

**MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTROFACIES PARA LA FORMACIÓN
COLORADO EN EL CAMPO GALÁN, VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – UIS –

FACULTAD DE FISICO QUIMICAS

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2008

**MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTROFACIES PARA LA FORMACIÓN
COLORADO EN EL CAMPO GALÁN, VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO

**Proyecto de Grado en modalidad Investigación presentado para optar por el
título de Geóloga**

Director

MARIO GARCIA GONZALEZ, PhD.

Codirector

ALBERTO ORTÍZ FERNÁNDEZ, M.Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – UIS –

FACULTAD DE FISICO QUIMICAS

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2008

RESUMEN

TITULO: MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTROFACIES PARA LA FORMACIÓN COLORADO EN EL CAMPO GALÁN EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA.*

AUTOR: SARMIENTO MORENO Martha Liliana**

PALABRAS CLAVE: Formación Colorado, Campo Galán, Facies, Electrofacies. Cuenca del Magdalena, Colombia.

Debido a la alta variabilidad lateral de facies de los sedimentos de la Formación Colorado en la zona de Campo Galán, el presente trabajo de investigación postula nuevos mapas de distribución de electrofacies que muestra la distribución vertical y lateral para las arenas reservorio. Estos mapas integran datos sedimentológicos de descripción de corazonces que incluye estructuras sedimentarias, distribución de tamaño de grano, textura y datos de paleocorrientes, calibrada con registros, especialmente con Potencial Espontáneo (SP) debido a que el alto contenido de potasio, hace difícil interpretar cuerpos de arena con el registro *Gamma Ray* (GR).

Las principales electrofacies son arenas de canal, *Crevasse Splays* y depósitos de llanura de inundación. El espacio de acomodación versus el suministro de sedimentos fue interpretado con el fin de integrarlo al modelo geológico en un marco estratigráfico y predecir la calidad reservorio de la Formación Colorado. La calidad reservorio es moderada a pobre e incrementa hacia altos estructurales en zonas falladas.

Esta investigación incluyó correlaciones entre varios pozos y el estudio de características físicas y la fuente de los sedimentos fluviales utilizando la metodología de *Dickinson* acerca del conteo de granos y su diferenciación.

Como resultado se obtuvieron cuatro mapas de electrofacies observándose una tendencia general de los canales NE – SW; en las correlaciones se observa mayor predominio de sedimentos finos hacia el tope de la Formación Colorado, entre la Cira Shale y Colorado A2 interpretándose como un río anastomosado y la parte inferior que corresponde a Colorado A3 y A4 presenta mayor cantidad de arenas interpretándose como un río meandriforme y finalmente el análisis de procedencia indica como roca fuente a una roca metamórfica de bajo grado de la Cordillera Central.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Ph.D. Mario García González, Director, M.Sc Alberto Ortiz Fernández, Codirector.

ABSTRACT

TITLE: DISTRIBUTION ELECTROFACIES MAPS FOR THE COLORADO FORMATION IN GALAN FIELD IN THE MIDDLE MAGDALENA VALLEY.*

AUTHORS: SARMIENTO MORENO Martha Liliana**

KEY WORDS: Colorado Formation, Galan Field, Facies, Electrofacies, Magdalena basin, Colombia.

Due to high lateral facies variability of sediments of the Colorado Formation in the Galan Field area, present research work postulates a new electrofacies distribution maps that shows lateral and vertical distribution for reservoir sands. These maps integrates sedimentological data from core descriptions that includes sedimentary structures, grain size distributions, paleocurrent data and texture, calibrated with logs, specially spontaneous potential because high potassium content makes difficult to interpret sand bodies from gamma ray logs.

Main electrofacies are channel sands, crevasse splays and flood plain deposits. Accomodation space versus sediment supply was interpreted in order to integrate the geological model in a stratigraphic framework and predict reservoir quality of the Colorado Formation. Reservoir quality is moderate to poor and increases towards structural highs in faulted zones.

This research included correlations between several wells and the study of physical characteristics and source of the fluvial sediments using Dickinson methodology about grain counting and differentiation.

As result they got four electrofacies maps where the general tendency of the canals is NE - SW; in the correlations observed bigger predominance of fine sediments toward the roof of Colorado Formation between La Cira Shale and Colorado A2 that it is interpreted as a anastomosed river and toward the base corresponds Colorado A3 and A4 presents bigger quantity of sands that it is interpreted as a meandriforme river and finally the analysis of procedence indicated as source rock a an metamorphic rock of grade lower of the Central Cordillera.

* Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Ph.D. Mario García González, Director, M.Sc Alberto Ortiz Fernández, Codirector.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Planteamiento del problema

El campo de estudio no tiene definidos mapas de facies debido al enfoque netamente de ingeniería de producción que se tenía anteriormente, el cual consistía en correr registros eléctricos y perforar en donde estos indicaban arenas; pero esta metodología llevo a perforar pozos secos porque no se tenía en cuenta la geología y mucho menos la distribución de los geocuerpos, lo cual se convierte en un factor muy importante ya que la heterogeneidad de los ambientes continentales fluviales comprende diversos tipos de facies y cambios laterales; por tal motivo no se han podido llevar a cabo programas de estimulación y recobro secundario.

Hipótesis

Por medio de la descripción de núcleos, información de paleocorrientes, interpretación de registros eléctricos y correlaciones se plantearan mapas de electrofacies, con el fin de analizar la geometría de los cuerpos y su distribución áreal.

Justificación

La elaboración de dichos mapas se requiere para determinar si todas las arenas potencialmente petrolíferas se han producido y cuál es la variación lateral de las mismas a partir del reconocimiento de la importancia de contar con un modelo geológico que se usará como base para programas de estimulación y recobro secundario.

