este gráfico los datos representan un pliegue sin cabeceo, ya que el cálculo del eje del mismo da como resultado una inclinación de 0° y la dirección del mismo en caso de que existiera sería a 43° (Figura 63).



En el diagrama de polos utilizando el SCAT Analysis se determina un plano que incluye todos los datos cuya orientación es de $133^\circ/90^\circ$. El polo de dicho plano está a $43^\circ/0^\circ$, este polo representa el eje del pliegue, así como la dirección del cabeceo y la magnitud del mismo (Figura 63). En el caso del diagrama de polos utilizando Tectonics FP, se obtuvo una dirección de cabeceo de 223° , es decir, en el sentido contrario a lo determinado por otra técnica; la magnitud del cabeceo es de 0° .

Debido a que la dirección del cabeceo determinada por ambos sistemas se encuentran sobre la misma línea de rumbo, se toma para este trabajo el azimuth de 43° , ya que está más en concordancia con las estructuras regionales y los resultados obtenidos en otros pozos. Para el caso de la magnitud del cabeceo, se propone un rango que varía entre 0° y 8° .

La Figura 64 muestra un resumen de los diferentes rasgos estructurales propuestos para esta sección con ayuda del SCAT Analysis.

La línea sísmica asociada a estos pozos se encuentra en la Figura 65. Analizando dicha línea se puede apreciar que solo las estructuras más someras y menos complejas estructuralmente son resultas por la sísmica. Es así como se puede identificar el sinclinal de Nunchia, la estructura de El Morro y el **foreland** en la

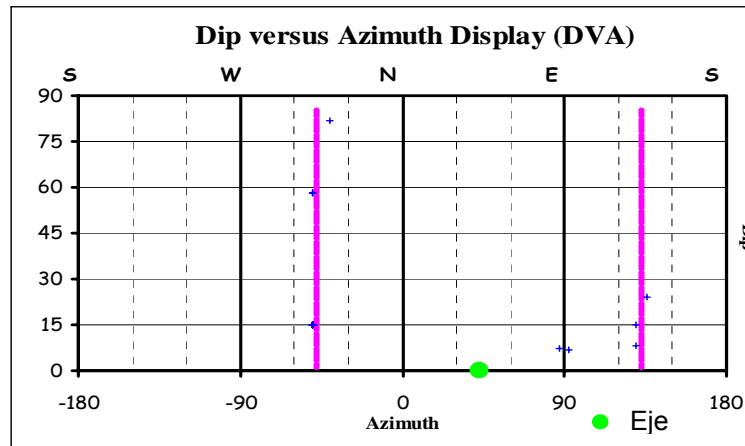
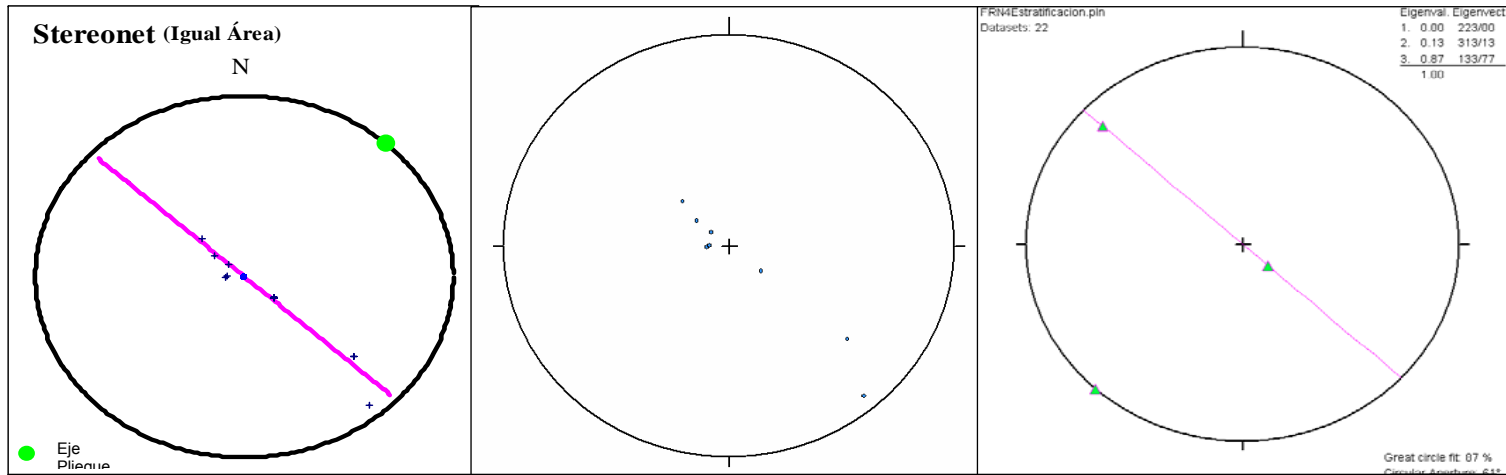


Figura 63. Pozo Floreña 4. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis con el plano que mejor representa dichos polos. El polo de dicho plano corresponde al eje de la estructura atravesada por el pozo. Arriba centro, diagrama de polos producto de Tectonics. Debido a la poca densidad de datos, este diagrama es igual al producido con el SCAT. Derecha arriba, diagrama con los vectores de simetría asociados a los datos utilizados. El vector 1 corresponde al eje de la estructura. Abajo, Buzamiento medido versus Azimuth de buzamiento.

sísmica. Adicionalmente es también posible reconocer el flanco trasero de las estructuras de Floreña y Pauto. Las zonas de imbricados y altos buzamientos no son resueltos por la sísmica.

La interpretación de dicha línea sísmica representa lo antes expuesto. El análisis de esta interpretación y de la sección preexistente en la compañía así como las estructuras aquí propuestas. Lo anterior se hace con el fin de evaluar el ajuste de las estructuras propuestas con la sísmica disponible.

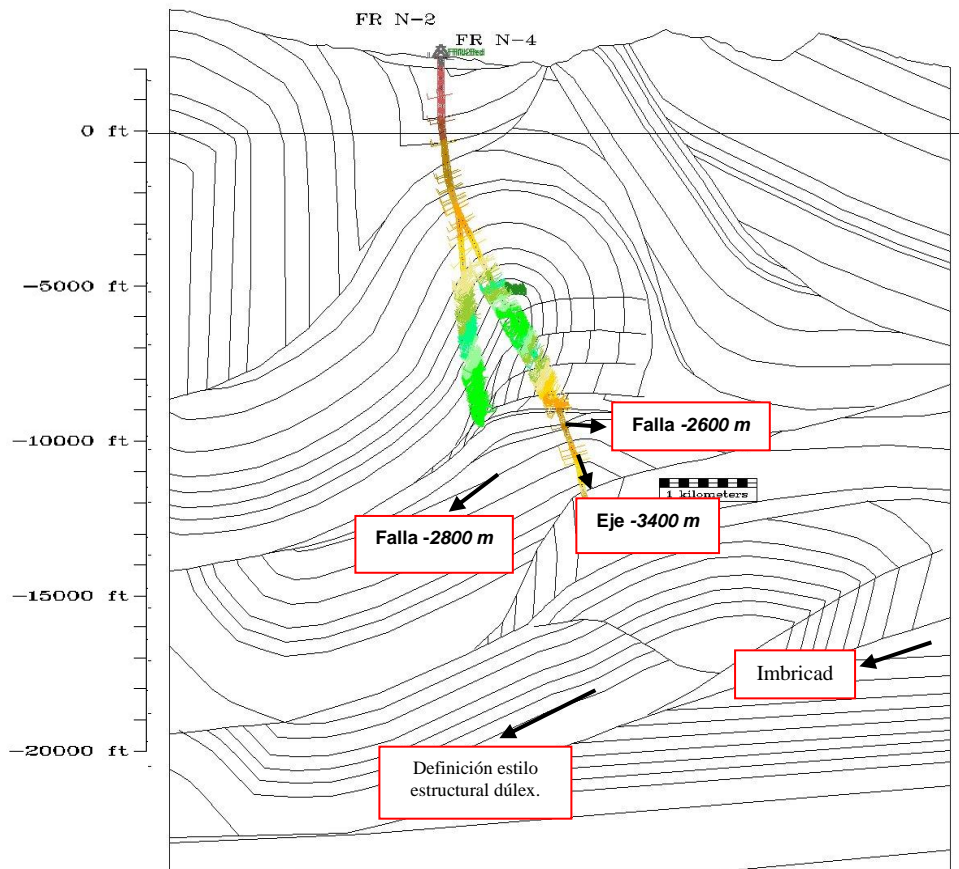


Figura 64. Elementos estructurales propuestos para la sección con ayuda del SCAT Analysis.

Después de los análisis anteriores la sección estructural resultante se muestra en la Figura 66. En esta sección es donde aparece por primera vez la estructura de Floreña, la cual da origen al campo del mismo nombre. Esta estructura toma el lugar ocupado en las secciones anterior por un sistema imbricado asociado a los miembros C7 y C8 de la formación Carbonera. Dichos imbricados marcan el contacto entre la estructura de El Morro y la subyacente de Pauto.

La estructura de Floreña se presenta una geometría sinclinal – anticlinal producto de la aparición de una falla cuya flexión sinforme – antiforme genera la estructura en mención. Dicha falla que da origen a la estructura de Floreña correspondería a aquella más profunda dentro del sistema de fallas sucesivas que afectan el miembro C7 y C8 de la formación Carbonera en la sección anterior. Para la formación de la estructura de Floreña, la falla mencionada en algún sitio entre la sección anterior y ésta comienza a afectar la parte posterior de la estructura del pozo Pauto Sur 2. Ésta fracción es entonces la que conformaría el campo Floreña, el cual toma su posición y geometría actual por acción de la falla asociada.

Para las estructuras asociadas al campo Pauto se tiene que aquella que es objetivo del pozo Pauto Sur 2 en esta sección ya no presenta una segunda estructura anticlinal en su parte posterior. Lo anterior debido a la acción de la falla que genera la estructura de Floreña. La estructura de Floreña correspondería entonces al anticlinal posterior en la estructura de Pauto. Adicionalmente la estructura de Pauto se encuentra más profunda y el anticlinal que lo conforma presenta una geometría más abierta. En su flanco frontal se presenta un incipiente pliegue de arrastre debido a la falla cuya flexión genera la estructura de Pauto Sur 2.

El segundo grupo de estructuras del campo Pauto son las asociadas al pozo Pauto Sur 1. Para esta sección aparece una nueva falla inversa que divide el sistema anticlinal – sinclinal - anticlinal de la sección anterior en dos anticlinales. Dichos anticlinales presentan pliegues sinclinales de arrastre asociado a la falla que los separa.

El sistema de fallas asociados a la estructura de Pauto presentan como zona de despegue principal la formación Une y la falla basal que pone en contacto la zona deformada con el **foreland**. Adicionalmente estas fallas en estas estructuras se propagan a través de la formación Gachetá. Por último se mantiene el sistema imbricado en la base de la estructura de Pauto en el pozo Pauto Sur 1.

4.4 SECCIÓN PT-90-379 – POZOS FLOREÑA 1 Y FLOREÑA 5

4.4.1 Pozo Floreña 1.

Los pozos asociados a esta sección, Floreña 1 y Floreña 5 están asociados en superficie por un mismo path. En subsuelo, el pozo Floreña 1 se encuentra hacia el NW de la sección trabajada y tiene como objetivo la cresta de la estructura de Floreña. Los datos estructurales medidos en este pozo y que corresponden a la estructura de Floreña inician a una profundidad de -2200 m, hasta -3400 m donde termina el pozo.

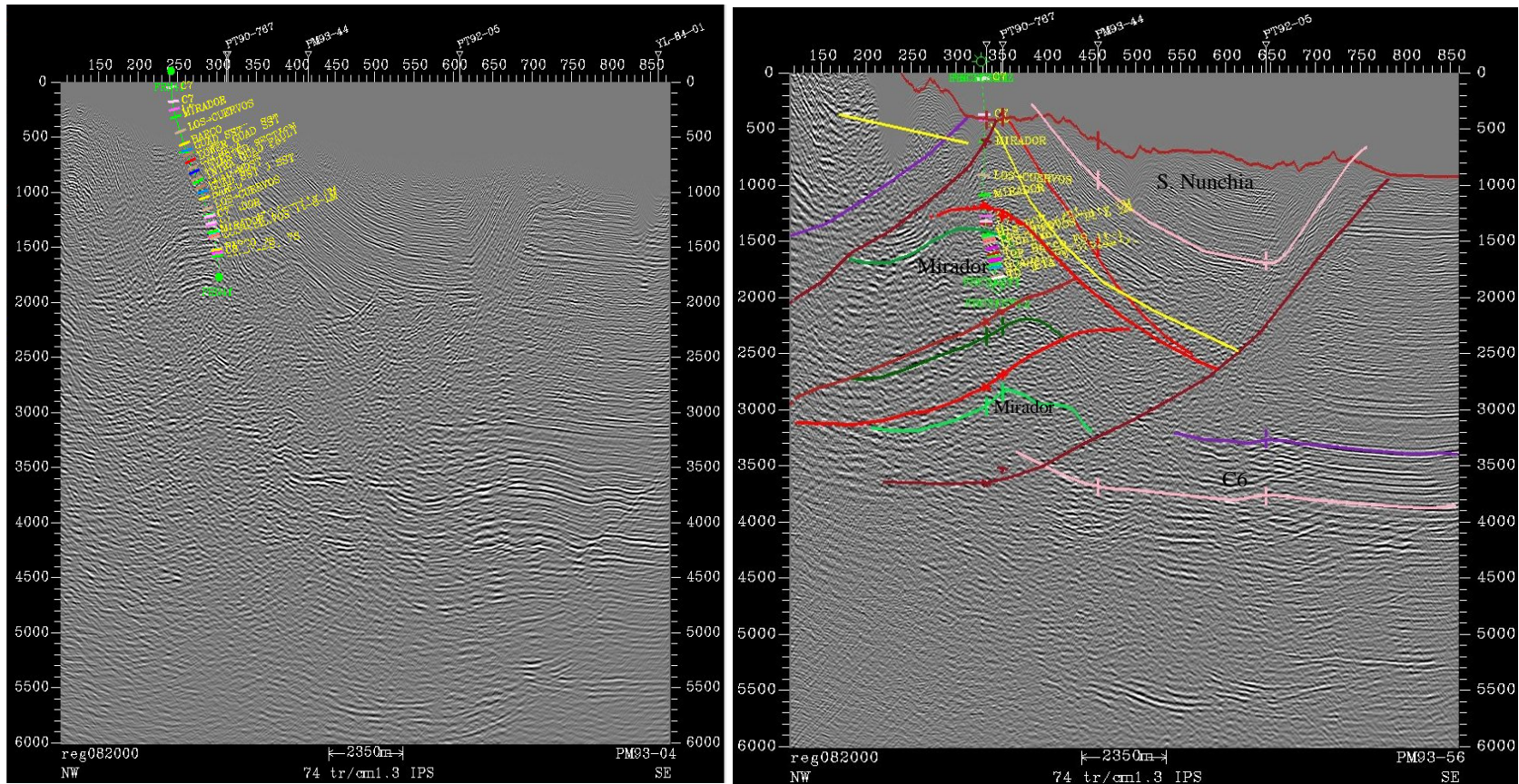


Figura 65. Izquierda, sección sísmica asociada a los pozos Floreña 2 y Floreña 4. Se muestra parte de la trayectoria del pozo Floreña 4. Se puede fácilmente interpretar la estructura de El Morro y el Sinclinal de Nunchia, así como el **foreland** de la sección. Derecha, interpretación de la línea sísmica con algunos horizontes. En esta sección se aprecia la aparición de una nueva estructura, Floreña, la cual resta espacio a la subyacente estructura de Pauto.

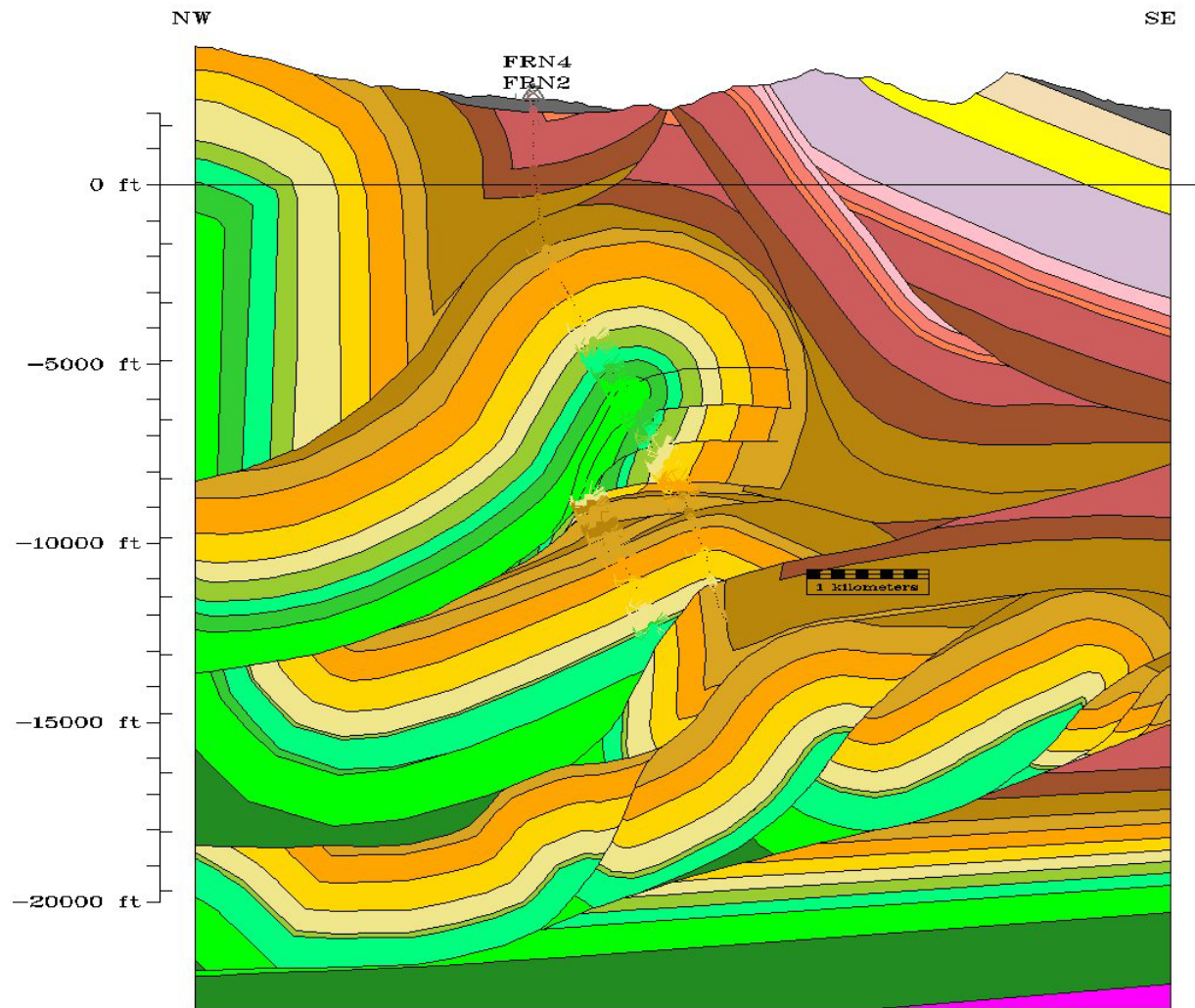


Figura 66. Sección estructural resultante que corresponde a la línea sísmica PM93-04 que involucra los pozos Floreña 2 y Floreña 4.