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	
1. OBJETIVOS	2
1.1. OBJETIVOS GENERALES	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO	3
2.1. LOCALIZACIÓN	3
3. METODOLOGÍA	5
3.1. FASE DE OFICINA	5
3.1.1. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	5
3.2. FASE DE LABORATORIO	7
3.3. FASE DE INTERPRETACIÓN DE DATOS	7
4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	22
4.1. MARCO TECTO - SEDIMENTARIO	22
4.1.1. Megasecuencia Triásico Tardío – Jurásico	22
4.1.2. Megasecuencia del Cretáceo Tardío al Paleoceno Temprano	23
4.1.3. Megasecuencia del Eoceno temprano al Pleistoceno	23
4.2. MODELO GEOLÓGICO DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA	26

5.	MARCO GEOLÓGICO LOCAL	28
5.1.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	28
5.2.	ESTRATIGRAFIA	29
5.2.1.	Formación La Paz	29
5.2.2.	Formación Esmeralda	30
5.2.3.	Formación Mugrosa	30
5.2.4.	Formación Colorado	31
5.2.5.	Formación Real	32
6.	FUNDAMENTOS TEORICOS	33
6.1.	ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS REGISTROS ELÉCTRICOS	33
6.1.1.	Potencial Espontaneo (SP)	33
6.1.2.	Registro de Rayos Gamma	34
6.1.3.	Registros de Resistividad	35
6.2.	ANÁLISIS DE PROCEDENCIA DE LOS SEDIMENTOS	35
7.	RESULTADOS DEL ESTUDIO	39
7.1.	DESCRIPCIÓN DE NUCLEOS	39
7.1.1.	Pozo Galán 1	39
7.1.2.	Pozo Galán 92	41
7.2.	DESCRIPCIÓN DE LITOFACIES	43
7.2.1.	Litoacies de ShI: Shale con laminación plano paralela	43
7.2.2.	Litoacies de Shcl: Shale calcáreo con laminación plano paralela.	44
7.2.3.	Litoacies de FAp: Arcillolita con desarrollo de paleosuelos	45
7.2.4.	Litoacies de FLbp: Limolita bioturbada con desarrollo de paleosuelos	45
7.2.5.	Litoacies de AI: Arenisca lodosa.	47

7.2.6.	Litoacies de Ab: Arenisca bioturbada.	47
7.2.7.	Litoacies de A: Arenisca friable.	48
7.2.8.	Litoacies de Acg: Arenisca conglomerática	49
7.2.9.	Litoacies de Fl: Limolita	49
7.2.10.	Litoacies de Ac: Arenisca calcárea	50
7.2.11.	Litoacies de Arx: Arenisca con relictos de estratificación cruzada	51
7.2.12.	Litoacies de ALbp: Arenisca lodosa con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos.	51
7.3.	ASOCIACIONES FACIALES	52
7.3.1.	Asociación Facial 1	52
7.3.2.	Asociación Facial 2	53
7.3.3.	Asociación Facial 3	54
7.3.4.	Asociación Facial 4	55
8.	ANÁLISIS PETROGRÁFICO	57
8.1.	ANÁLISIS DE SECCIONES DELGADAS	57
8.1.1.	Galán 15 937.85 metros (3076.92 pies) de profundidad	57
8.1.2.	Galán 92 1023.19 metros (3356,92 pies) de profundidad	57
8.1.3.	Llanito 30 1669.39 metros (5477 pies) de profundidad	59
8.1.4.	Llanito 30 a 1667 metros (5502 pies) de profundidad	61
8.2.	ANÁLISIS DE PROCEDENCIA	63
8.2.1.	Galán 15 937.85 metros (3076.92 pies) de profundidad	63
8.2.2.	Galán 92 1023.19 metros (3356,92 pies) de profundidad	64
8.2.3.	Llanito 30 1669.39 metros (5477 pies) de profundidad	65
8.2.4.	Llanito 30 a 1667 metros (5502 pies) de profundidad	66
8.3.	TIPOLOGÍA DE LOS GRANOS DE CUARZO	71

9.	ANALISIS DE REGISTROS ELECTRICOS	74
9.1.	AMARRE REGISTRO – ROCA	74
9.2.	CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS	79
9.2.1.	Transversa A – A'	79
9.2.2.	Transversa B - B'	79
9.2.3.	Transversa C - C'	80
9.2.4.	Transversa D – D'	81
9.2.5.	Transversa E – E'	82
9.2.6.	Transversa F - F'	82
9.2.7.	Transversa G – G'	83
9.3.	CALCULO DE ESPESORES	87
9.4.	MAPAS DE ELECTROFACIES	90
9.4.1.	Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A1	93
9.4.2.	Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A2	93
9.4.3.	Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A3	96
9.4.4.	Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A4	96
10.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	100
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
12.	REFERENCIAS	106
	ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Localización del área de estudio.	4
Figura 2. Flujograma de la metodología	8
Figura 3. Diagrama triangular para la clasificación composicional de las areniscas. Folk (1974)	10
Figura 4. Distribución de las arenas derivadas de diferentes procedencias con base en el diagrama F – Qt – L de Dickinson (1986).	11
Figura 5. Diagrama propuesto por Basu <i>et al.</i> (1975). 1. Rocas plutónicas. 2. Rocas metamórficas de grado medio-alto. 3. Rocas metamórficas de bajo grado.	12
Figura 6. Formas generadas por el registro SP. a) Registro en forma de campana. b) Registro en forma de cilindro. c) Registro en forma de embudo. (Nanz, 1959).	13
Figura 7. Localización de las transversas	16
Figura 8. Ciclos estratigráficos diferenciados por cambios en la relación Acomodación/Suministro y aumento y disminución del nivel base. (RAMON 1997).	17
Figura 9. Resumen estratigráfico y correlación de las cuencas del Magdalena Medio y Superior, Colombia. (Tomado de Montgomery, 1992).	24
Figura 10. Corte del VMM en sentido NW – SE. Tomado de PetroSantander (2007).	29
Figura 11. Contenido modal de las areniscas procedentes de diferentes ambientes tectónicos a partir de los diagramas QFL de Dickinson (1986). Q=cuarzo total; F=feldespatos monocristalinos totales. Las flechas discontinuas indican incremento de madurez. L=fragmentos líticos totales.	37
Figura 12. Shale fisil de color N1 a N2, con laminación plano paralela, calcáreo a ligeramente calcáreo, con presencia de pequeños nódulos de azufre.	44

Figura 13.	Limolita varicoloreada 5R3/4, 10R2/2, 5R4/2 y 5YR5/6 con desarrollo de paleosuelo, al tope se presenta una subarcosa bien seleccionada.	46
Figura 14.	Limolita de color grisáceo, con intercalaciones de láminas lodosas y presencia de óxidos	50
Figura 15.	Fotografía con objetivo de 10X con nicoles cruzados. Se puede observar la calcita bien cristalizada (Cal), siderita alterando a goetita (Sid), chert (Che), cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico (Fel K) y plagioclasa (Plag).	58
Figura 16.	Fotografía con objetivo de 5X con nicoles cruzados. En esta imagen se muestra el cuarzo policristalino (Qp) con sus cristales internos orientados, cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico (Fel K), y chert (Che), porosidad (tensión azul).	59
Figura 17.	Fotografía con objetivo de 5X con nicoles cruzados. Se observa chert (Che), cuarzo monocristalino (Qm) y plagioclasa (Plag) con cemento intersticial de calcita (Cal).	60
Figura 18.	Fotografía con objetivo de 10X con nicoles cruzados. Vemos cuarzo policristalino (Qp) con contactos suturados, un cuarzo policristalino con cristales orientados en la parte interior, chert (Che) y plagioclasa (Plag).	61
Figura 19.	Fotografía con objetivo de 5X con nicoles cruzados. Se puede ver la presencia de calcita como cementante (Cal) que ocupa todo el espacio entre granos, cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp) y feldespato potásico (Fel K).	62
Figura 20.	Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)	64
Figura 21.	Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007).	65
Figura 22.	Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)	66
Figura 23.	Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)	67
Figura 24.	Ubicación de la secciones analizadas en el triangulo de campos composicionales de arenas derivadas de diferentes tipos de proveniencia (Dickinson, 1985). Datos graficados de Serrano, 2007.	68
Figura 25.	Triangulo de campos composicionales de arenas derivadas de diferentes tipos de proveniencia (Dickinson, 1985). Todas las secciones de la Cira corresponden a Badillo (1996) y las de Llanito y Galán corresponden a Serrano (2007)..	70
Figura 26.	Proyección de las muestras estudiadas en el diagrama propuesto por Basu <i>et al.</i> (1975). 1. Rocas plutónicas. 2. Rocas metamórficas de grado medio-alto. 3. Rocas metamórficas de bajo grado.	72
Figura 27.	El registro SP indica una arena corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una subarcosa de grano medio a una profundidad de 970.18 a 970.45 (3183 a 3183.9 pies) indicando depósito de canal.	75

- Figura 28.** El registro SP indica una arena corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una subarcosa de grano grueso a una profundidad de 970.8 a 970.9 metros (3185 a 3185.4 pies) indicando depósito de canal. 75
- Figura 29.** El registro SP indica un sedimento fino como shale y en la descripción sedimentológica se identifico una limolita arenosa a una profundidad de 1021.38 a 1021.6 metros (3351 a 3351.7 pies). 76
- Figura 30.** El registro SP indica un sedimento fino como shale pero en la descripción sedimentológica se identifico una subarcosa de grano fino a una profundidad de 1022.3 a 1022.5 metros (3354 a 3354.7 pies). 76
- Figura 31.** El registro SP indica un shale o sedimentos finos; la descripción sedimentológica indica una arcillolita a profundidad de 1025 a 1025.16 metros (3363 a 3363.4 pies) indicando depósito de llanura de inundación. 76
- Figura 32.** El registro SP indica una arena, corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una arcosa de grano medio a una profundidad de 1063.75 a 1064.03 metros (3490 a 3490.9 pies) indicando depósito de canal. 76
- Figura 33.** Se observa el registro SP indicando una arena y la descripción sedimentológica una arcosa de grano fino a una profundidad de 1064.36 a 1064.73 (3492 a 3493.2 pies) indicando depósito de canal. 77
- Figura 34.** Se observa el registro SP indicando un sedimento fino y la descripción sedimentológica una arcosa de grano medio a fino a una profundidad de 1071.07 a 1071.68 metros (3514 a 3516 pies). 77
- Figura 35.** El registro SP indica arenas pero en el núcleo se describió una arcillolita a una profundidad de 861.36 a 862.28 metros (2826 a 2829 pies). 77
- Figura 36.** Como se observa en la figura, el registro SP indica arenas y sedimentos finos, lo cual se corroboro con la descripción del núcleo, al tope una subarcosa lodosa y hacia la base una arcillolita a una profundidad de 1014.37 a 1015.29 metros (3328 a 3331 pies). 77
- Figura 37.** El registro SP indica sedimentos finos, corroborado con la descripción sedimentológica, en la cual se identifico de base a techo, un shale calcáreo y una arcillolita hacia la base a una profundidad de 829.36 a 830.28 metros (2721 a 2724 pies). 78
- Figura 38.** El registro SP indica sedimentos finos, corroborado con la descripción sedimentológica en la que se identifico una limolita arenosa a una profundidad de 1092.7 a 1093 metros (3585 a 3586 pies). 78

Figura 39.	El registro SP indica arenas, corroborado con la descripción sedimentológica en la que se identifico una arcosa a una profundidad de 1226.5 a 1226.8 metros (4024 a 4025 pies).	78
Figura 40.	El registro SP indica arenas, corroborado con la descripción sedimentológica en la que se identifico una subarcosa lodosa a una profundidad de 1297.8 a 1298.4 metros (4258 a 4259.8 pies).	78
Figura 41.	Evidencias del buen desarrollo de canales y continuidad lateral para las zonas de colorado A3 y A4.	80
Figura 42.	En la parte superior se observa una zona denominada complejo de <i>crevasse splay</i> (zonas de color naranja), así como el dominio de arcillas en la zona.	81
Figura 43.	Buen desarrollo y continuidad lateral de los canales en la sección A, en la parte inferior de la correlación.	83
Figura 44.	Pobre desarrollo y continuidad lateral de los canales en la sección B.	83
Figura 45.	Imagen del sector derecho de la correlación, donde la continuidad lateral de las arenas es poco.	84
Figura 46.	Imagen del sector izquierdo, donde hay mayor cantidad y continuidad de las arenas.	85
Figura 47.	Definición de ciclos estratigráficos para las unidades estratigráficas de la Formación Colorado en el Campo Galán. Información suministrada por ICP – Ecopetrol.	86
Figura 48.	Espesores de Arenas para la Cira Shale	87
Figura 49.	Espesores de Arenas para Colorado A1	88
Figura 50.	Espesores de Arenas para Colorado A2.	88
Figura 51.	Espesores de Arenas para Colorado A3	89
Figura 52.	Espesores de Arenas para Colorado A4	89
Figura 53	Localización de los 32 pozos empleados en los mapas de electrofacies.	92
Figura 54.	Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A1	94
Figura 55.	Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A2	95
Figura 56.	Mapa de distribución de electrofacies para el tope de Colorado A3.	97
Figura 57.	Mapa de distribución de electrofacies para el tope de Colorado A4.	98