De manera general en los diagramas de SCAT Analysis para este pozo, se reconocen estructuras como fallas, planos de inflexión y ejes axiales. Dentro de las fallas identificadas se encuentra la de El Morro, que da origen a ésta estructura y que marca el inicio de la estructura de Floreña. El plano de inflexión reconocido se encuentra enmarcado en la estructura de Floreña y teniendo en cuenta las magnitudes medidas, dicho plano separa entonces bandas *kind* con buzamientos bajos y similares; por tanto el pliegue en esta zona sería bastante abierto.

El eje de la estructura de Floreña se soporta en los cambios en los datos de azimuth, los cuales representan el paso de un flanco a otro dentro de una misma estructura. Por lo anterior la diferencia entre los datos de azimuth medido para cada flanco están aproximadamente separados 180°.

El último fallamiento identificado afecta el flanco frontal de la estructura de Floreña y se encarga de verticalizarlo, razón por la cual los datos de buzamiento aumentan. En profundidad esta falla tiene su origen en la falla principal que da origen a la estructura de Floreña y que marca el paso a las estructuras de Pauto.

La Figura 67 muestra un resumen de las estructuras identificadas y su expresión en los diagramas del SCAT Analysis.

El gráfico de Componente longitudinal de buzamiento versus profundidad arroja una dirección longitudinal de la estructura de 10° y una transversal de 110°. Muy similar a las secciones anteriores pero se mantiene la reorientación gradual de las estructuras hacia la dirección N – S. La Figura 68 muestra la vista en planta de dichas orientaciones.

Adicionalmente en la componente longitudinal se tiene que los datos pasan de la dirección W a la E pasando por los 0° de cabeceo. Este comportamiento sugiere un doble cabeceo de la estructura y adicionalmente arroja un cabeceo principal de 20°. Esta magnitud de cabeceo sugiere hacia el norte la profundización de la estructura y el cierto punto la pérdida de la misma. Lo anterior insinuaría la no perforación de pozos muy alejados hacia el norte de esta sección ya que existe gran posibilidad de que la estructura pierda continuidad.

Los diagramas de Buzamiento versus Azimuth del buzamiento (DVA, Dip Versus Azimuth display) y los diagramas de polos realizados para los datos de este pozo arrojan una magnitud de cabeceo de 11° en dirección N35°E. Teniendo esto en cuenta, entonces, el cabeceo de la estructura varía entre 11° y 20°.

Estos mismos gráficos reconocen que los datos hacen referencia a un pliegue donde los datos medidos corresponden a los dos flancos de la estructura. Y adicionalmente se marca el punto donde se pasa de un flanco a otro. Se evidencian también una serie de datos anómalos que corresponderían a mediciones de fracturas o planos de laminación (Figura 69).

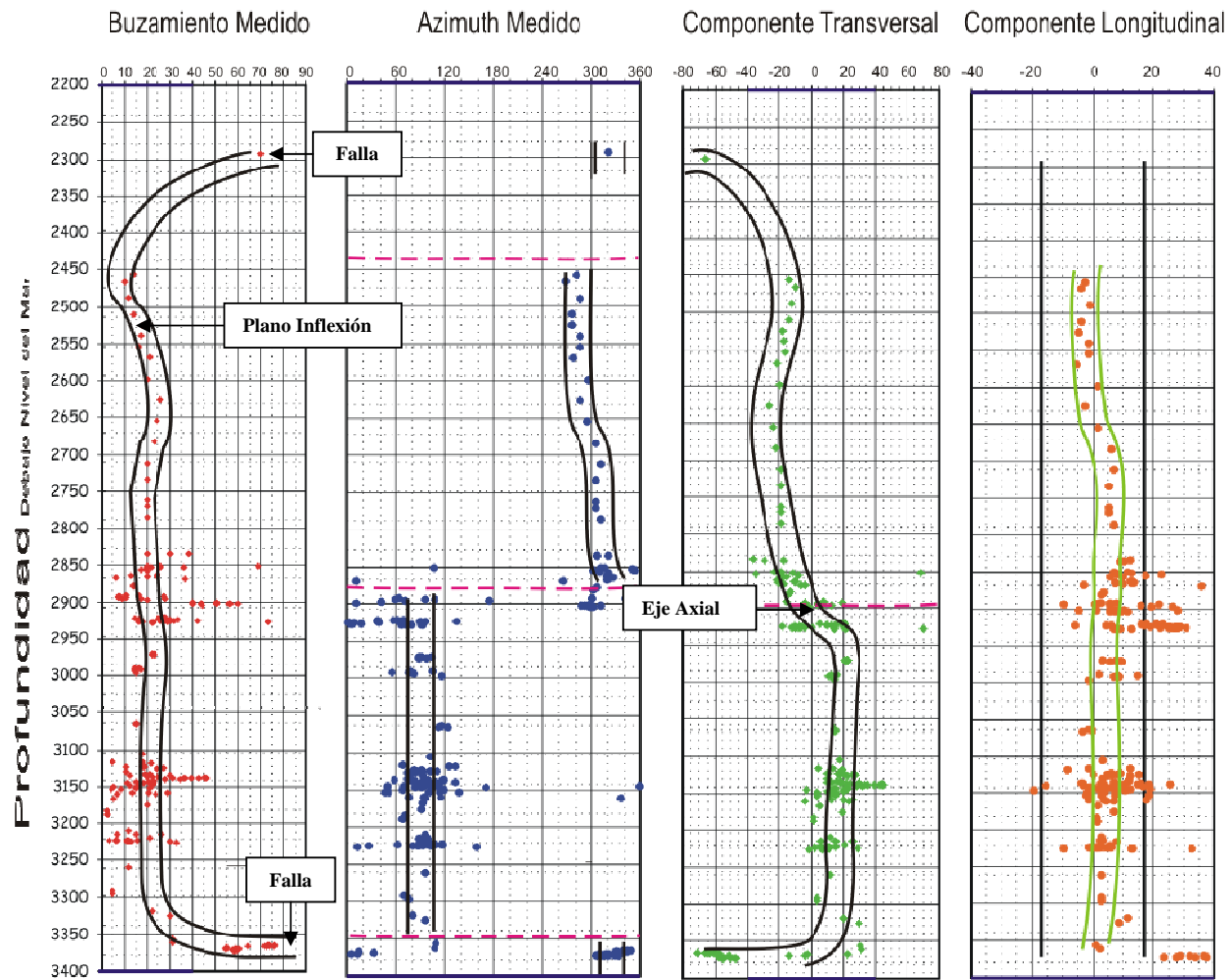


Figura 67. Diagramas producto del SCAT Analysis a los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 1.

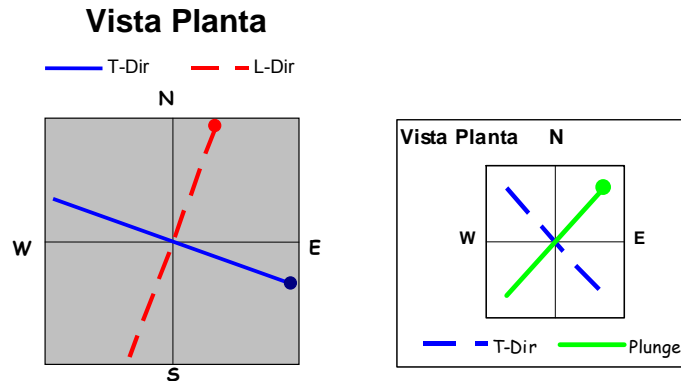


Figura 68. Izquierda, vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura de Floreña. Derecha, vista en planta de la dirección de cabeceo y transversal del mismo de la estructura de Floreña.

La dirección del eje de la estructura es de $N35^{\circ}E/11^{\circ}NE$, es decir, igual a la dirección y magnitud del cabeceo de la estructura.

En el diagrama de polos producto realizado con la ayuda de Tectonics, se puede evidenciar una mayor densidad de datos. El comportamiento preferencial de los mismos es lo que define el plano cuyo polo es el eje de la estructura. Adicionalmente se pueden apreciar los datos anómalos medidos y cuál es su efecto en los diagramas realizados. Los datos anómalos están asociados a rumbos NE – SW y a valores altos de buzamiento.

4.4.2 Pozo Floreña 5.

Pozo caracterizado dentro de la sección por su trayectoria, donde la mayor cantidad de fracción perforada afecta el sinclinal de Nunchia. Posterior a esta estructura, el pozo encuentra su objetivo, el cual es el flanco frontal de la estructura de Floreña.

Este pozo presenta una densidad baja de mediciones por lo que no existe una dispersión muy alta y es de fácil identificación los diferentes rasgos estructurales. Se logró entonces identificar la falla de El Morro, falla que pone en contacto estratos casi verticales con unos poco inclinados. Adicionalmente los estratos puestos en contacto por la falla determinada corresponden a estructuras diferentes (El Morro y Floreña). También se pueden reconocer la presencia de datos anómalos que se asocian a mediciones de laminación o fracturas (gráfica de Azimuth versus Profundidad).

Por último, es posible identificar la falla de Floreña, que marca el paso de la estructura de Floreña a la de Pauto en este pozo. La Figura 70 muestra un resumen de los elementos identificados y su expresión en las gráficas del SCAT Analysis.

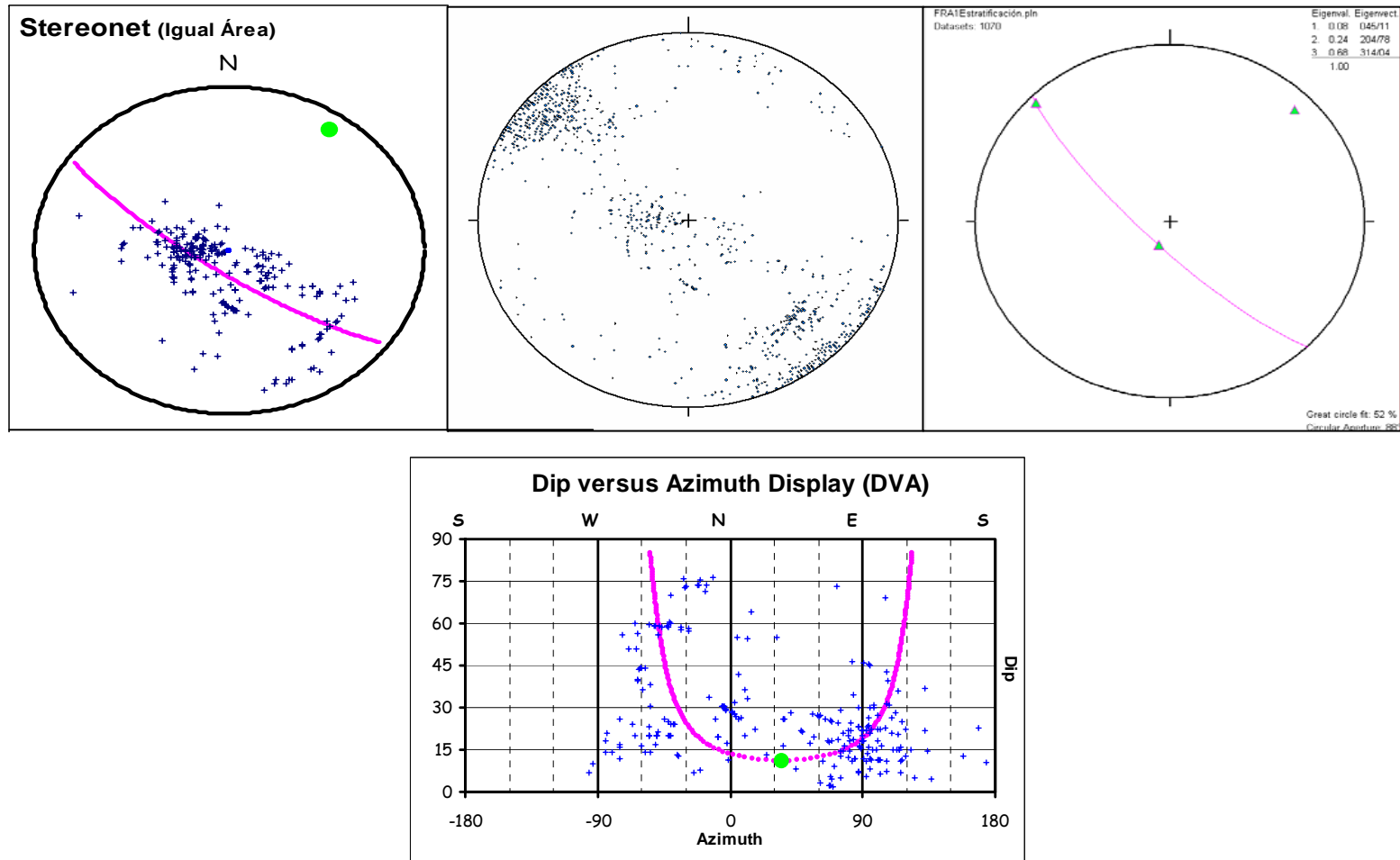


Figura 69. Pozo Floreña 1. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis donde se indica el plano que mejor representa los datos graficados y el polo del mismo. Arriba centro, diagrama de polos producto de Tectonics. Arriba derecha, vectores de simetría calculados a partir de los datos. Abajo, Buzamiento versus Azimuth de buzamiento.

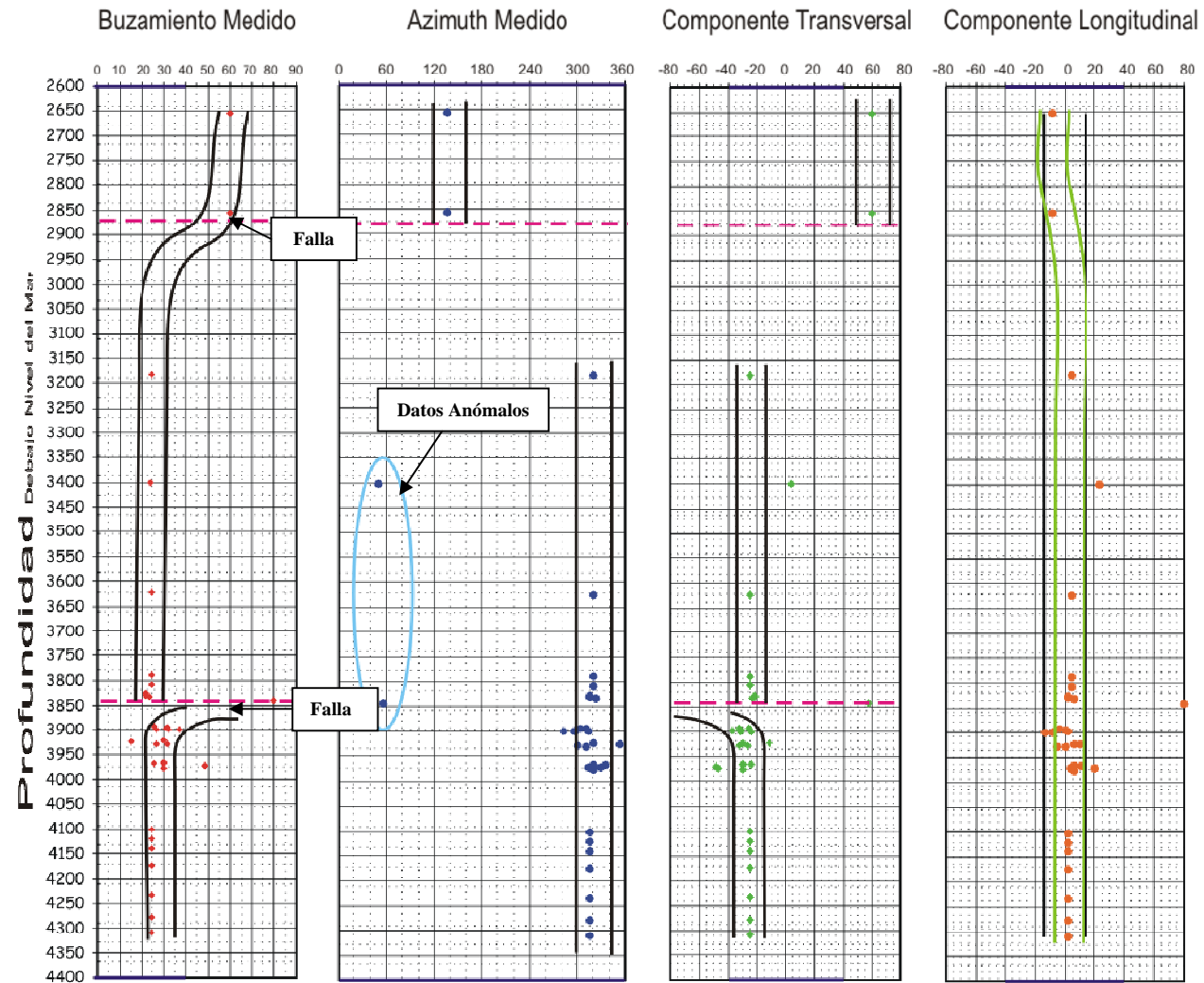


Figura 70. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos medidos correspondientes a la estructura de Floreña y Pauto en el pozo Floreña 5.

Los buzamientos longitudinales calculados pasan W a E a una profundidad de -2850 m. Después de esta profundidad los datos se alinean alrededor de los 5°. El anterior comportamiento señala un doble cabeceo de la estructura de Floreña y adicionalmente una dirección longitudinal de la estructura de 40° y una transversal de 130°. La Figura 71 muestra una vista en planta de estas direcciones. La magnitud del cabeceo determinado con éste gráfico es de 12°.