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Estado de preservación de los núcleos de perforación	6
Tabla 2. Datos de paleocorrientes del campo Galán	18
Tabla 3. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A1.	19
Tabla 4. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A2.	21
Tabla 5. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A3.	21
Tabla 6. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A4.	45
Tabla 7. Determinación de la procedencia y ambiente tectónico a partir de la composición QFL de las areniscas. Tomado de Dickinson (1985).	38
Tabla 8. Asociaciones facial 1 para la Formación Colorado.	53
Tabla 9. Asociaciones facial 2 para la Formación Colorado.	54
Tabla 10. Asociaciones facial 3 para la Formación Colorado.	54
Tabla 11. Asociaciones facial 4 para la Formación Colorado.	55
Tabla 12. Composición de la sección Galán 15 937.85 metros (3076.92 pies)	58
Tabla 13. Composición de la sección Galán 92 1023.19 metros (3356.92 pies)	59
Tabla 14. Composición de la sección Llanito 30 1669.39 metros (5477 pies)	60
Tabla 15. Composición de la sección Llanito 30 a 1677 metros (5502 pies)	62
Tabla 16. Componentes recalculados para Galán 15 a 937.85 metros (3076.92 pies). (Serrano, 2007)	64
Tabla 17. Componentes recalculados para Galán 92 a 102.9 metros (3.356 pies). (Serrano, 2007)	65
Tabla 18. Componentes recalculados para Llanito 30 a 1669.39 metros (5477 pies). (Serrano, 2007)	66
Tabla 19. Componentes recalculados para Llanito 30 1677 metros (5502 pies). (Serrano, 2007)	67

Tabla 20. Porcentajes de cuarzos hallados en cada una de las secciones.

71

ANEXOS

	Pag.
Anexo 1. Tabla de descripción sedimentológica	113
Anexo 2. Columna de descripción sedimentológica para Galán 1	114
Anexo 3. Columna de descripción sedimentológica para Galán 92	115
Anexo 4. Convenciones empleadas en la descripción sedimentológica	117
Anexo 5. Transversa A – A'	118
Anexo 6. Transversa B – B'	119
Anexo 7. Transversa C - C'	120
Anexo 8. Transversa D – D'	121
Anexo 9. Transversa E – E'	122
Anexo 10. Transversa F – F'	123
Anexo 11. Transversa G – G'	124

INTRODUCCION

La empresa ECOPETROL S.A. y el grupo de investigación en estratigrafía de la UIS, (GIE) tienen como objetivo fortalecer el conocimiento sedimentológico y estratigráfico de las cuencas donde dicha empresa opera, enfocando este trabajo a la Formación Colorado ubicada en la cuenca del Valle Medio Del Magdalena, la cual es catalogada como una de las formaciones de mayor potencial e interés económico porque posee características de roca reservorio. En esta medida se hace indispensable conocer e identificar su situación estratigráfica, en cuanto a continuidad de las facies, distribución de los geocuerpos y variación de los espesores ubicándonos concretamente en el Campo Galán.

Este trabajo tiene como objetivo principal elaborar mapas de electrofacies para el tope de cada unidad operacional de la Formación Colorado a partir de la interpretación de 34 registros eléctricos del Campo Galán, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de todo el campo, teniendo así una idea clara del comportamiento lateral de las facies presentes en la Formación Colorado, integrando esta información con el análisis de secciones delgadas y correlaciones estratigráficas para realizar una reconstrucción paleoambiental de la zona permitiendo identificar unidades estratigráficas y áreas con potencial para la acumulación de hidrocarburos dentro de la Formación de estudio.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar mapas de electrofacies utilizando registros eléctricos de 34 pozos para la Formación Colorado en campo Galán.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir núcleos de perforación de los pozos Galán 1 y Galán 92 para realizar asociaciones faciales y definir posibles ambientes de depósito.

Analizar petrográficamente cuatro secciones delgadas y aplicar la metodología de *William Dickinson* para hacer una aproximación a la procedencia de los sedimentos.

Elaborar correlaciones de registros eléctricos de pozos del campo Galán para la Formación Colorado, empleando registros de Potencial Espontáneo (SP).

Elaborar mapas de electrofacies para cada una de las unidades operacionales de la Formación Colorado.

2. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN

La exploración petrolera ha establecido el manejo de las áreas de interés económico bajo el nombre de cuencas, de esta forma en el país se han establecido 14 cuencas, entre las cuales está la Cuenca del Valle Medio del Magdalena donde se encuentra situado el campo Galán , el cual está ubicada entre las cordilleras Central y Oriental al Este del Río Magdalena, Sur del Río Sogamoso y Norte del Campo Gala-Llanito, comprendido dentro de las coordenadas geográficas Gauss origen Bogotá N: 1'274.039 a 1'277.627 / E: 1'020.068 a 1'022.673 el campo de interés para este estudio se observa de color rojo en la figura 1.