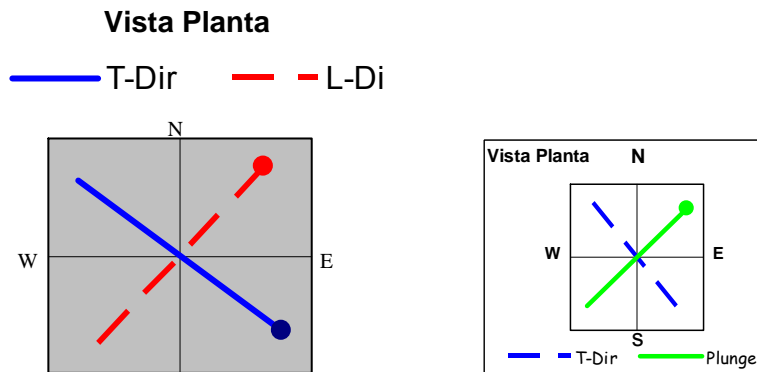


Figura 71. Izquierda, vista planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura de Floreña. Derecha, vista en planta de la dirección de cabeceo y dirección transversal a la misma.

En el segundo grupo de gráficas, dentro de las que se encuentra el diagrama DVA (Dip Versus Azimuth display, Buzamiento versus Azimuth) y el diagrama de polos; se puede evidenciar que los diferentes datos medidos corresponden a uno de los flancos de la estructura atravesada. Dicho flanco es aquel cuyo rumbo es N47°W. Adicionalmente se determina la dirección del eje de la estructura y el cabeceo del mismo, N48°E y 1° respectivamente (Figura 72). Teniendo en cuenta los resultados anteriores, el segmento de la estructura de Floreña en el pozo Floreña 5 presenta un cabeceo que va de 1° a 12°.

La Figura 73 muestra una recopilación de los diferentes rasgos estructurales identificados con ayuda del SCAT Analysis en relación con la sección preexistente. Cabe destacar que estos rasgos ya estaban identificados en trabajos anteriores.

El segundo aspecto analizado para la realización de esta sección es la línea sísmica asociada. De manera general en la sísmica se puede identificar fácilmente las estructuras más someras al igual que en las secciones anteriores. El sinclinal de Nunchia, el anticlinal de Monterralo y la estructura anticlinal de El Morro son

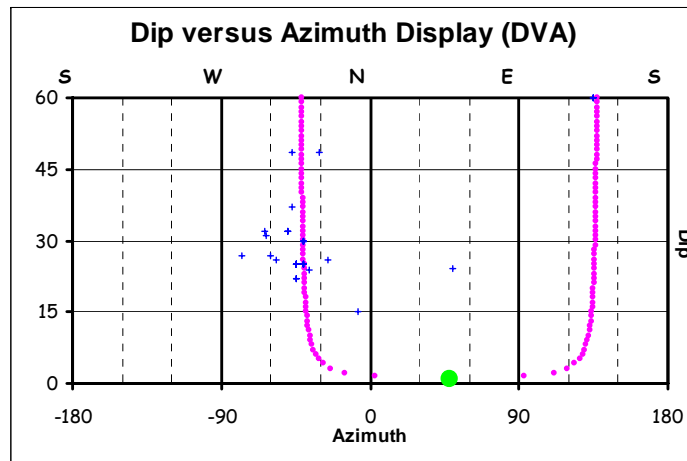
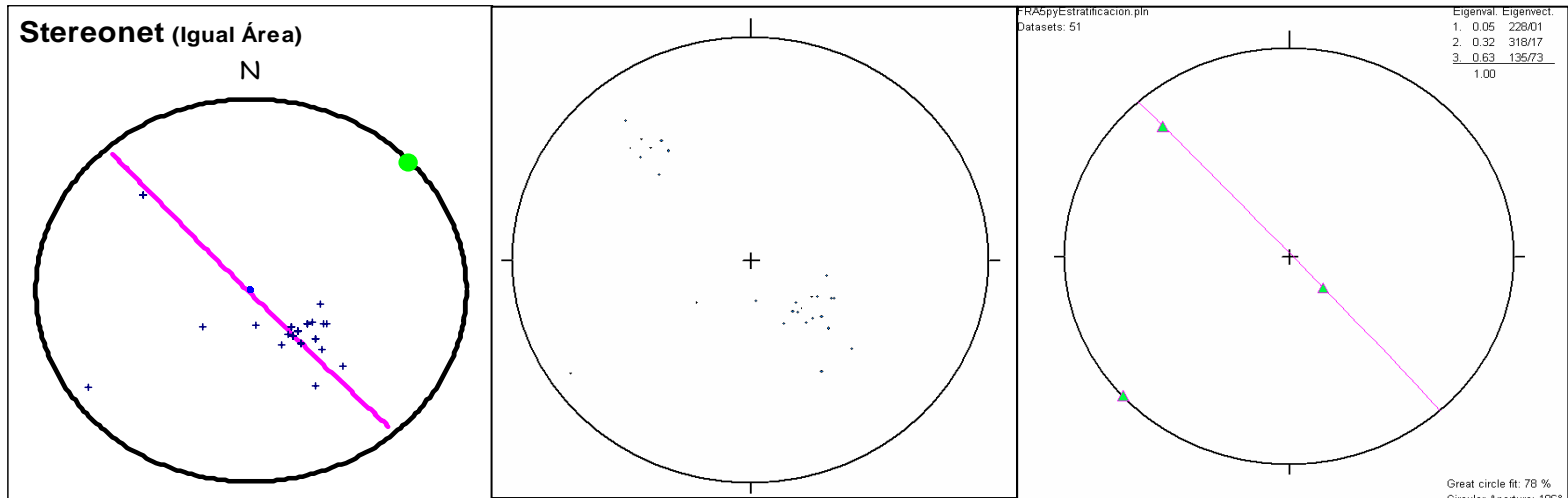


Figura 72. Pozo Floreña 5. Izquierda arriba, diagrama de polos con el plano que mejor representa la dispersión de los datos y el polo del mismo. Dicho polo corresponde al eje de la estructura. Arriba centro, diagrama de polos producto de Tectonics. Arriba derecha, vectores de simetría de los datos. Abajo, diagrama DVA de los datos. Las mediciones corresponden a un solo flanco de la estructura atravesada.

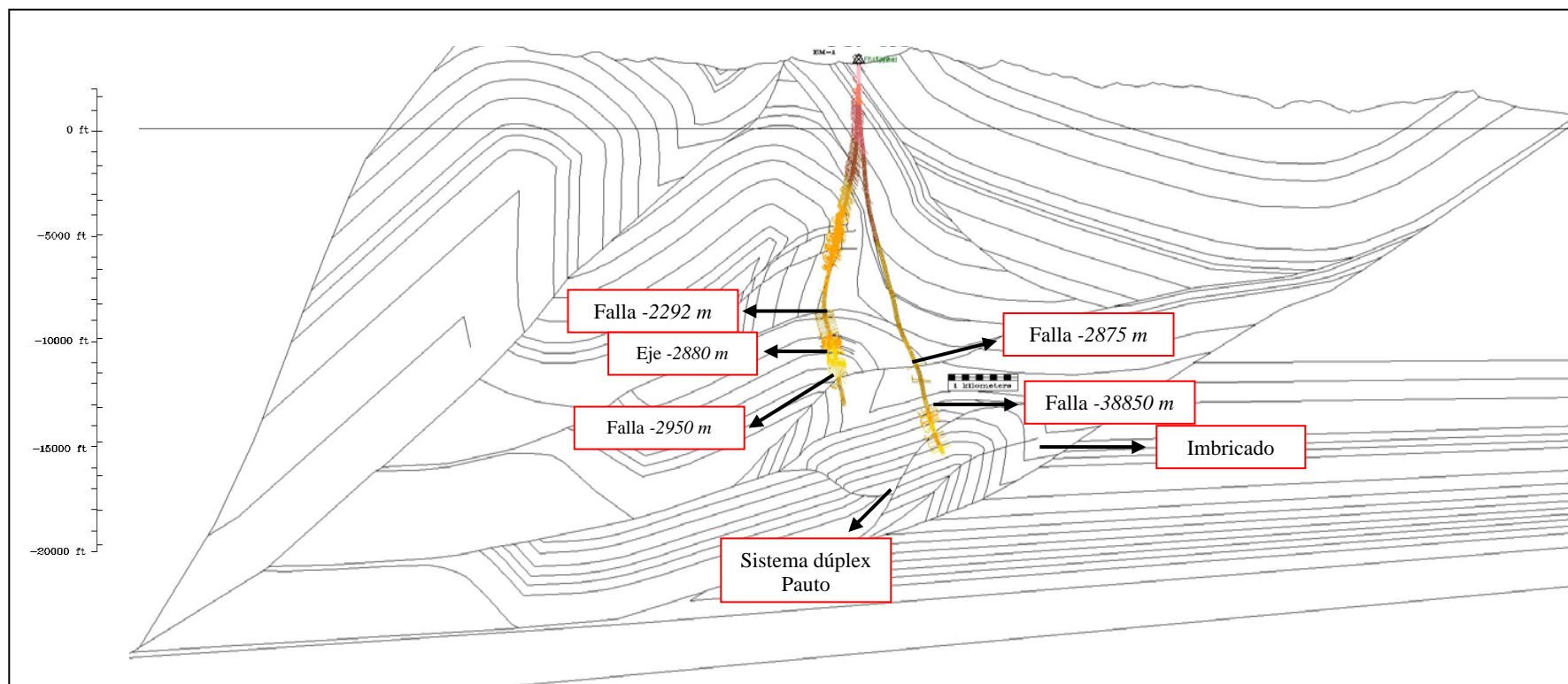


Figura 73. Rasgos estructurales identificados con ayuda del SCAT Analysis y continuidad lateral de estilo estructural para la sección PT-90-379.

identificables con la sísmica (Figura 74). Adicionalmente de estas estructuras, aquellas atravesadas por los pozos pueden ser calibradas con la información del mismo.

Las diferentes fallas asociadas a estas estructuras son también fácilmente identificables en la sísmica. Aquellas más pequeñas, como las asociadas al imbricado del flanco frontal de El Morro pueden ser trazadas con la ayuda de la información del pozo Floreña 1.

El flanco trasero de la estructura de Floreña, la cual se encuentra a una profundidad intermedia puede ser trazado en la línea sísmica sin mayor dificultad. El flanco frontal, el cual no es resuelto satisfactoriamente por la sísmica puede ser trazado con la ayuda de los pozos asociados, al igual que las estructuras anteriores.

En la interpretación sísmica de la estructura de Floreña plantea un anticlinal abierto cuyo flanco trasero presenta un buzamiento suave y que adicionalmente forma un largo *flat* con la falla que genera el pliegue.

A diferencia de las estructuras anteriormente descritas, la de Pauto no es posible de identificar satisfactoriamente en la sísmica. Solamente pequeños segmentos de la estructura son posibles de visualizar. Esta situación es debida a que los buzamientos asociados a la estructura de Pauto son bastante altos, lo que impide su identificación. Adicionalmente a esto, la estructura de Pauto presenta una gran complejidad estructural.

Debido a lo anterior, la interpretación de la estructura de Pauto en la sección estructural tiene como base la información de los pozos y el SCAT Analysis producto de los mismos.

Compilando la información de la línea sísmica y los rasgos estructurales se produce la sección estructural mostrada en la Figura 75. Los diferentes rasgos estructurales identificados en el SCAT Analysis para esta sección ya se encontraban identificados en trabajos anteriores. Por lo anterior en la sección realizada se trata de depurar los rasgos que no presentan una justificación sólida (sísmica o SCAT Analysis). Igualmente se busca ser lo más fiel posible a la información de los pozos. Para la estructura de Pauto, debido a que no es registrada por los pozos a plenitud, su estilo estructural será el mismo al presentado en la sección anterior. Esto tratando de buscar la continuidad lateral de la estructura.

Con respecto a la sección anterior, ésta es bastante similar ya que son bastante próximas. Para esta sección hay una mejor definición de la estructura de Floreña en la parte de su cresta, ya que los dos pozos pasan cerca de ésta, esto hace que la estructura sea de mayor volumen. La cresta entonces presenta una geometría

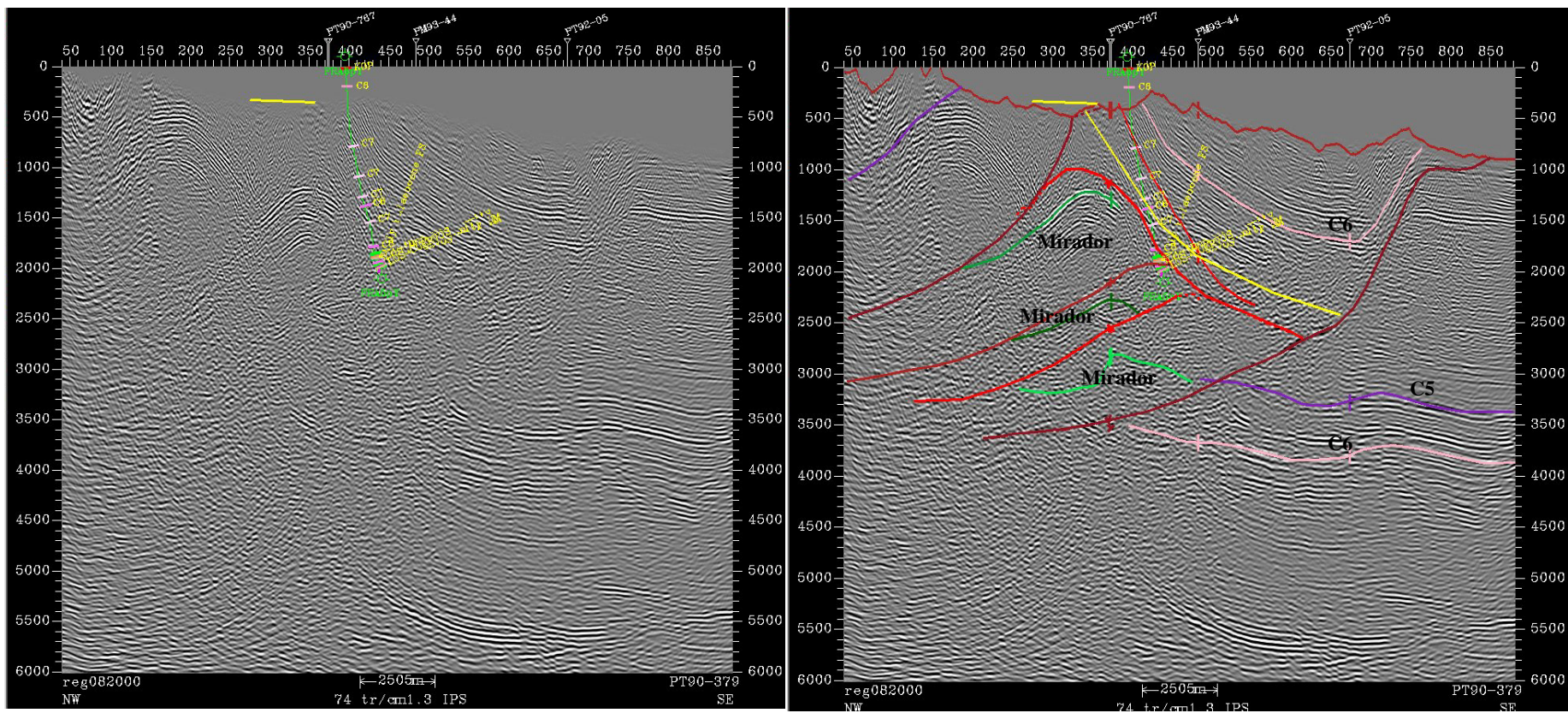


Figura 74. Izquierda, línea sísmica PT-90-379 sin interpretar que corresponde a los pozos de Floreña 1 y Floreña 5. En la línea se muestra la ubicación del pozo Floreña 1. Derecha, interpretación de la línea sísmica PT-90-379. Se muestran las principales fallas. El horizonte identificado en la estructura de El Morro, Floreña y Pauto es el de Mirador.

suave definida por la presencia de varios planos axiales. El flanco frontal de la estructura sigue siendo afectado por una falla que hace que el bloque yacente presente estratos casi verticales. Adicionalmente en este mismo bloque se presenta un segundo fallamiento que permite la repetición del miembro C7 de la formación Carbonera.

El flanco trasero de la estructura de Floreña muestra un buzamiento mayor al que se venía presentando y está formando un *flat* con la falla que genera el pliegue. Dicha falla presenta una flexión sinforme – antiforme que permite la continuación de un sinclinal incipiente en la parte posterior de la estructura de Floreña. Éste sinclinal es también afianzado por el arrastre de la falla de El Morro, con la cual está en contacto.

Para la estructura de Pauto se tiene que persiste la geometría dúplex de tres escamas, donde la segunda es perforada en su cresta por el pozo Floreña 5. El rasgo diferente que se presenta en esta sección para Pauto está en que el miembro C8 de la formación Carbonera presenta una variación lateral de espesor. Hacia la parte NW de la sección este miembro presenta un engrosamiento. Adicionalmente, la estructura de Pauto va disminuyendo su tamaño y está ubicado estructuralmente más profundo dentro de la sección.

Para esta sección, las fallas que afectan tanto la estructura de Floreña como la de Pauto presentan su propagación en el miembro inferior de la formación Guadalupe y en ocasiones en la formación Gachetá. Por último persiste el sistema imbricado debajo de la estructura de Pauto (Figura 75).

La restauración de esta sección se realizó en dos partes. La primera parte asocia las estructuras del anticlinal de Monterralo, El Morro, el sinclinal de Nunchia y la estructura de Floreña. La segunda restauración involucra el sistema dúplex del campo Pauto y el imbricado ubicado debajo de éste.

La restauración de la primera sección muestra un acortamiento del 49% en los estratos deformados. En esta restauración todas, a excepción del miembro C7 de la formación Carbonera presentan una conservación de los espesores. Este comportamiento del C7 hace que el *loose line* de la sección en la zona asociada al C7 se presente un exceso en la misma. Este comportamiento en el miembro C7 es explicado por la falla que pone en contacto el sinclinal de Nunchia con el flanco frontal de la estructura de El Morro (Figura 76).

Un segundo exceso se presenta en el *loose line* a la altura del miembro medio de la formación Guadalupe (M-Guadalupe-Shl). La litología asociada a este miembro es el de shale, lo cual permite, por la ductilidad del mismo, el movimiento por fuera de la sección de parte de la masa asociada. Para este caso se trataría una adición de masa por movimiento en sentido perpendicular a la orientación de la sección. Esto se explica por la componente transcurrente de las fallas principales asociadas a la sección.

La imposibilidad de restaurar este segmento con la estructura dúplex de Pauto radica en las fallas que fueron necesarias de ubicar en el flanco frontal tanto

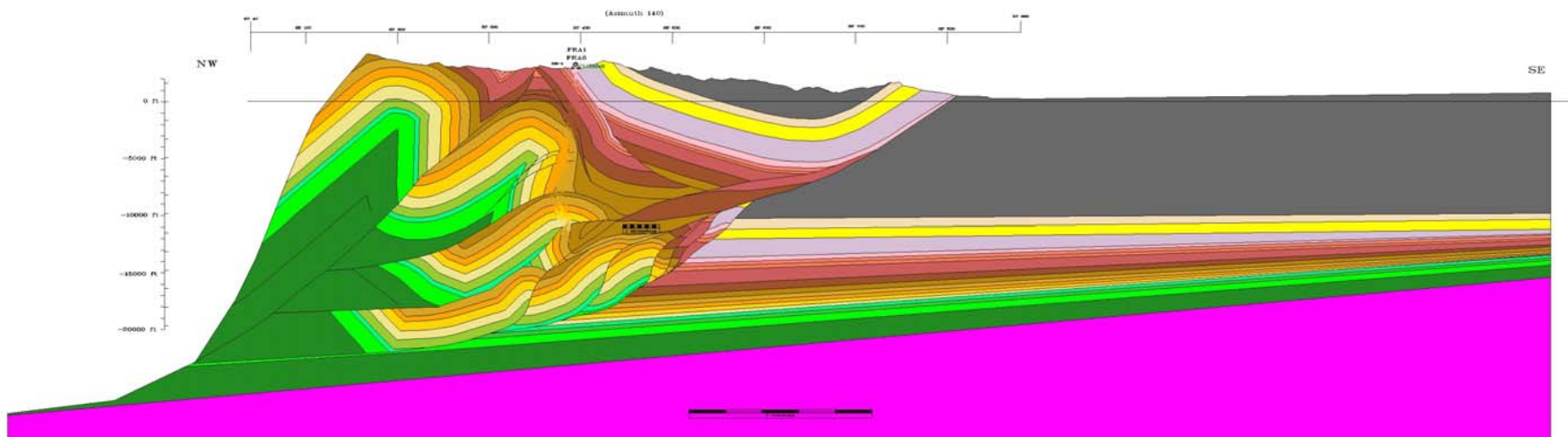


Figura 75. Sección estructural asociada a los pozos Floreña 1 y Floreña 5. Se muestra la ubicación del pozo Floreña 1.

en la estructura de El Morro como en la de Floreña con el fin de justificar la continua repetición del miembro C7 de la formación Carbonera.

La restauración del segundo segmento que corresponde a la estructura del campo Pauto muestra un acortamiento del 16.49%. Este acortamiento muestra que hacia la parte norte la acción de las fallas que afectan a la estructura de Pauto van disminuyendo su acción. Es decir, generan un salto menor que el que se presenta a la parte más sur de la zona.

El *loose line* asociado a este segmento restaurado es aceptable y muestra una tendencia hacia el NW. Este último segmento no es posible de restaurar con el **foreland** por la geometría propuesta para la falla basal que separa la zona deformada de la no deformada (**foreland**). Una redefinición de dicha falla contribuiría a una restauración de este último sector.

4.5 SECCIÓN PM-93-56 – POZO FLOREÑA 3 Y FLOREÑA 3 SIDETRACK

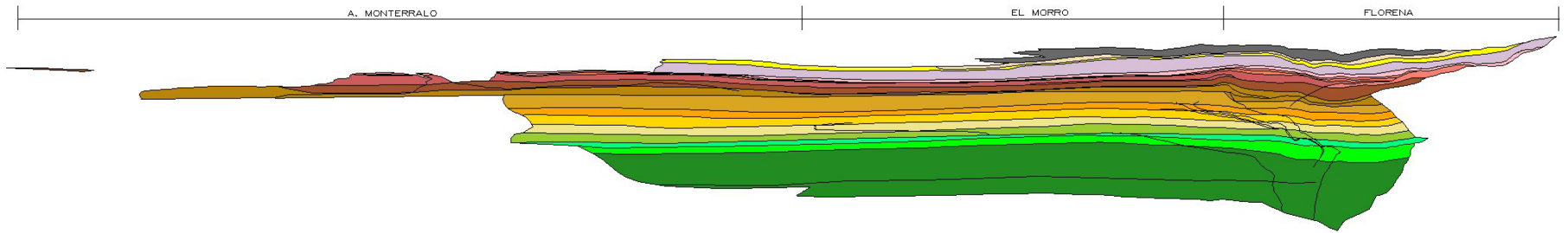
4.5.1 Pozo Floreña 3.

Sección ubicada más hacia el norte de la licencia, en la parte central de la misma. El pozo Floreña 3 es el único de los analizados que presenta un *Sidetrack* (una segunda perforación), por lo que este pozo y su *Sidetrack* serán analizados separadamente. El pozo Floreña 3 tiene como objetivo la cresta de la estructura de Floreña para lo cual define una trayectoria compleja donde el mayor segmento perforado corresponde al imbricado del flanco frontal de El Morro.

Dentro de los elementos identificados se encuentra una falla que pertenece al imbricado del flanco frontal de la estructura de El Morro, lo que explica los altos buzamientos medidos. La segunda estructura hace referencia a la falla de El Morro, la cual debido a la poca cantidad de datos, la determinación de la ubicación exacta de la falla es difícil. Por último, se determina la presencia de un plano axial. Por los valores de buzamientos medidos, se plantea que el pliegue atravesado es de suave a abierto (Figura 77).

La componente longitudinal del buzamiento muestra una magnitud de cabeceo de 15° y una dirección longitudinal de 45° y una transversal de 135°. A la altura de la estructura de Floreña, los datos se alejan levemente de la tendencia de 0° y profundizando regresan nuevamente a estos valores. Este leve movimiento en los datos hace referencia al doble cabeceo indicado en la sección anterior para la estructura. La magnitud del cambio indicaría que el cabeceo secundario hacia el norte de la licencia va perdiendo magnitud.

PRIMER SEGMENTO RESTAURADO



SEGUNDO SEGMENTO RESTAURADO

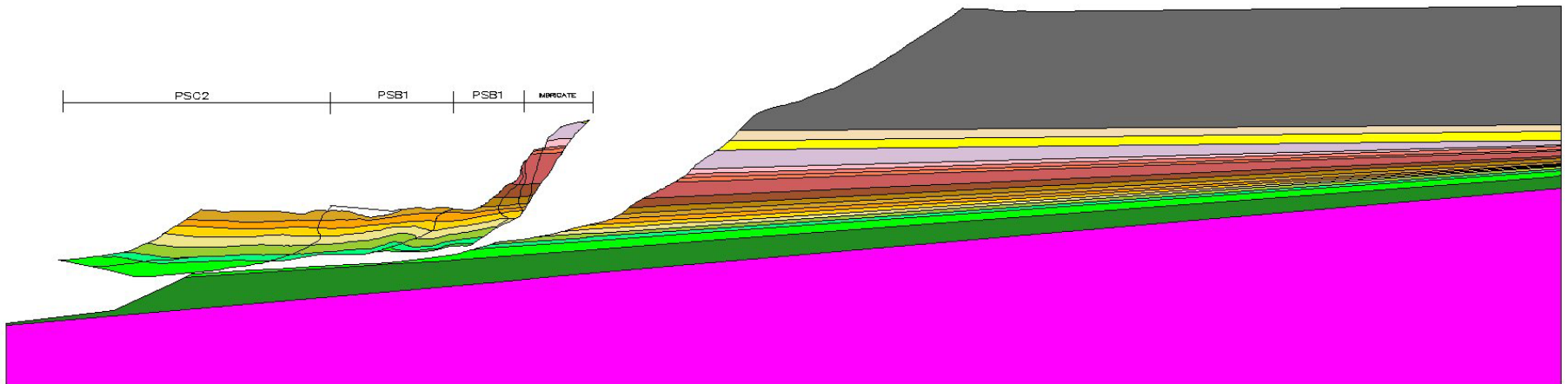


Figura 76. Restauración de la sección estructural asociada a los pozos Floreña 1 y Floreña 2.

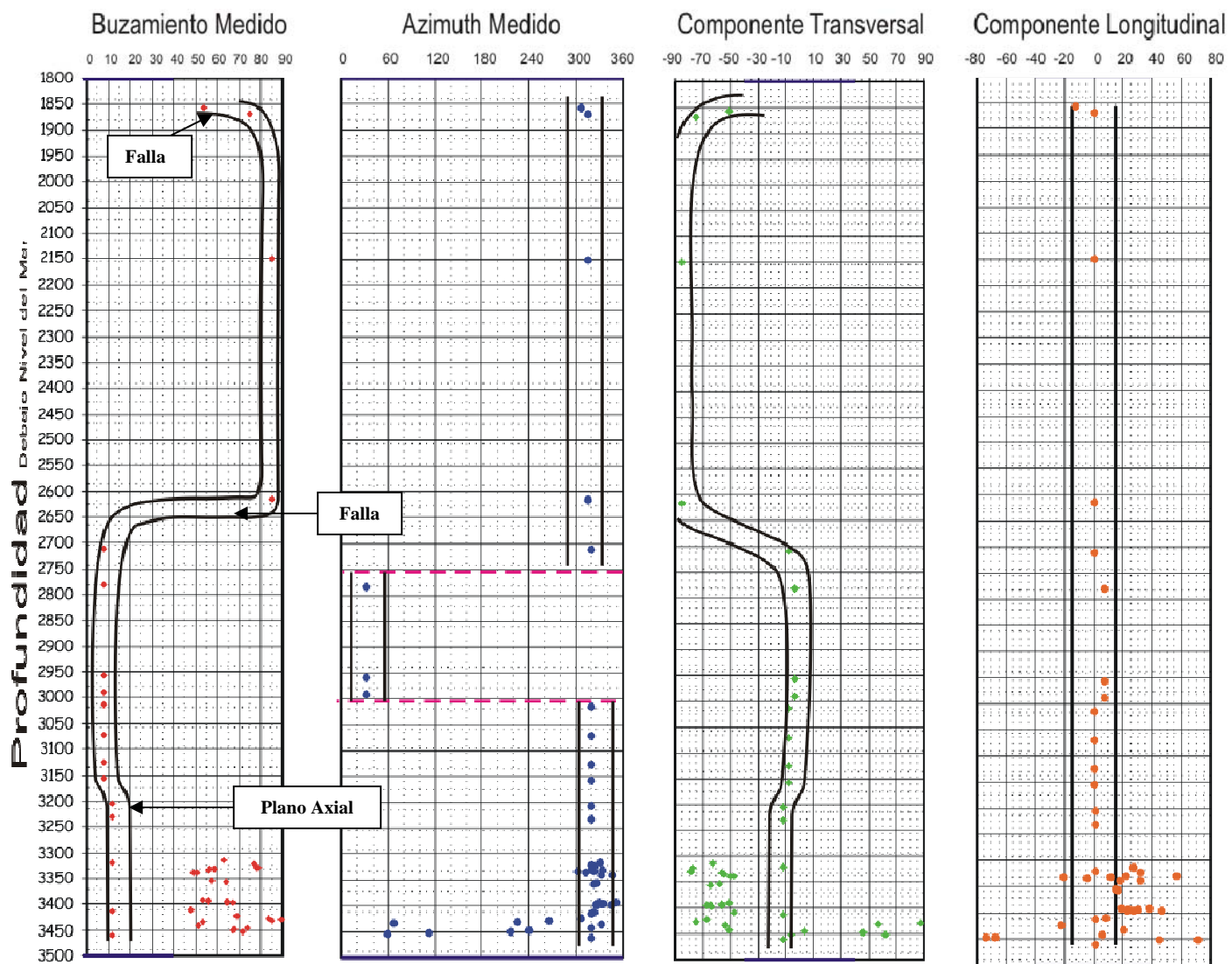


Figura 77. Diagramas producto del SCAT Analysis de los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 3.

La Figura 77 muestra un resumen de las estructuras identificadas y su expresión en las gráficas del SCAT Analysis.

La Figura 78 muestra una vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura. También se presenta la vista en planta de la dirección de cabeceo y la transversal a ésta. Se puede apreciar que la estructura está cabeceando hacia el NE, en la misma dirección de rumbo de la estructura.

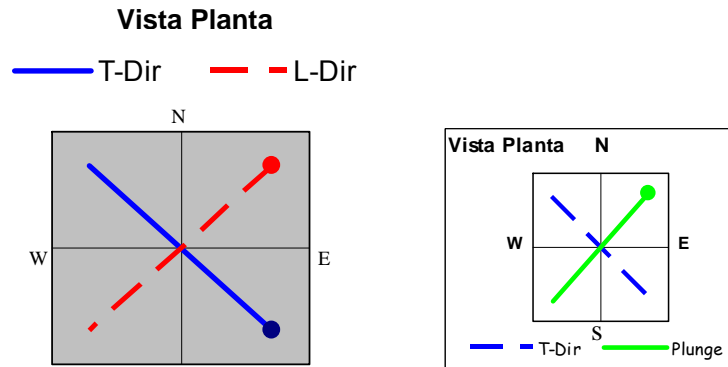


Figura 78. Izquierda, vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura atravesada por la trayectoria del pozo. Derecha, dirección de cabeceo y dirección transversal a la misma.

El diagrama de DVA (Buzamiento medido versus Azimuth del buzamiento) (Figura 78), muestra que los datos tomados en el pozo corresponden a un mismo flanco, tanto para la estructura de El Morro como para la de Floreña. En esta última los datos están cercanos al eje de la estructura. Algunos datos dispersos pueden ser identificados en este gráfico, los cuales corresponden a facturas asociadas al imbricado de la estructura de El Morro.

El diagrama de polos satisface la gran mayoría de los datos medidos, a excepción de algunas mediciones de buzamientos bajos (Figura 79). El polo del plano que mejor define la dispersión de los datos corresponde al eje de la estructura y al cabeceo del mismo. El diagrama de polos producido por medio de Tectonics muestra que no existen datos que hayan sido obviados en el primer diagrama de polos realizado, por tanto, éste es validado.

4.5.2 Pozo Floreña 3 ST (Sidetrack).

Pozo correspondiente a la parte final del pozo Floreña 3 y que tiene como objetivo la cresta de la estructura de Floreña. De manera general el comportamiento de los datos es bastante homogéneo en las diferentes gráficas.

Para este pozo, sólo dos rangos son identificados: la presencia de mediciones que se asocian con laminación de las unidades atravesadas, ya que presenta un comportamiento similar a los de los estratos que los contienen. Es decir, son

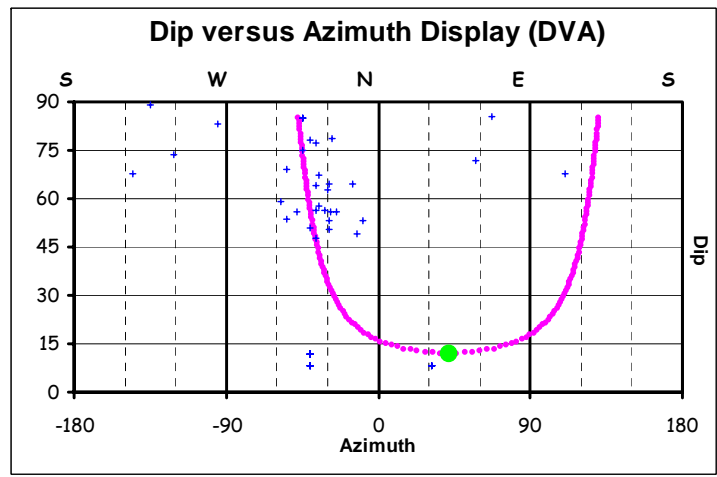
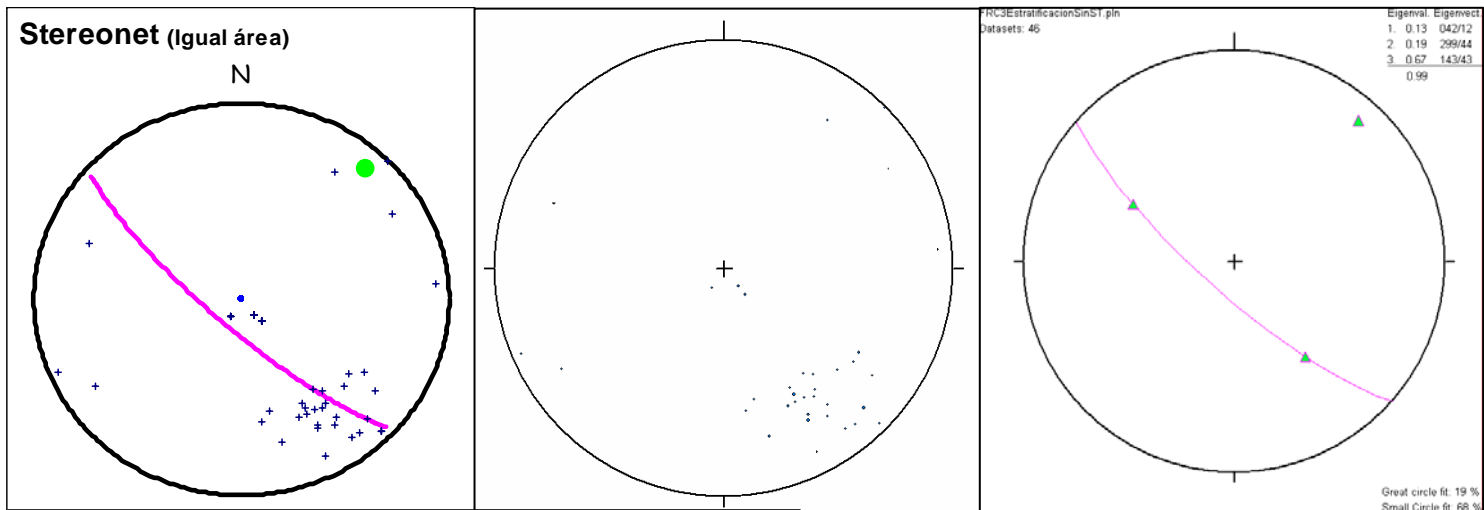


Figura 79. Pozo Floreña 3. Izquierda arriba, Analysis indicando el plano que mejor representa los corresponde al eje de la estructura. Arriba centro, diagrama de polos producido con Tectonics. Arriba derecha, vectores de simetría de los datos. Abajo, Buzamiento versus Azimuth de buzamiento.