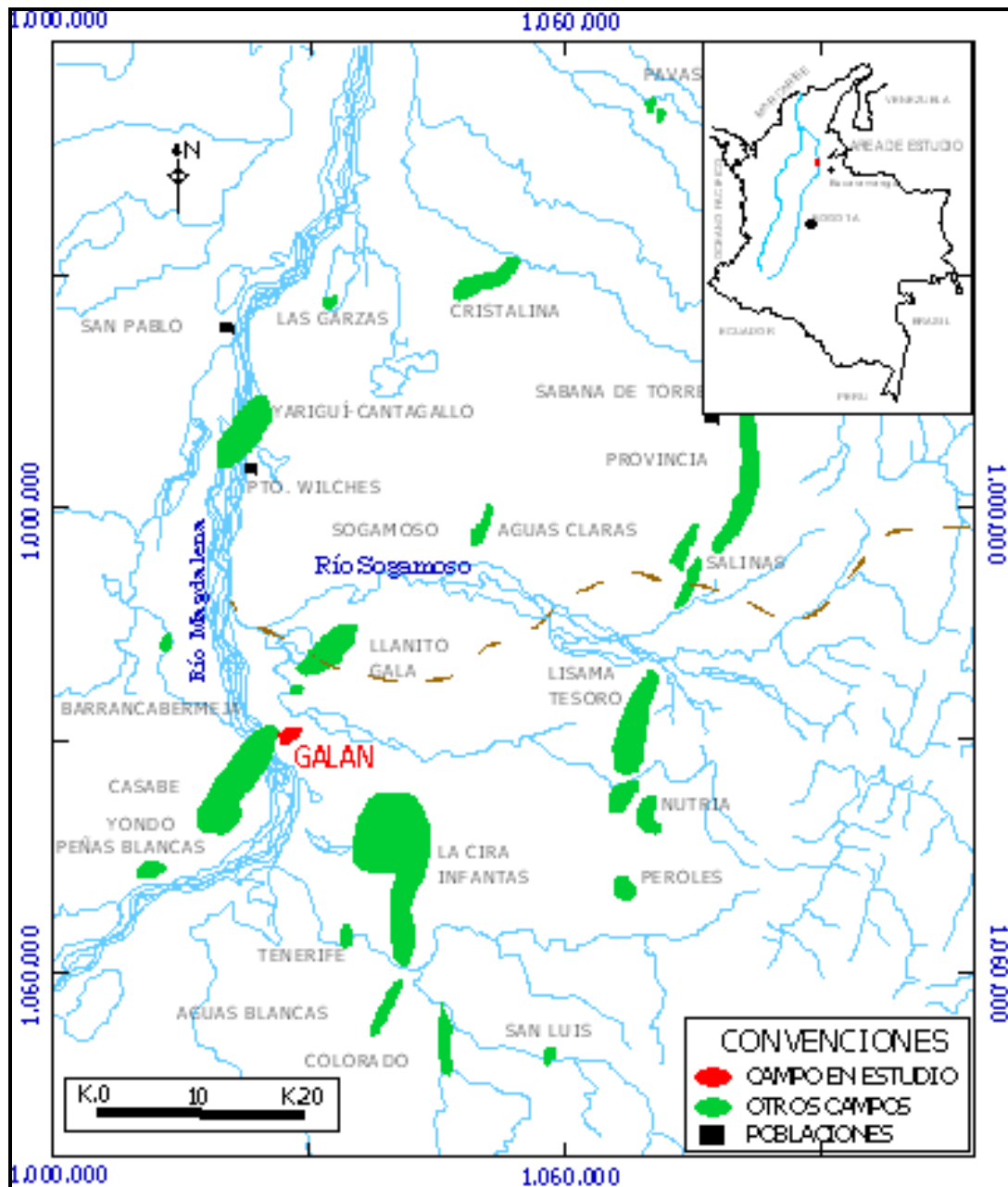


Figura 1. Localización del área de estudio. Tomado de Pardo & Niño, 2000.

3. METODOLOGÍA

La metodología planteada contempla tres etapas: Fase de Oficina, Laboratorio e interpretación de datos

3.1. FASE DE OFICINA

Recopilación y análisis de la información existente del área de estudio como: cartográfica, topográfica y geológica, además de informes de estudios anteriores, publicaciones geológicas, selección de núcleos y pozos; esto con el fin de tener una idea de la geología regional y de las cuencas. La búsqueda de esta información se desarrollo en las bibliotecas de la UIS, en el Centro de Información Técnica (CIT) del ICP (Instituto Colombiano del Petróleo), en la Base de Datos GEOREF de la Biblioteca UIS y bases de datos del ICP.

3.1.1. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Los corazones a describir se encuentran almacenados en la Litoteca Nacional “Bernardo Taborda Arango” del ICP. Los pozos Galán 1, 15, 44A, 90, 91, 92, 93 y 109 que se habían seleccionado para realizar la descripción se encuentran en mal estado de preservación, por esta razón solo se describieron dos de ellos: Galán 1 y Galán 92 con el fin de poder realizar las otras actividades planteadas que dependen de esta. En la Tabla 1, se muestra el estado de los núcleos para los dos pozos descritos con los intervalos de profundidad en pies para que sea más fácil corroborar esta información en las columnas sedimentologicas que también manejan estas unidades, el resto del informe se presenta en metros y entre paréntesis su equivalencia en pies debido a que la industria petrolera trabaja con estas últimas.

Tabla 1. Estado de preservación de los núcleos de perforación

ESTADO DE PRESERVACIÓN DE LOS NÚCLEOS DE PERFORACIÓN					
GALÁN 92				GALÁN 1	
INTERVALO (pies)	ESTADO	INTERVALO (pies)	ESTADO	INTERVALO (pies)	ESTADO
3111-3113	Gap	3635-3638	Preservado	2721-2724	preservado
3113-3116	Preservado	3638-3656	Gap	2724-2826	Gap
3116-3183	Gap	3656-3656'8	Preservado	2826-2829	preservado
3183-3183'9	Preservado	3656'8-3662	Gap	2829-3328	Gap
3183'9-3185	Gap	3662-3662'5	Preservado	3328-3331	preservado
3185-3185'4	Preservado	3662'5-3668	Gap	331-3585	Gap
3185'4-3190	Gap	3668-3668'6	Preservado	3585-3586'8	preservado
3190-3191'4	Preservado	3668'6-3669	Gap	3586'8-3590	Gap
3191'4-3257	Gap	3669-3669'5	Preservado	3590-3591'5	preservado
3257-3259	Preservado	3669'5-3675	Gap	3591'5-3700	Gap
3259-3351	Gap			3700-3702'2	preservado
3351-3351'7	Preservado			3702'2-3707	Gap
3351'7-3354	Gap			3707-3707'9	preservado
3354-3354'7	Preservado			3707'9-4019	Gap
3354'7-3355	Gap			4019-4021	preservado
3355-3357'6	Preservado			4021-4024	Gap
3357'6-3363	Gap			4024-4025	preservado
3363-3363'3	Preservado			4025-4026	Gap
3363'4-3490	Gap			4026-4027'8	preservado
3490-3490'9	Preservado			4027'8-4558	Gap
3490'9-3492	Gap			4258-4259'8	preservado
3492-3493'2	Preservado			4259'8-4269	Gap
3493'2-3514	Gap			4269-4270	preservado
3514-3516	Preservado			4270-4737	Gap
3516-3517	Gap			4737-4738	preservado
3517-3517'8	Preservado			4738-4739	Gap
3517'8-3540	Gap			4739-4740	preservado
3540-3540'4	Preservado			4740-4742	Gap
3540'4-3570	Gap			4742-4742'5	preservado
3570-3570'5	Preservado			4742'5-4995	Gap
3570'5-3635	Gap			4995-4998	preservado