diagrama de polos producto del SCAT datos. El polo de dicho plano

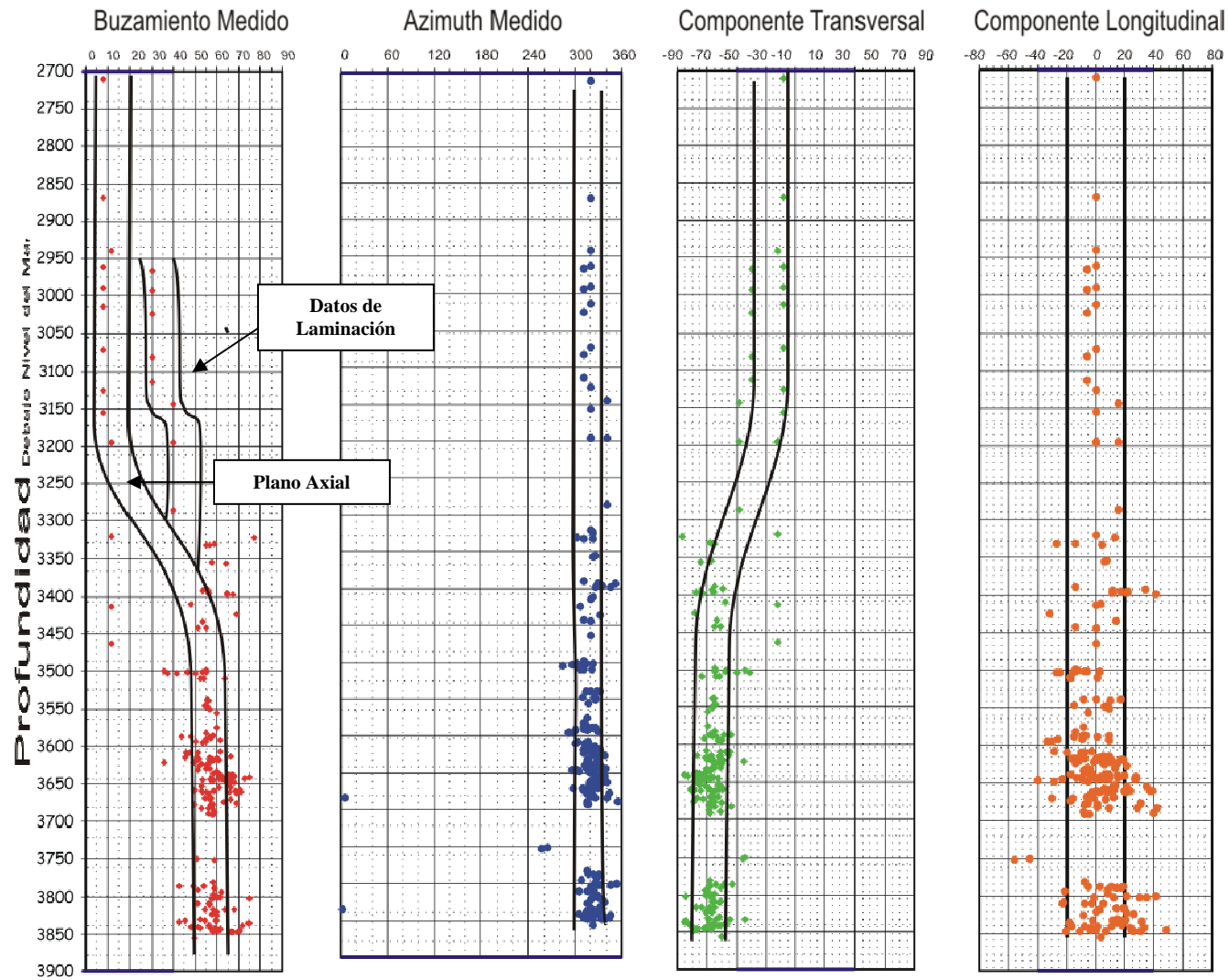


Figura 80. Diagramas producto del SCAT Analysis para los datos correspondientes a la estructura de Floreña en el pozo Floreña 3 Sidetrack.

controlados por rasgos estructurales mayores como fallas y ejes de estructuras. Y un plano axial que pone en contacto dos bandas *kind* dentro de la estructura. Este rasgo insinúa que en este punto la estructura de Floreña comienza a apretarse, lo que implicaría que su flanco frontal aumente de buzamiento. La

Figura 80 muestra un resumen de los rasgos identificados y su expresión en los diagramas del SCAT Analysis.

El buzamiento longitudinal muestra una dispersión bastante alta, pero a pesar de ello los datos permiten determinar una magnitud de cabeceo de 20°. Una dirección longitudinal de 50° y otra transversal de 140°. La Figura 81 muestra una vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura.

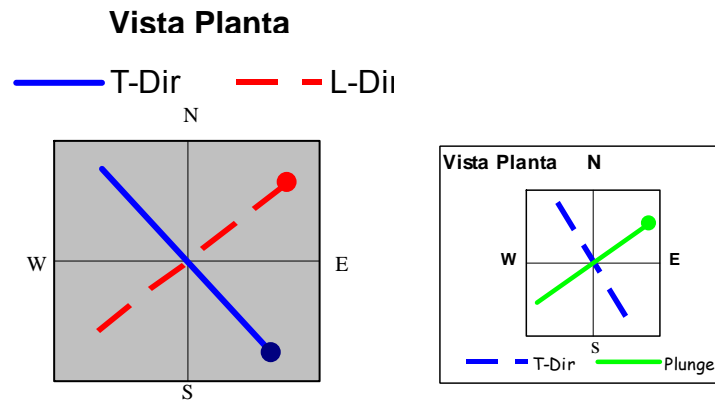


Figura 81. Izquierda, vista en planta de la dirección longitudinal y transversal de la estructura de Floreña. Derecha, dirección de cabeceo de dirección transversal a éste en la estructura de Floreña.

El diagrama de Buzamiento medido versus Azimuth de buzamiento (DVA) muestra que los diferentes datos medidos corresponden a un mismo flanco dentro de la estructura de Floreña. Adicionalmente dichas mediciones se encuentran un poco alejadas del eje de la estructura (Figura 82). Se puede definir el eje de la estructura con un rumbo de N57°E, y una inclinación de 7°. Teniendo en cuenta estos resultados, se tiene que entonces el cabeceo de la estructura está entre 7° y 20°.

El diagrama de polos muestra similar comportamiento, la centralización de los datos en los valores de buzamiento de medio a alto, alrededor de los 40°. Esto debido a que la mayor densidad de mediciones se encuentra en la parte final de la perforación, donde los datos son altos. Resultado del segundo diagrama de polos muestra que no han sido tenidos en cuenta todos los datos en el SCAT Analysis, y por tanto éste es validado. Lo contrario para con los vectores de simetría, que muestran una dirección del eje de la estructura en sentido SW y no NE como en los pozos anteriores. Debido a que los resultados se encuentran sobre la misma

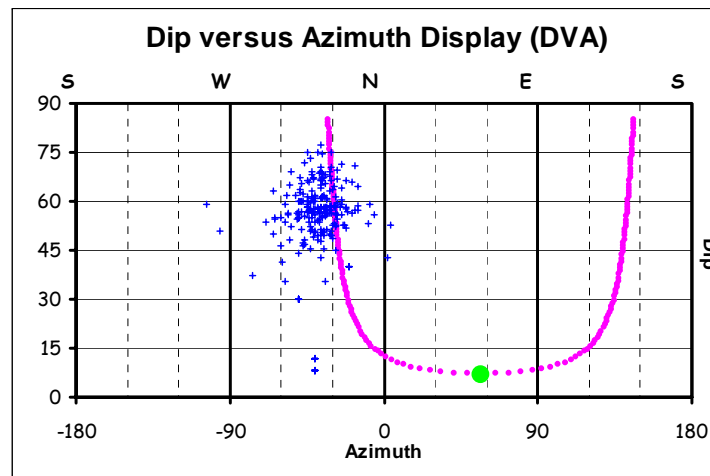
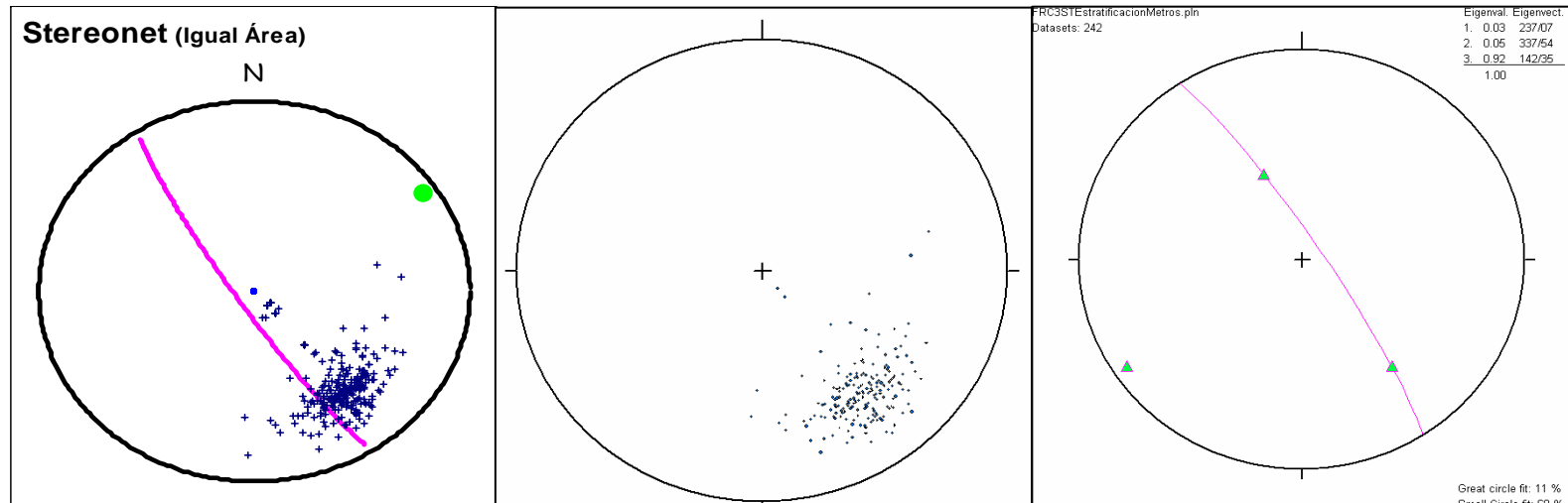


Figura 82. Pozo Floreña 3 Sidetrack. Izquierda arriba, diagrama de polos producto del SCAT Analysis donde se identifica el plano que mejor incluye los datos medidos. Arriba centro, diagrama de polos producido con Tectonics. Arriba derecha, vectores de simetría. Abajo, diagrama DVA. Los datos medidos corresponden a un flanco de la estructura de Floreña.

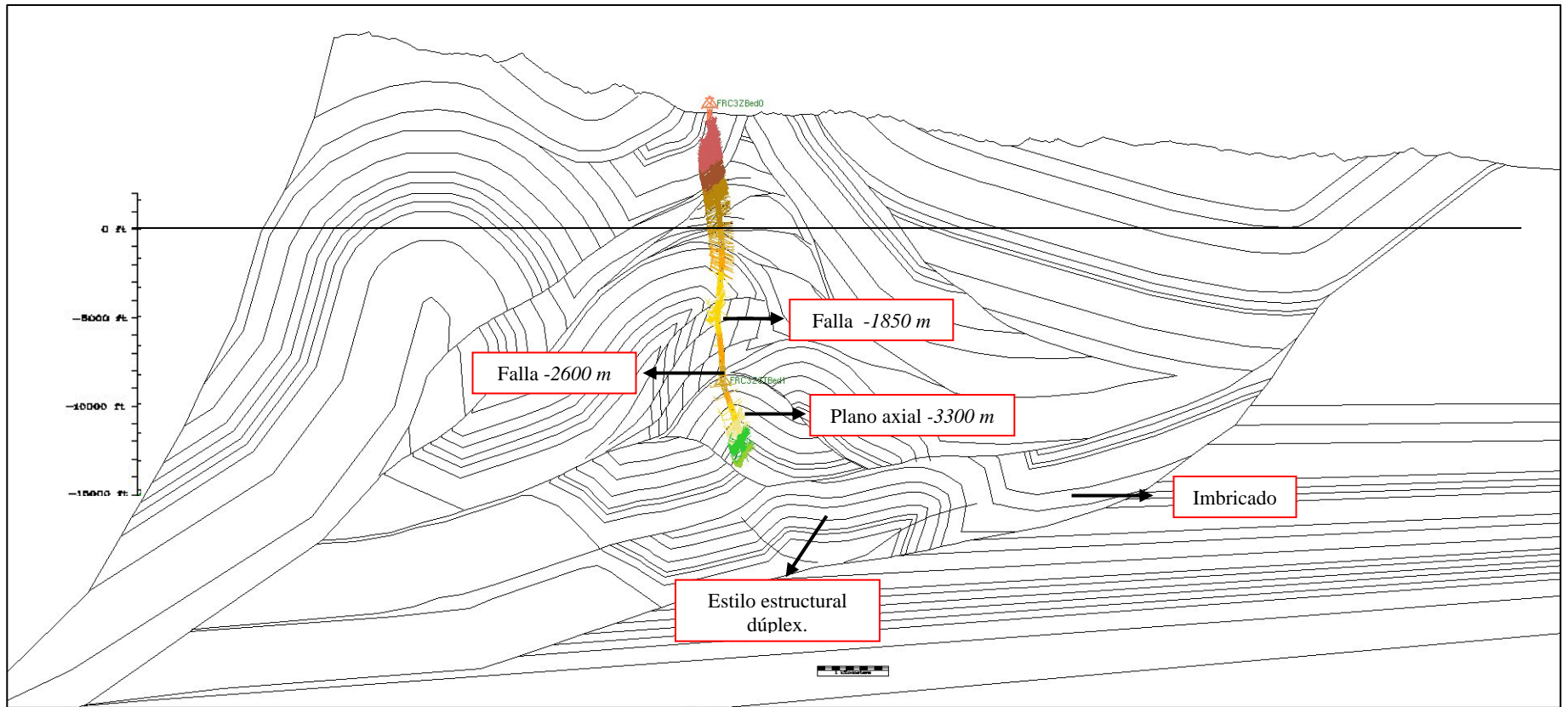


Figura 83. Rasgos estructurales planteados a modificar en la sección. Se muestra el tipo de rasgo y la profandidad a la cual se plantea sea ubicada.

línea de rumbo, la tendencia general será la aceptada para la estructura de Floreña en este pozo. Lo anterior se traduce en una dirección del eje en sentido NE y no SW.

La Figura 83 muestra los diferentes rasgos estructurales identificados en el SCAT Analysis y que se proponen en la interpretación. Debido a que la estructura de Pauto no es perforada por el pozo Floreña 3 ni por su *sidetrack*, el estilo estructural de este campo es desarrollado en esta sección por continuidad lateral con las secciones anteriores. Es decir, se mantiene una estructura tipo dúplex que involucra tres escamas. Igual consideración se hace con el imbricado que marca el paso a la zona no deformada de la sección.

La segunda fuente de información utilizada para la realización de la sección fue la línea sísmica asociada a la misma (Figura 84). Las estructuras presentes en esta línea sísmica son difícilmente identificables, sólo aquellas más someras son distinguibles.

Rasgos como el sinclinal de Nunchia, el **foreland** y el flanco trasero de la estructura de El Morro son posibles de interpretar. La estructura del anticlinal de Monterral en esta sección ya no aflora en superficie, y su identificación en la línea sísmica no es muy clara. Lo anterior debido a que existe un sinclinal ubicado encima del anticlinal mencionado. Dicho sinclinal es identificado en superficie.

La cresta y el flanco frontal de la estructura de El Morro son posibles de interpretar gracias a los datos medidos en el pozo Floreña 3, ya que su trayectoria atraviesa dichos sectores.

Para el caso de la estructura de Floreña, se tiene que al igual que en la sección anterior, sólo el flanco trasero de la estructura se puede identificar. La zona de la cresta puede ser demarcada gracias a la información proveída por el pozo Floreña 3 *sidetrack*. En la interpretación del flanco trasero de Floreña se tiene que éste forma un *flat* tanto con la falla de El Morro como con la falla de Floreña, que genera la estructura de Floreña. En esta estructura no se identifica ningún tipo de falla que la afecte, ya sea tipo *thrust* o *backthrust* (Figura 84).

La estructura de Pauto es interpretada como dos anticlinales unidos por un sinclinal abierto. El flanco trasero del segundo anticlinal forma un *flat* con la falla de Floreña y con la falla basal que genera la estructura de Pauto en alguna medida. Esta interpretación del campo Pauto, debido a la calidad de la sísmica en este sector, no es tenida en cuenta para la sección estructural a realizar. En lugar de esto, se trata de continuar con el mismo estilo estructural dúplex identificado en secciones anteriores.

Recopilando toda esta información, la sección estructural resultante se presenta en la Figura 85. En esta sección se tienen leves cambios en el estilo estructural de las estructuras, relacionados con variaciones en las diferentes

bandas *kind* de las estructuras. En la mayoría de los casos estos cambios se traducen en pliegues más apretados y flancos frontales más buzantes.

Para el anticlinal del Monterral se tiene que ya no aflora en la zona. Por el contrario, presenta un fallamiento en su cresta que permite la formación de un sinclinal que si puede ser evidenciado en superficie. La litología asociada a dicha estructura es del Cretácico Inferior, es la primera aparición de estas unidades en la zona, en sentido S –N.

La estructura de El Morro disminuye bastante de tamaño, por lo que se presenta más apretado. Adicionalmente, el característico sistema imbricado de su flanco frontal presenta inversión de las unidades. Un segundo sistema imbricado aparece en la cresta de El Morro, lo que permite la constante repetición del miembro C7 de la formación Carbonera.

Para la estructura de Floreña se tiene que el flanco trasero de su estructura anticlinal ya no forma un *flat* prolongado con la falla que genera la estructura. Por el contrario, se acentúa más la geometría se un sinclinal en la parte posterior del campo. La estructura anticlinal que define el campo de Floreña muestra una geometría más simétrica y amplia en comparación con la sección anterior.

Las estructuras de Pauto presentan la misma configuración, heredada de la sección anterior. La única diferencia radica en que los anticlinales están ahora más profundamente ubicados y tiene un tamaño mucho menor. Los flancos traseros de dichos anticlinales siguen formando *flats*, con las fallas que definen el estilo. También se presentan incipientes sinclinales producto del arrastre de dichas fallas. Persiste el sistema imbricado en la parte inferior deformada de la sección.

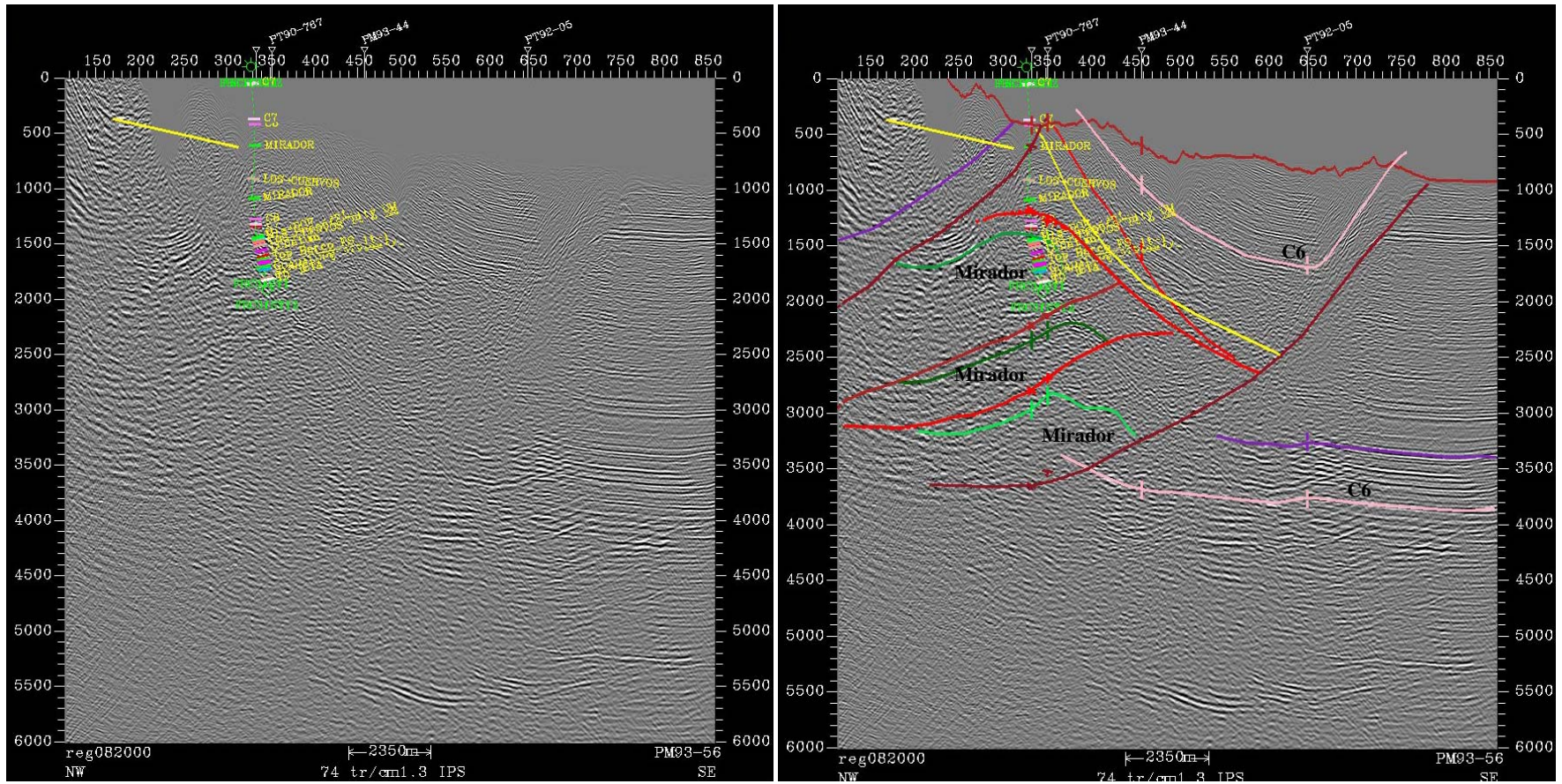


Figura 84. Izquierda, línea sísmica PM-93-56, asociada a los pozos de Floreña 3 y floreña 3 Sidetrack. Derecha, interpretación de la línea sísmica de la izquierda. Se identifican los principales horizontes y fallas.

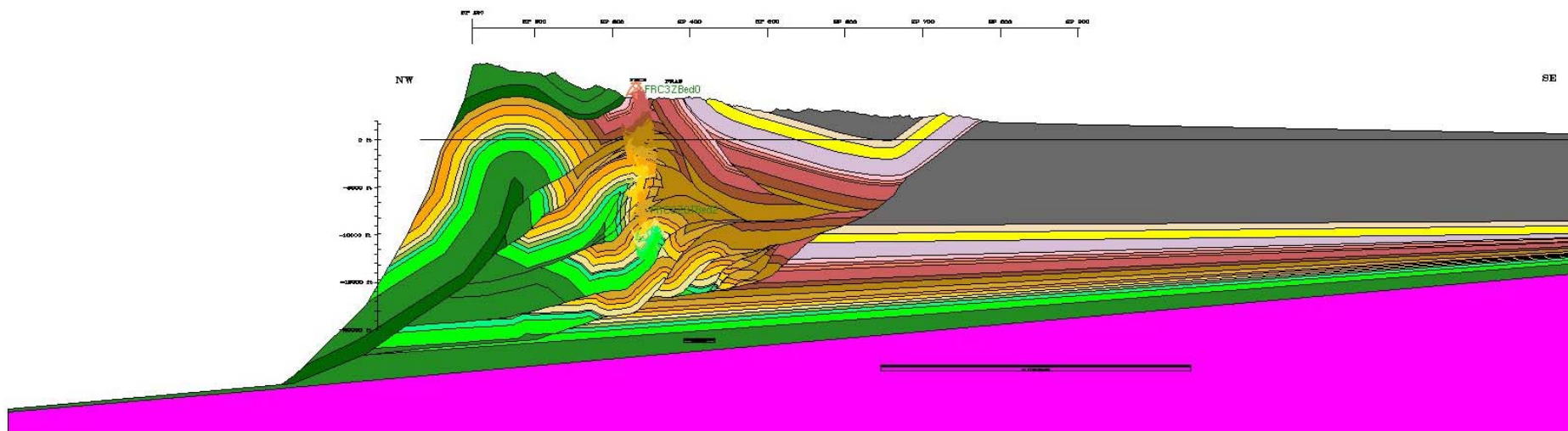


Figura 85. Sección estructural asociada a los pozos Floreña 3 y Floreña 3 Sidetrack.

5. CONVERSIONES PROFUNDIDAD – TIEMPO DE LAS SECCIONES REALIZADAS

Las conversiones Profundidad – Tiempo realizadas tiene como objetivo evaluar el modelo de velocidades que se tiene para la licencia de Piedemonte y que se utiliza con el fin de hacer las conversiones de las líneas sísmicas de Tiempo a Profundidad. Lo anterior con el fin de ser calibradas con los datos de los pozos asociados, los cuales presentan información en profundidad y no en tiempo.

El modelo de velocidades utilizado fue desarrollado por sectores para la zona, debido a que los cambios en velocidad no son constantes y tampoco las diferentes formaciones tienen un valor de velocidad constante. Entonces, para tratar de reproducir dichos cambios en las velocidades, se definió zonas en profundidad. Dichas zonas son definidas por fallas y en algunos casos por litología⁷. La Figura 86 muestra las diferentes regiones seleccionadas para la definición del *voxel* (grilla) de velocidades de la licencia de Piedemonte.

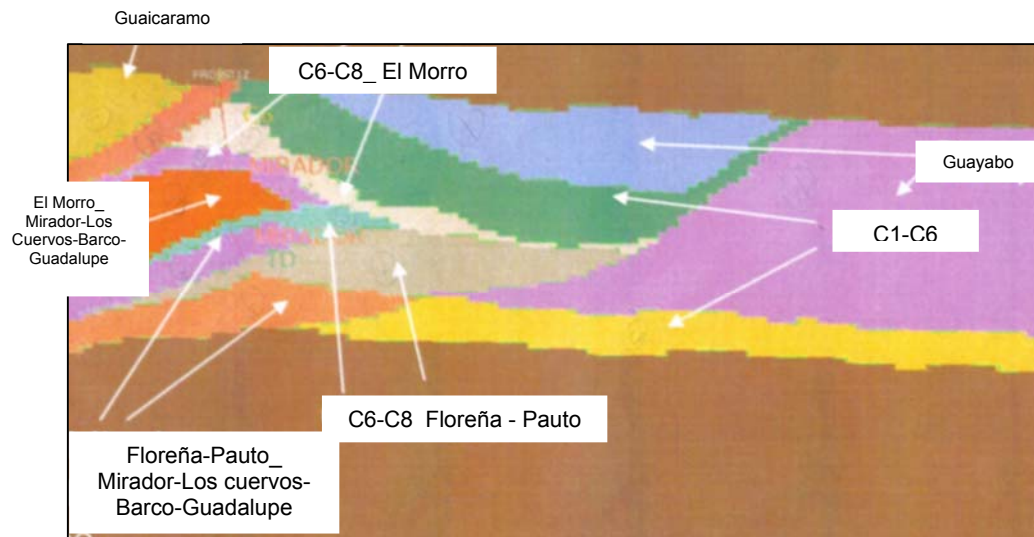


Figura 86. Regiones definidas en la grilla para la generación de velocidades calculadas para cada una. Tomado de Dueñas, 2006.

Con la grilla de velocidades asociadas al TWT, se procedió a hacer la conversión de la misma a profundidad. Es decir, las velocidades fueron recalculadas con el fin de ubicar cada grupo de velocidades con la profundidad asociada. Esta conversión se verificó con la ayuda de los pozos utilizados, cuyos marcadores se encuentran en profundidad.

⁷ Modelo de velocidades realizado por Dueñas, C. 2006.

Luego de tener la grilla de velocidades en profundidad, se procede a la conversión de las diferentes secciones de profundidad a tiempo. Esto se realiza con la ayuda del Módulo de Velocidades del software Gocad 2.1.5. Los horizontes convertidos son aquellos identificados en las secciones sísmicas mostradas en el Capítulo 4, al igual que las fallas. Los topes de las formaciones no identificadas en la sísmica no son convertidos ya que posteriormente no se contará con un patrón de comparación, como es la sísmica.

Las conversiones realizadas fueron entonces comparadas con las interpretaciones de las líneas sísmicas, tanto cualitativa como cuantitativamente. A continuación se muestra los resultados de dichas conversiones y su comparación con la sísmica.

5.1 COMPARACIÓN CUALITATIVA DE LAS CONVERSIONES PROFUNDIDAD – TIEMPO DE CADA SECCIÓN

Las comparaciones cualitativas tienen como objetivo mirar cómo cambia la geometría de la sección al ser convertida a tiempo y la semejanza de dicha conversión con la interpretación sísmica existente.

5.1.1 Sección RC-93-04. Pozos Dele 1, Volcanera 1 y Voclanera 2.

La comparación de la conversión con la sección estructural realizada muestra que para la estructura de El Morro, el flanco trasero del mismo presenta un buzamiento más suave a definido en la sección estructural (Figura 87). Adicionalmente, la cresta de dicha estructura se presenta más abierta que lo definida previamente en la sección.

Las estructuras del campo Pauto conservan su geometría, tanto en buzamientos como en abertura de las mismas. De igual manera, las fallas asociadas a la estructura de Pauto conservan su geometría. Situación contraria sucede con la falla que genera el anticlinal de Monterral, ya que en la conversión muestra un buzamiento mayor a descrito en la sección estructural.

Comparando ahora la conversión Profundidad – Tiempo con la interpretación sísmica, se tiene que la estructura de El Morro se muestra más abierto en la primera (Figura 87 y Figura 41). Para el caso del flanco trasero, se tiene que el buzamiento de la conversión es el mismo al mostrado en la interpretación sísmica.

La interpretación de la estructura de Pauto se tiene que la geometría de las fallas se mantiene. Adicionalmente existen grandes diferencias entre la sísmica

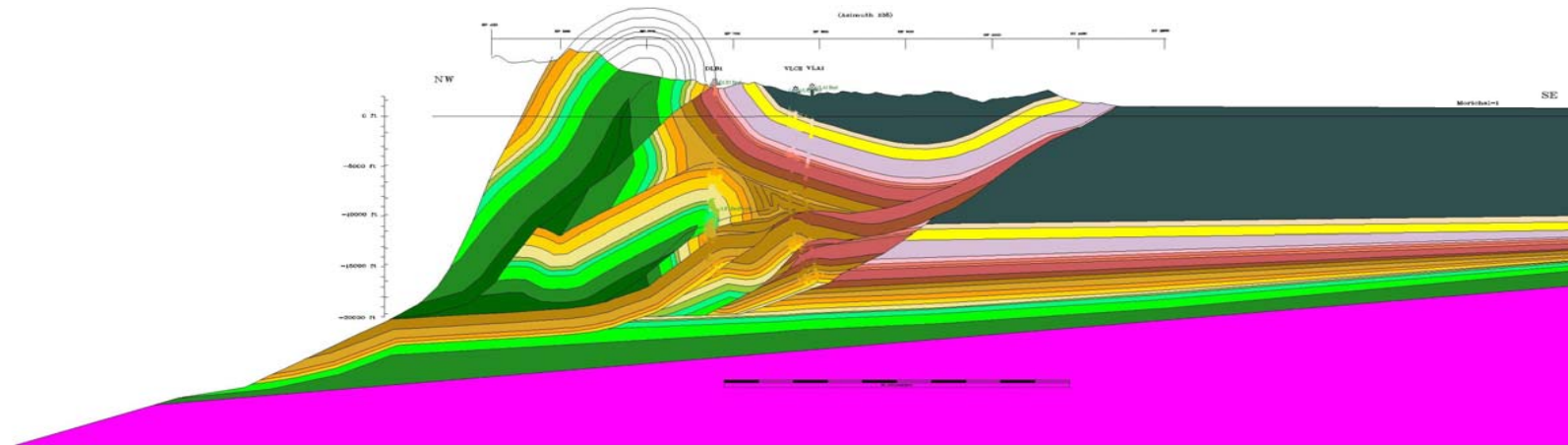
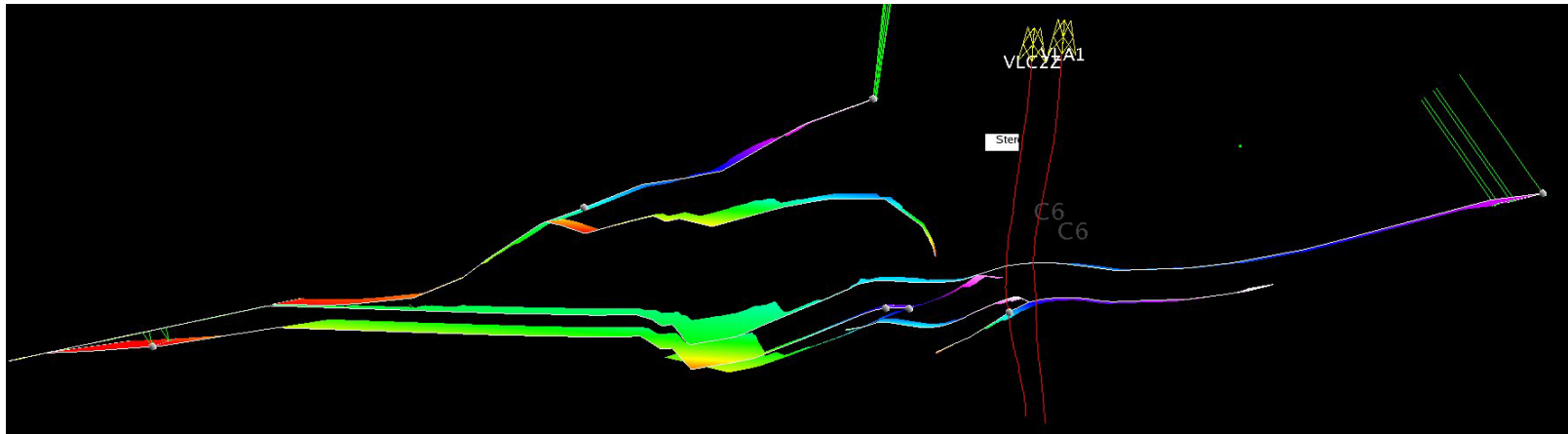


Figura 87. Arriba, conversión profundidad – tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Abajo, sección estructural en profundidad.

y la conversión, ya que ésta no se tomo como base para la realización de la sección estructural para esta estructura.

5.1.2 Sección PT-92-01. Pozos Pauto Sur 1, Pauto Sur 2 y Pauto Sur 3.

La conversión de los horizontes y fallas de esta sección muestran en la parte izquierda de la sección datos anómalos de velocidad, evidenciados por geometrías abultadas en las fallas convertidas. Lo anterior tiene su justificación en el hecho que la grilla de velocidades utilizada presenta hacia este sector unas dimensiones menores a la de la sección estructural. Debido a ello el software extrapola los datos generando estas anomalías.

La conversión de Profundidad a Tiempo de los horizontes interpretados muestra que para la estructura de Pauto se mantiene la forma de las estructuras. Tanto en la geometría como en el buzamiento de las estructuras. Igual situación se presenta con las fallas asociadas a la estructura del campo Pauto (Figura 88).

Para el caso de la estructura de El Morro, el anticlinal se presenta más amplio de lo mostrado en la sección estructural, pero dicha amplitud coincide con la interpretación sísmica (Figura 88 y Figura 56).

Comparando la línea sísmica con la conversión se tiene, como ya se mencionó que ésta es bastante similar en amplitud. La interpretación del horizonte de Mirador en la estructura de El Morro es difusa para la línea sísmica, por lo que la comparación se difícil. A pesar de esto, el flanco trasero de la estructura en la conversión presenta un mayor buzamiento que el interpretado en la sísmica.

Para la estructura de Pauto, se tiene que la interpretación estructural es diferente a la de la sísmica, para la parte posterior de la estructura. En la parte frontal se tiene que la geometría del horizonte de Mirador es la misma a la interpretada en la sísmica. Y los buzamientos son bastante similares.

El horizonte C6, miembro de la formación Carbonera, muestra un buzamiento mayor al mostrado en la sísmica.

5.1.3 Sección PM-93-04. Pozos Floreña 2 y Floreña 4.

En la conversión de Profundidad a Tiempo de esta sección se tiene que la cresta de la estructura de El Morro es más abierta que en la sección estructural. Pero el flanco trasero de la estructura muestra un buzamiento muy similar al de la sección estructural. Lateralmente también la estructura se muestra ahora más amplia (Figura 89).

Para la estructura de Floreña, se tiene que los buzamientos se suavizan levemente. Estos cambios son más evidentes en el flanco frontal de la estructura. Igual situación se presenta en la estructura de Pauto, donde los flancos frontales muestran mayor cambio en el buzamiento, de altos a bajos.