3.2. FASE DE LABORATORIO

En esta fase se describieron las secciones, se describieron los núcleos y se digitalizaron las columnas sedimentológicas descritas a escala 1:10 y 1:100, dependiendo del número de pies existentes utilizando el *software Corel Draw X3*. Se realizó la identificación y asociación facial para caracterizar los posibles ambientes de depósito; seguido a esto se realizó la interpretación de registros para realizar el amarre registro – roca y realizar las correlaciones respectivas así como los mapas de electrofacies.

3.3. FASE DE INTERPRETACIÓN DE DATOS

Durante esta fase se analizaron todos los datos recolectados, en las dos fases anteriores con el propósito de interpretar el ambiente de depósito y hacer una reconstrucción paleoambiental del área de estudio.

A continuación se resumen las actividades realizadas en la figura 2 que muestra toda la metodología empleada en el estudio y posteriormente se describe cada una de ellas.

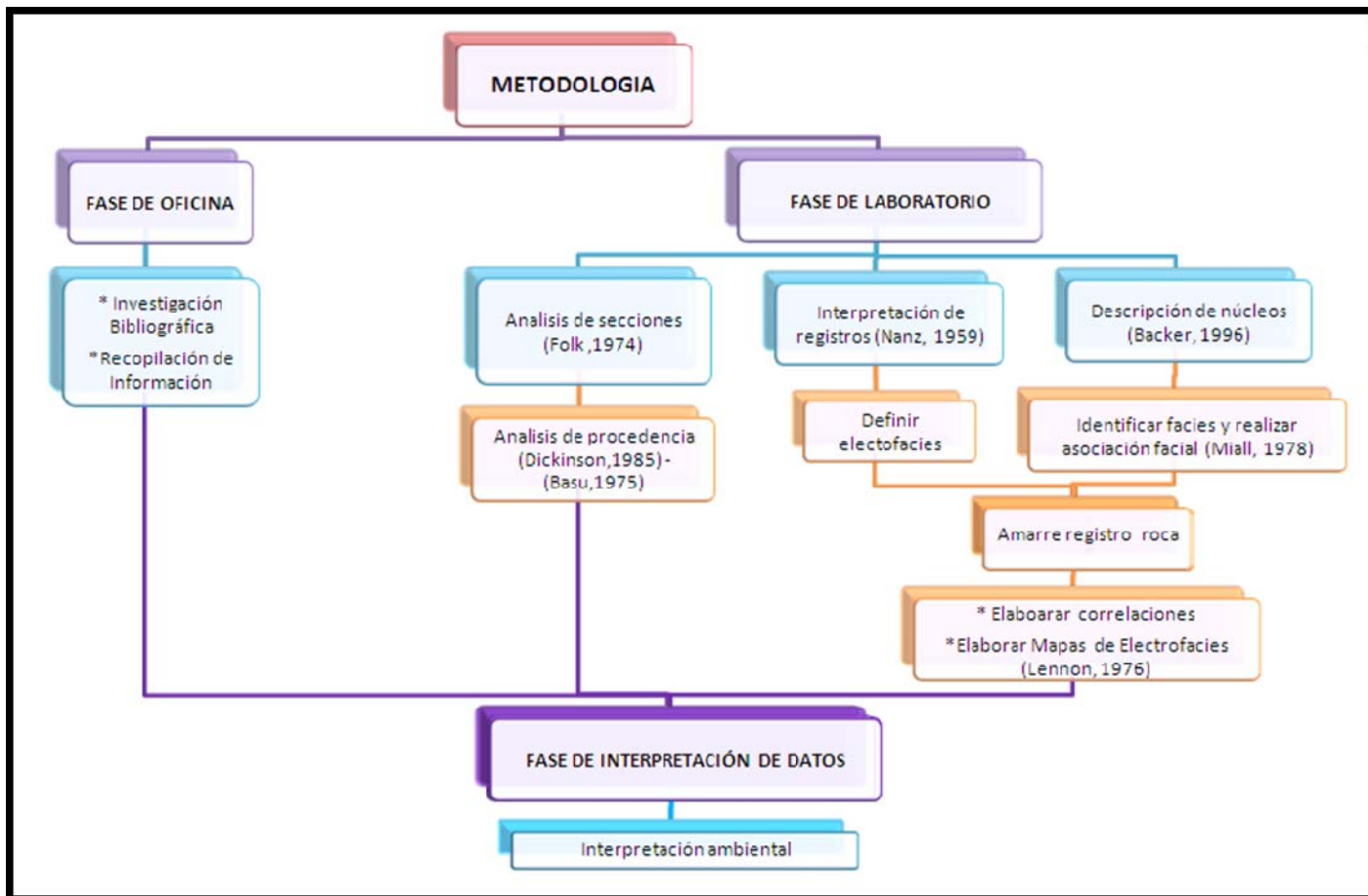


Figura 2. Flujograma de la metodología

❖ ANALISIS DE SECCIONES

En esta etapa se aplicaron tres metodologías que se describen a continuación.

FOLK (1954): Esta clasificación utiliza como base los tres tipos principales de partículas, cuarzo (QZ), feldespatos (FK) y los fragmentos de roca (FR), también denominados líticos ortoquímicos. El QZ es uno de los materiales más abundantes y el principal constituyente de las rocas sedimentarias, los FK y FR son materiales abundantes en rocas sedimentarias y con un gran significado fisiográfico, tectónico y climático; lo cual permite ver la composición e interpretar la madurez así como relacionarlo con la metodología de Dickinson.