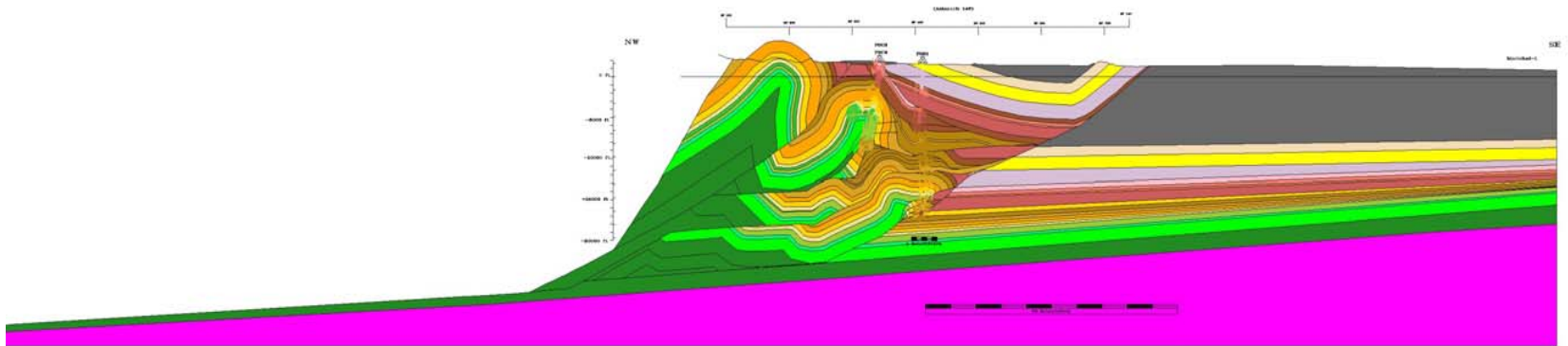
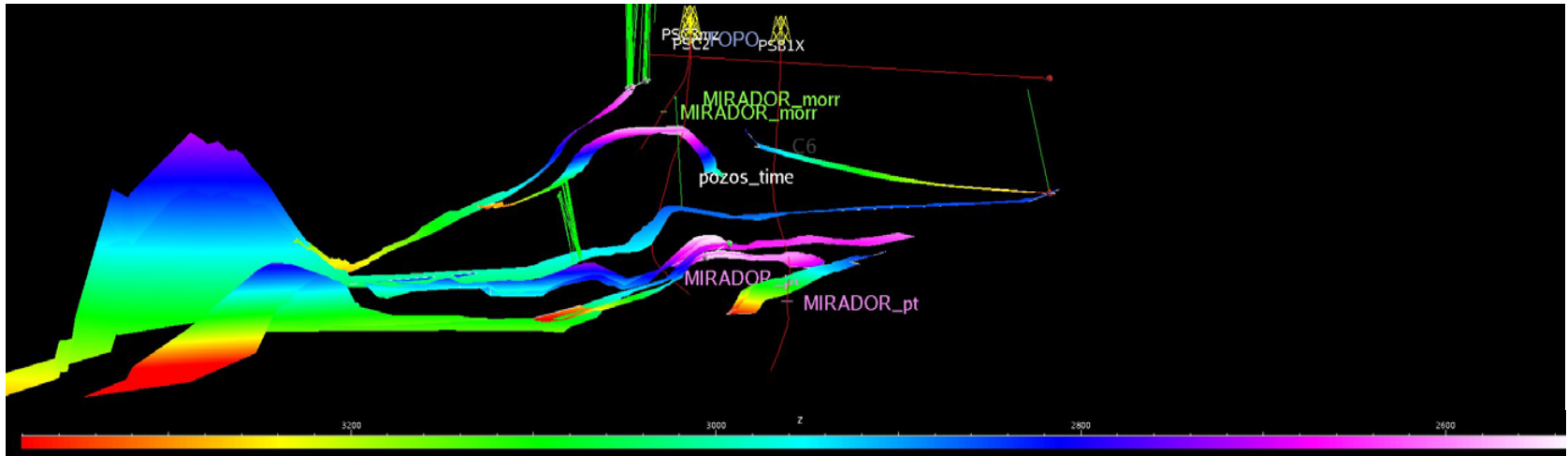


Figura 88. Conversión Profundidad – Tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y de las fallas asociadas. Abajo, sección estructural asociada.

Cabe resaltar que en las diferentes estructuras se mantiene el estilo estructural y el paralelismo de los diferentes horizontes y las relaciones de *flat* y rampa entre las estructuras y las fallas.

Comparando la conversión con la línea sísmica, se tiene que para la estructura de El Morro la geometría es casi la misma a la interpretada. La única diferencia radica que en el flanco trasero de la conversión éste es más largo que en la interpretación sísmica. Para la estructura de Floreña, el pliegue se muestra más abierto en la conversión. El flanco trasero es levemente menos buzante.

La estructura de Pauto de la conversión es diferente a la interpretada en la sísmica por lo explicado en el Capítulo 4.

5.1.4 Sección PT-90-379. Pozos Floreña 1 y Floreña 5.

La sección en convertida muestra un cambio en los flancos traseros de las estructuras, tanto la de El Morro como la de Floreña. Estos flancos pasan a un buzamiento menor al planteado en la sección estructural (Figura 90). Igual situación se presenta comparando la conversión con la interpretación de la línea sísmica (Figura 74).

Adicionalmente las crestas de las estructuras se abren en la conversión a comparación con la sección estructural. Este cambio en amplitud hace que la interpretación sísmica se asemeje más a la conversión en la estructura de El Morro y la de Floreña.

Las interpretaciones sísmicas de la estructura de Pauto no es tomada como base para la sección estructural, por lo que esta estructura no es comparada. La geometría de las fallas es la misma tanto para la sísmica como para la conversión de Profundidad a Tiempo.

5.1.5 Sección PM-93-56. Pozos Floreña 3 y Floreña 3 Sidetrack.

La conversión a tiempo muestra que los horizontes de Mirador disminuyen su buzamiento, especialmente en su flanco trasero. Esto comparando con la sección estructural asociada. Estos cambios son más evidentes en la estructura de El Morro y en la de Floreña (Figura 91).

Las estructuras de Pauto son bastante similares a la sección estructural, especialmente en la escama más hacia el NW de la sección. Las fallas asociadas muestran la misma geometría y la relación *flats* – rampa con las diferentes estructuras.

Con respecto a la interpretación sísmica se tiene que también los pliegues son más abiertos en la conversión que en la sísmica. Pero los flancos traseros de las estructuras muestran el mismo buzamiento en ambo casos.

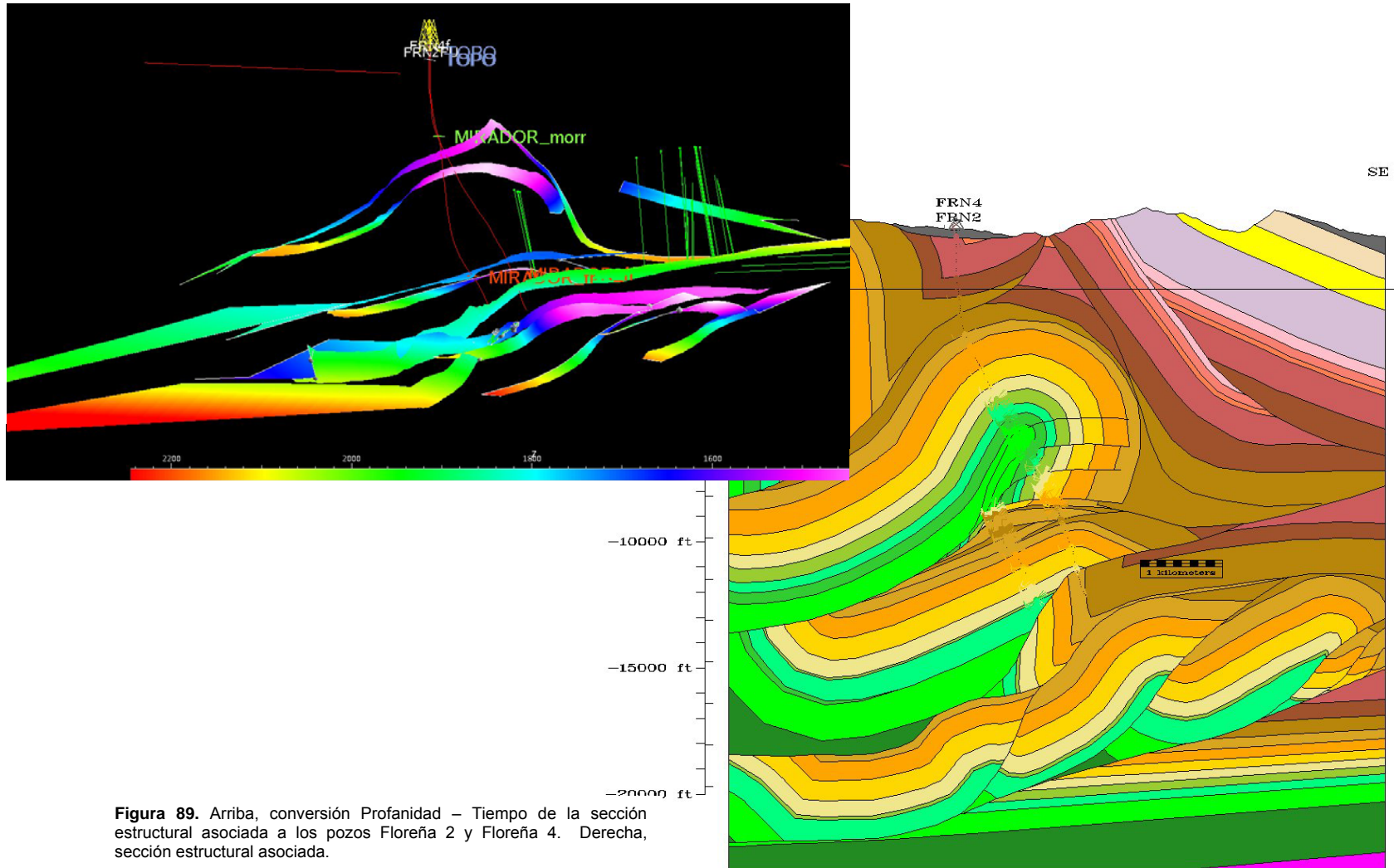


Figura 89. Arriba, conversión Profundidad – Tiempo de la sección estructural asociada a los pozos Floreña 2 y Floreña 4. Derecha, sección estructural asociada.

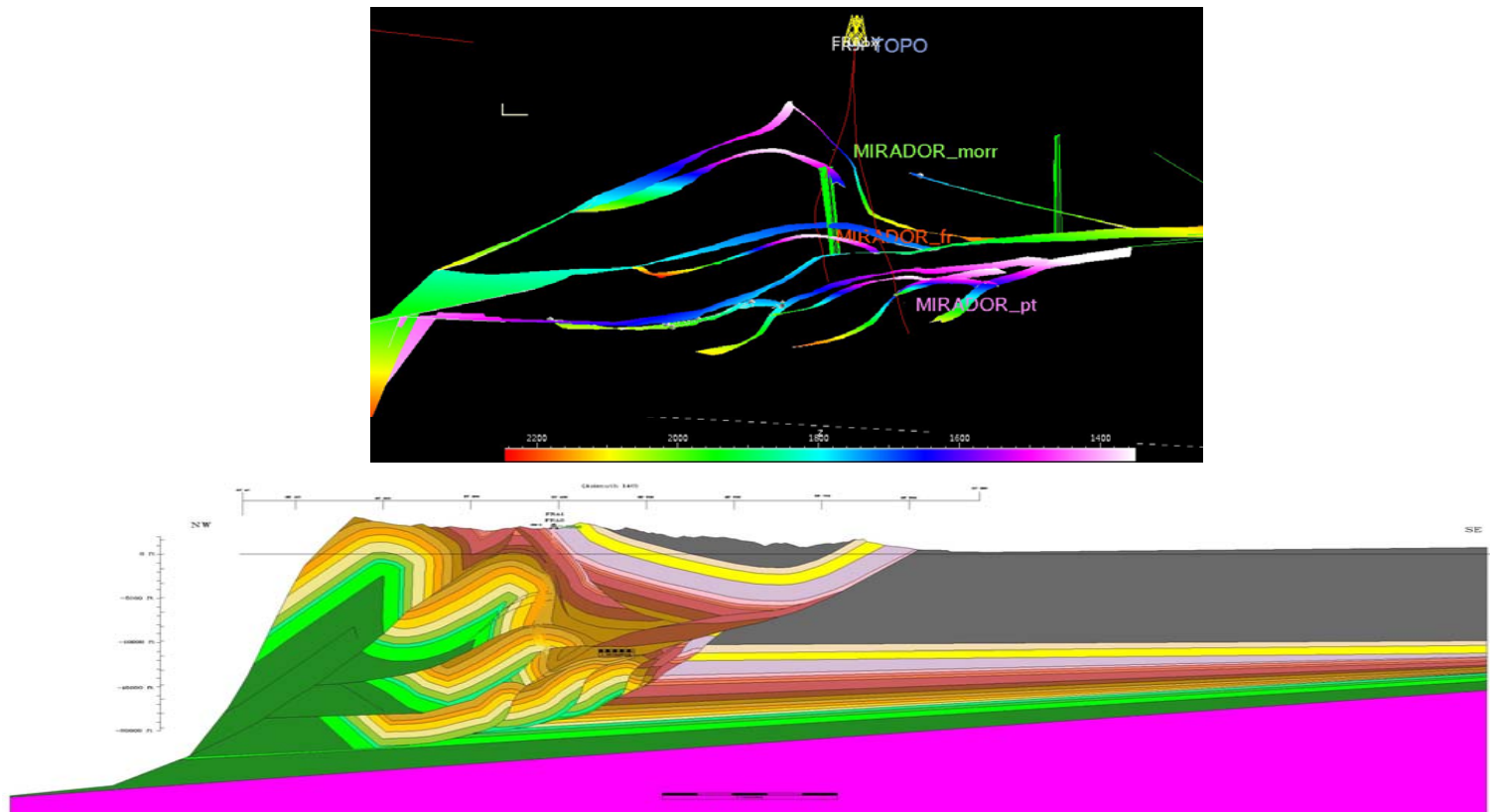


Figura 90. Arriba, conversión Profundidad a Tiempo de los horizontes de Mirador en las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Abajo, sección estructural asociada.

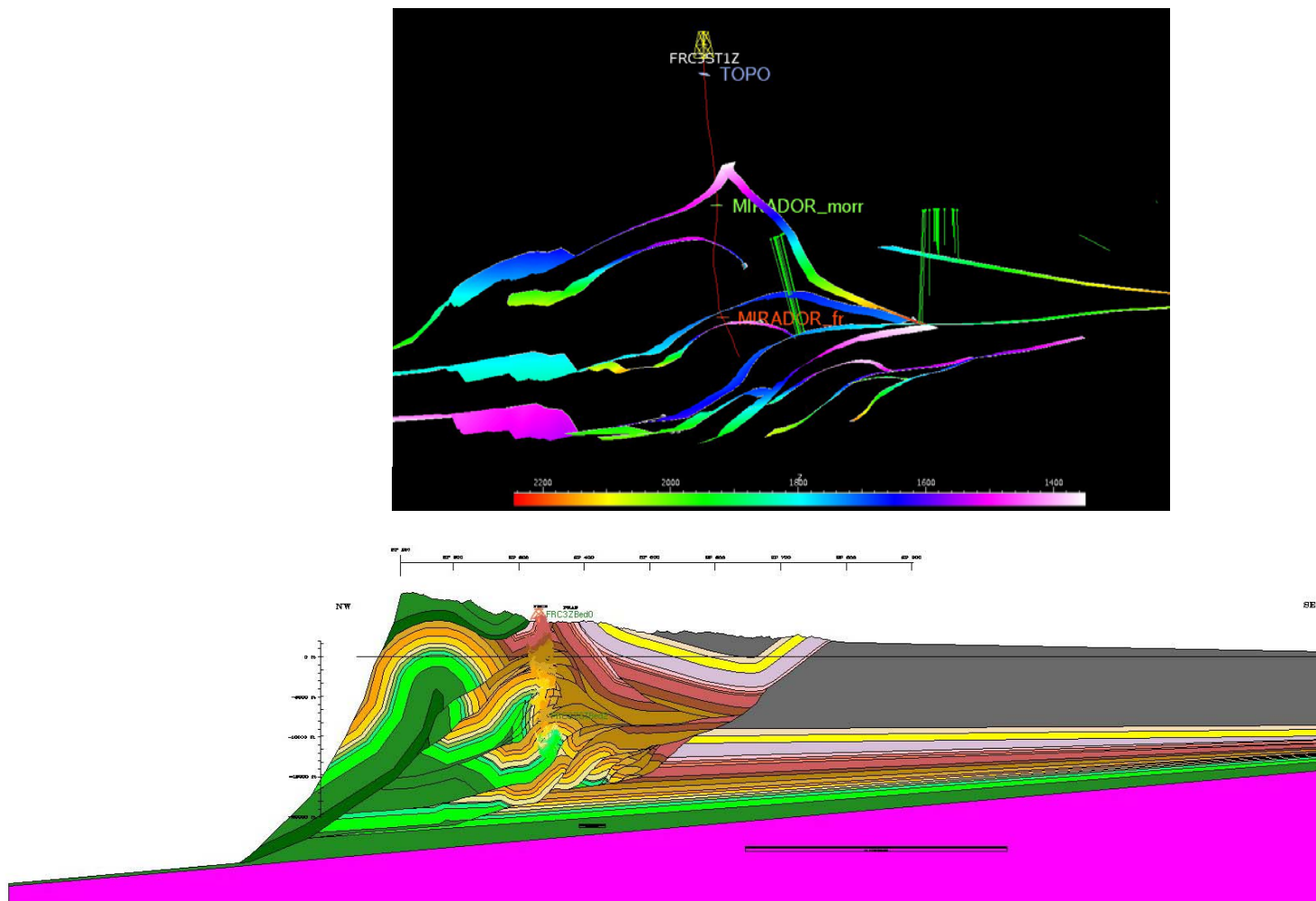


Figura 91. Arriba, conversión Profundidad – Tiempo del horizonte de Mirador para las diferentes estructuras y las fallas asociadas. Abajo, sección estructural asociada.

5.2 COMPARACIÓN CUANTITATIVA DE LAS CONVERSIONES PROFUNDIDAD – TIEMPO DE CADA SECCIÓN

La comparación cuantitativa realizada se hizo con el fin de mirar la discrepancia entre el Tiempo de Doble Tránsito (TWT) calculado con el modelo de velocidades existente y el TWT real medido en cada una de las líneas sísmicas. Lo anterior con el fin de evaluar el modelo de velocidades existente.

En primer lugar, se determinan las zonas donde se presenta la mayor variación en el TWT calculado. Estas zonas son las más profundas y las más someras de las secciones. Para las primeras, el valor de TWT calculado subestima el tiempo real que se presenta en la sísmica. Por el contrario, para las zonas más superficiales, el tiempo calculado es sobreestimado.

Lo anterior produce que la zona media de las secciones constituya el sector donde se presenta la menor discrepancia entre el TWT calculado y el real. Esto se traduce en que las estructuras ubicadas en esta zona presenten la menor variación geométrica al momento de hacer la conversión. Este fenómeno se presenta en estructuras como la de la primera escama de Pauto, y la estructura de Floreña. En la Figura 92 se muestran las estructuras y el promedio en la diferencia de cada una.

Por el contrario, las zonas donde se presenta la mayor variación da como resultado una modificación en la geometría de las estructuras asociadas a estos sectores. Como es el caso de El Morro y las partes superiores de la estructura de Floreña.