Las areniscas se clasifican composicionalmente en tres grupos principales (figura 3). 1) Areniscas o arenitas de cuarzo (Cuarzo arenitas), son rocas constituidas principalmente por arena de cuarzo. 2) Litoarenitas, son rocas constituidas principalmente por arena de fragmentos de rocas. 3) Arcosas, rocas constituidas principalmente por arenas de feldespatos. En el gráfico se proponen otros cuatro grupos, que son combinaciones de los tres principales. 4) Subarcosas, 5) Sublitoarenitas, 6) Arcosas de fragmentos de roca o arcosa lítica y 7) Litarenita feldespática.

DICKINSON (1985): Esta metodología se realizó llevando a cabo un conteo de 150 puntos en cada una de las secciones, con el fin de identificar las tres categorías principales que corresponden a fragmentos monominerales, policristalinos y líticos. La clasificación de los diferentes tipos de fragmentos más utilizada es: cuarzo (Q), diferenciando entre cuarzo monocristalino (Qm) y policristalino (Qp); feldespato (F), diferenciando plagioclasa (P) y feldespato potásico (FK), y fragmentos líticos (L) que comprenden líticos de rocas ígneas (Li) y sedimentarias (Ls).

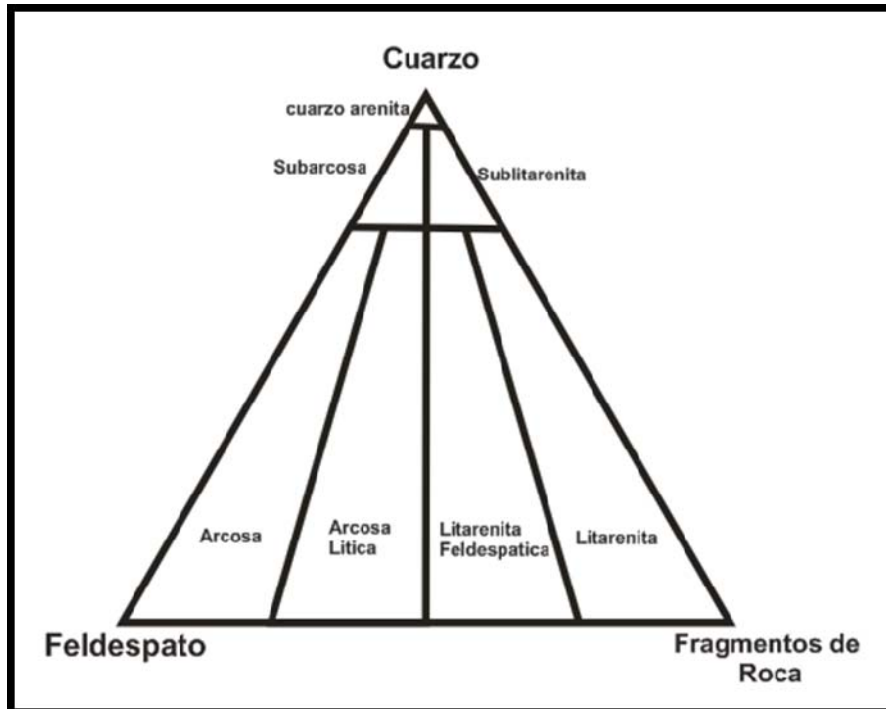


Figura 3. Diagrama triangular para la clasificación composicional de las areniscas. Folk (1974)

Después de realizar el conteo se procedió a graficar en el diagrama ternario (Figura 4), el cual muestra las variaciones de la composición de las areniscas en relación al ambiente tectónico y también refleja el grado de madurez de la misma teniendo en cuenta las variaciones en el cuarzo total (Qt); todo esto con el fin de hacer una aproximación a la posible fuente de los sedimentos.

Aunque el análisis de la composición de arenas permite obtener conclusiones sobre el entorno o contexto tectónico en que dichas arenas fueron generadas y acumuladas es importante considerar que la relación composicional entre área fuente y cuenca sedimentaria es una evidencia que resulta importante para el caso de areniscas composicionalmente inmaduras y con alta proporción en fragmentos líticos, pero que puede aparecer enmascarada en el caso de detritus altamente enriquecidos en granos monocristalinos de cuarzo.

La identificación del área fuente con su propio marco tectónico obviando todo tipo de características paleogeográficas y sedimentológicas es un hecho frecuente en el análisis de procedencias. Esta cuestión ha sido largamente discutida desde la publicación del trabajo original de Dickinson y Suczek (1979) pues la influencia de procesos autocíclicos en la composición de areniscas introduce numerosas excepciones y modificaciones en la relación composición - marco tectónico (Mack, 1984; Zuffa, 1985; Suttner y Dutta, 1986; Savoy *et al.*, 2000; Condie *et al.*, 2001).

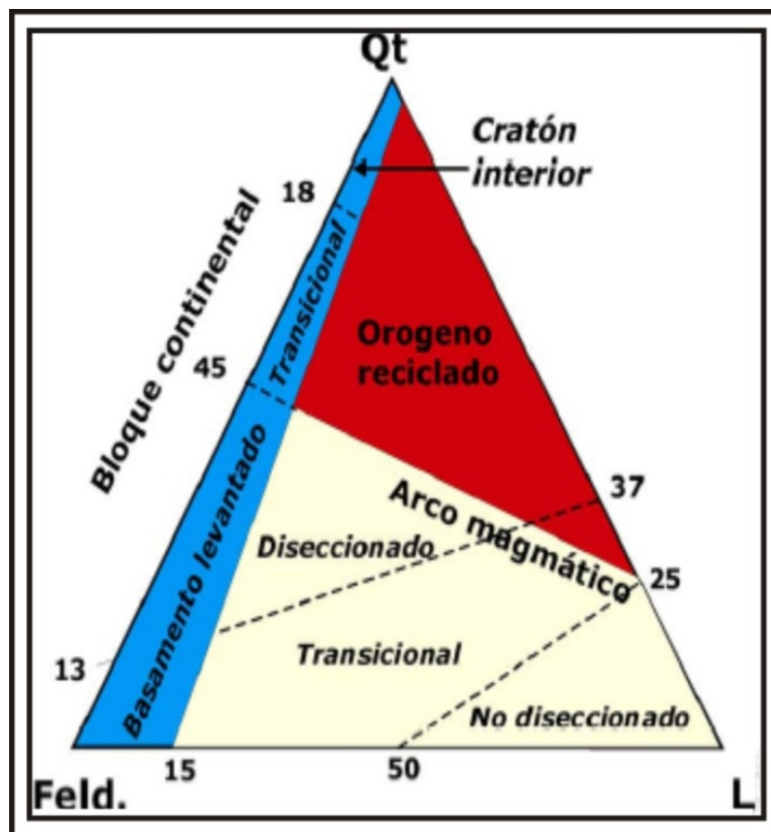


Figura 4. Distribución de las arenas derivadas de diferentes procedencias con base en el diagrama F - Qt - L de Dickinson (1986).