Lo anterior sirve como criterio para evaluar la eficacia del el modelo de velocidades existentes. Así, los datos por éste arrojados para las partes centrales en profundidad de las diferentes secciones son aceptables y pueden ser utilizados para conversiones y diferentes interpretaciones. No así, con los valores de velocidad para los extremos, los cuales discrepan considerablemente con la realidad.

Estos sectores entonces son los propuestos a ser modificados en el modelo de velocidades con el fin de ser fiel lo más posible a la realidad.

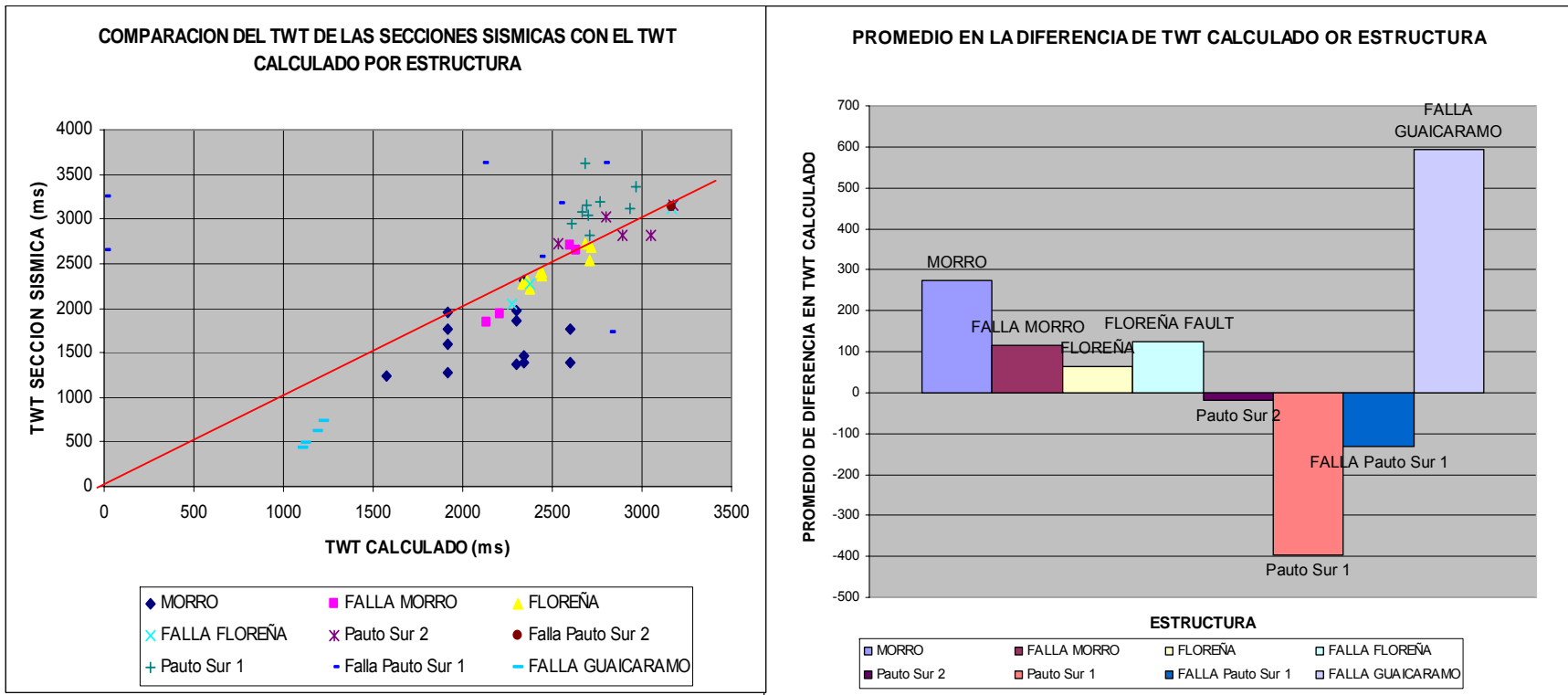


Figura 92. Izquierda, TWT calculado versus TWT de la sísmica. Entre más se alineen los datos con la línea roja, menor será la discrepancia entre el valor calculado y el real. Derecha, promedio en el TWT calculado para cada estructura.

6. MODELO 3D Y MAPA ESTRUCTURAL

El modelo estructural 3D preliminar realizado a la Licencia de Piedemonte fue llevado a cabo con la ayuda del software Gocad 2.1.5, en el cual se trató de representar la continuidad lateral de las estructuras.

La Figura 93 muestra una vista lateral del modelo realizado, en donde la zona visible corresponde a la sección que tiene asociado los campos Dele y Volcanera.

Por otra parte, el mapa estructural realizado tiene como objetivo mostrar en planta la configuración de cada uno de los campos al tope de la formación Mirador (Figura 94).

En el mapa estructural se puede apreciar la continuidad de los campos Dele con la escama del campo Pauto en el pozo Pauto Sur 2; el campo Volcanera con la escama del campo Pauto en el pozo Pauto Sur1. Y cómo el campo Pauto mantiene la continuidad lateral a lo largo de toda la Licencia. Éste campo muestra una posición estructural más alta hacia la parte central de la zona trabajada, exactamente en la zona donde están perforados los pozos Pauto Sur. En este mapa, las zonas más profundas están identificadas con tonos fríos y las más someras por tonos cálidos.

Adicionalmente hacia las partes extremas el campo se encuentra ubicado en una zona más profunda y estructuralmente más baja.

Para el campo Floreña se puede reconocer el punto donde aparece en la zona, así como la falla que genera la estructura. La aparición del campo Floreña y la constitución en sí del mapa estructural evidencian el hecho ya conocido que hacia la parte norte de la zona de Piedemonte, la complejidad estructural aumenta.

Por último, se resalta en el mapa estructural que todas las fallas interpretadas son concordantes con la vergencia regional de las estructuras, y que la configuración de cada uno de los campos es posible con este tipo de fallamiento. Siendo prescindibles fallas tipo *backthrust*. Como era el caso del modelo estructural anterior.

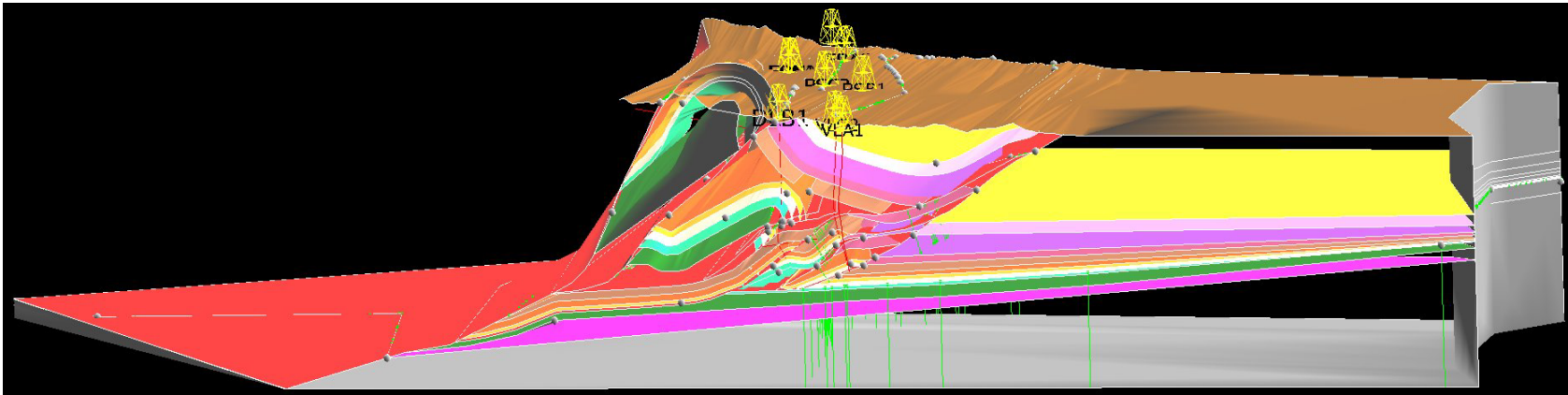


Figura 93. Vista lateral del modelo estructural 3D preliminar realizado para los campos de la Licencia Piedemonte. Se muestra la ubicación de los pozos y los diferentes niveles estratigráficos.

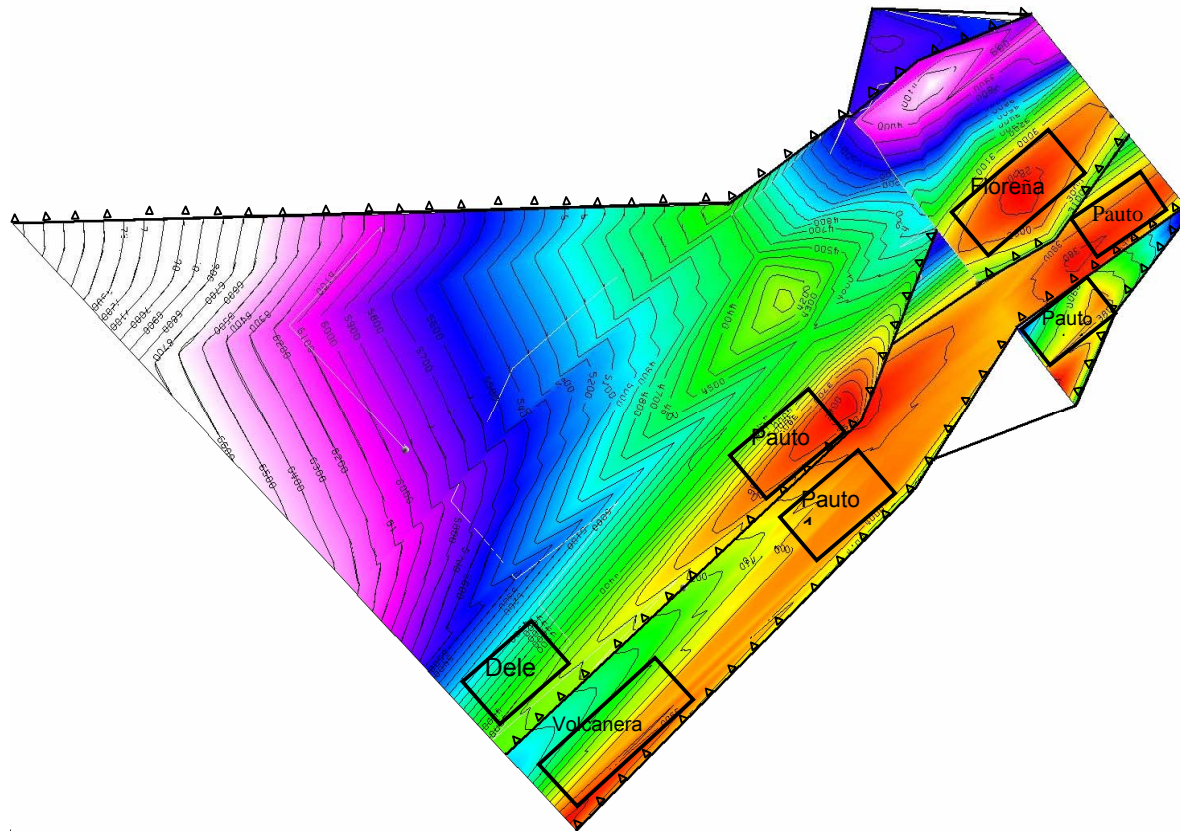


Figura 94. Mapa estructural de los campos de la Licencia Piedemonte al tope de Mirador.

RECOMENDACIONES

De manera general, las recomendaciones listadas a continuación tienen como objetivo un completo balanceo de cada una de las secciones trabajadas, así como la consecución de un modelo estructural 3D riguroso. Este último, que sea fiel en un ciento por ciento a los datos de pozo producidos en este trabajo.

- La geometría de la falla basal que marca el contacto entre la zona deformada y la no deformada (*foreland*), sea redefinida con la ayuda de información sísmica nueva. Lo anterior para lograr un completo balanceo de las secciones trabajadas.
- Adicional nueva información estructural a la interpretación producida con el fin de evaluar la viabilidad de la interpretación.
- Mejorar el modelo de velocidades existente por medio del uso de esta interpretación como base en el modelo.
- Hacer una reconstrucción de un modelo 3D riguroso, que tenga en cuenta las columnas estratigráficas de cada pozo, los marcadores de los pozos y la interpretación estructural.
- Adición al modelo estructural la información sísmica reciente.

CONCLUSIONES

La herramienta del SCAT Analysis puede ser utilizada como medio para la identificación de diferentes rasgos estructurales como fallas, planos axiales y ejes de pliegues; así como datos anómalos y la validación de interpretaciones anteriores.

Es posible un modelo estructural alternativo para los campos de la Licencia Piedemonte eliminando rasgos como fallas de tipo *backthrust*. Así como siendo fiel en gran medida a los datos duros de pozo, aunque esto implique variar un poco la interpretación sísmica.

La interpretación sísmica existente para los campos de la Licencia Piedemonte resuelven satisfactoriamente sólo las estructuras más someras y sencillas estructuralmente en las secciones trabajadas. Es así como la interpretación del campo Pauto fue cambiada completamente en el modelo estructural, generando un sistema tipo *dùplex* donde el mayor número de escamas es tres.

Existe una continuidad lateral entre los diferentes campos de la Licencia. El campo Dele es lateralmente el mismo al formado por la escama más somera de la estructura del campo Pauto. Así como el campo Volcanera corresponde a la escama más profunda de Pauto. Hacia el norte el campo Pauto mantiene su continuidad profundizándose y generando una nueva escama debido a fallamiento asociado. La estructura de Pauto tiene su mayor tamaño en la parte central del área trabajada.

Un balanceo completo de las secciones no es posible debido a la geometría actualmente planteada para la falla basal de las secciones (marca el paso de la zona no deformada a deformada) y a la continua repetición del miembro C7 y C8 de la formación Carbonera. Estas repeticiones están asociadas movimientos por fuera del plano de la sección generados por la componente de rumbo de las fallas principales. Lo anterior produce flujo de material, en este caso la entrada.

El modelo de velocidades existentes es útil para determinar la variación general en los valores de velocidades para cada una de las regiones definidas en las diferentes secciones gracias a la presencia de fallas y a las propiedades petrofísicas de las rocas asociadas. Pero el modelo de velocidades no reproduce al detalle el comportamiento de la sísmica.

Cuando se realizan las conversiones Profundidad – Tiempo, la geometría de las diferentes estructuras se conserva, especialmente en la estructura de Floreña y Pauto.

BIBLIOGRAFIA

- BENGTON C.A. **STATISTICAL CURVATURE ANALYSIS TECHNIQUES FOR STRUCTURAL INTERPRETATION OF DIPMETER DATA.** The American Association of Petroleum Geologist. Bulletin. 1981.
- CAZIER, E.C., HAYWARD, A.B et al. **PETROLEUM GEOLOGY OF THE CUSIANA FIELD, LLANOS BASIN FOOTHILLS, COLOMBIA.** The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, V. 79, N° 10 (October 1995), P. 1444-1463.
- COOPER, M.A., ADDISON, F.T et al. **BASIN DEVELOPMENT AND TECTONIC HISTORY OF THE LLANOS BASIN, EASTERN CORDILLERA, AND MIDDLE MAGDALENA VALLEY, COLOMBIA.** The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, V. 19, N° 10 (October 1995), P. 1421 – 1443.
- COOPER, M.A., ADDISON, F.T. et al. **BASIN DEVELOPMENT AND TECTONIC HISTORY OF THE LLANOS BASIN, COLOMBIA.** The American Association of Petroleum Geologist Memoir 62, p. 659 – 665.
- DENGÓ, CARLOS & COVEY, MICHAEL. **STRUCTURE OF THE EASTERN CORDILLERA OF COLOMBIA: IMPLICATIONS FOR TRAP STYLES AND REGIONAL TECTONICS.** The American Association of Petroleum Geologist Bulletin V 77. N° 8 (August 1993) P. 1315-1337.
- GROSHONG, Richard Jr. **3D STRUCTURAL GEOLOGY, A Practical Guide to Surface and Subsurface Map Interpretation.** Edition 1. Berlin 1999.
- *KARE KURELLUD*, **DEFORMATION OF ROCK – STRUCTURAL GEOLOGY.** Presentación. Universidad de Tromsø. 2003.
- KIELT, MARIA. **DIPMETER MEASUREMENTS, HISTORICAL DATES, DIPMETER TYPES, PROCEDURES, METHODS OF INTERPRETATION.** Well Log Analysis Centre. Geofizyka Rotun Sp. Z o.o.
- HURLEY, NEIL. **BOREHOLE IMAGES. BASIC WELL LOG ANALYSIS: AAPEG METHODS OF EXPLORATION.** N° 16. Chapter 9. The American Association of Petroleum Geologist. Special Volumes. 2004.
- LINARES, Roberto. **ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN CINTURONES DE CABALGAMIENTO, Aplicación en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos.** 2001.
- MARTINEZ, JAIME. **MODELAMIENTO ESTRUCTURAL 3D Y APLICACIONES EN LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS EN EL CINTURÓN DE CABALGAMIENTO DEL PIEDMONTE LLANERO, CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA.** VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas.
- MURILLO, MARIA & SARQUEZ, CARLOS. **GEOMETRÍA Y**

- **CINEMÁTICA DE LAS ESTRUCTURAS DE UN SECTOR DE LA FORMACIÓN MURCA, CRETACEO INFERIOR EN LA VÍA LA VEGA – VILLETA, CUNDINAMARCA.** Tesis de Pregrado. Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander. 2004.
- RAGAN, Donal. **GEOLOGIA ESTRUCTURAL, Introducción a las Técnicas Geométricas.** Universidad de Arizona, Departamento de Geología. 1980.
- WICKHAM, John, MOECKEL, George. **RESTORATION OF STRUCTURAL CROSS SECTIONS.** Journal of Structural Geology. Vol. 19. No 7, pp. 975 to 986. 1997.
- WOODWARD, Nicolas, BOYER, Steven & SUPPE, John. **AN OUTLINE OF BALANCEED CROSS SECIONS.** University of Tennessee, Department of Geological Sciences. Studies in Geology. 2 Edition. 1985.

REFERENCIAS DE INTERNET

- **DESEMPENO AMBIENTAL BP COLOMBIA.**
http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/STAGING/global_assets/downloads/V/verfied_site_reports/S_America/Colombia_2004.pdf
- **PAGINA OFICIAL BP.**
http://global.bpweb.bp.com/about_bp/abp_who-we-are_section.aspx
- www.ig.uit.no/%7Ekaarek/geology_intro/structure.html.
- www.ipims.com **FORMATION EVALUATION.** Dipmeter Surveys.
- www.ipims.com **FORMATION EVALUATION.** Borehole Imaging.
- http://iodp.ldeo.columbia.edu/TOOLS_LABS/SPECIAL/ubi.html Página oficial **INTEGRATED OCEAN DRILLING PROGRAM.** U.S. IMPLEMENTING ORGANIZATION.