BASU (1975): Esta metodología consiste en identificar los cuarzos policristalinos y analizar el tipo de extinción que presenten, ya sea recta u ondulosa para así determinar si la fuente es de origen ígneo o metamórfico empleando el gráfico mostrado en la figura 5.

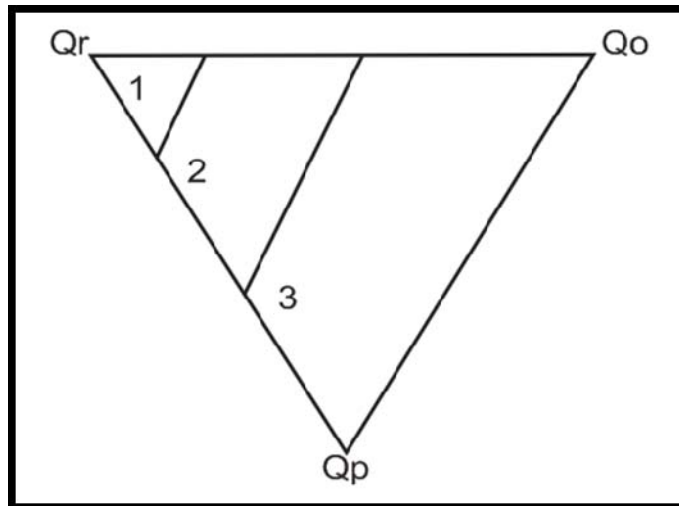


Figura 5. Diagrama propuesto por Basu *et al.* (1975). 1. Rocas plutónicas. 2. Rocas metamórficas de grado medio-alto. 3. Rocas metamórficas de bajo grado.

❖ INTERPRETACION DE REGISTROS

NANZ (1954): El criterio utilizado para la caracterización de facies fluviales en este trabajo, consiste en la identificación de la forma del registro, una primera forma puede ser la forma de campana, (Figura 6a), esta figura de campana muestra una secuencia granodecreciente que se consideran como facies de canal, estos excelentes reservorios en depósitos de ambientes fluviales, ya que por lo general muestran buenas continuidades y espesores, la siguiente forma (Figura 6b) corresponde a la forma de cilindro, la cual se interpreta como paleosuelos, facies finas o floodplain que generalmente presentan

continuidades relativamente mayores. Por último, esta la forma de embudo (Figura 6c) se interpreta como un ambiente de *crevasse splay*, que son arenas con poca continuidad.

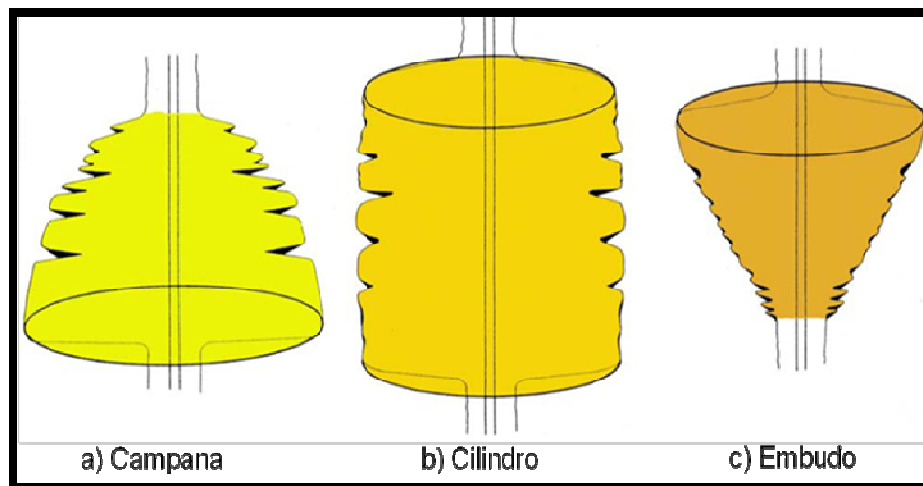


Figura 6. Formas generadas por el registro SP. a) Registro en forma de campana. b) Registro en forma de cilindro. c) Registro en forma de embudo. (Nanz, 1959).

❖ DESCRIPCION DE NUCLEOS

Para el análisis de los núcleos de perforación, se utilizó el formato de descripción macropetrográfica de corazones, escala 1:10 del INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO (ICP), donde se tiene en cuenta parámetros tales como estructuras sedimentarias físicas y orgánicas, tamaño de grano, selección, calibrado y demás rasgos que caracterizan la roca (Anexo 1), con el objeto de determinar las facies y asociaciones faciales.

Para esta descripción se aplicó la metodología planteada en Wellside Geology de Backer Huges INTEQ 1996, se extrae que, “cada litología debe ser descrita, y

observada teniendo en cuenta el siguiente orden”: establecer el tipo de roca, clasificarla según Folk (1974), definir el color teniendo en cuenta la tabla de colores de rocas de *Munsell (1992)*, la litificación, el tamaño de Grano, la forma de los Granos, el calibrado / sorting, el aspecto, el cemento, la matriz, la porosidad visual, accesorios y trazas o indicios de Aceite.

Los parámetros mencionados anteriormente se aplicaron durante el proceso de descripción. Así mismo se aplicó para la resistencia de las rocas, la clasificación propuesta por Compton (1985) que se describe a continuación.

Suelto: Se utiliza cuando el intervalo corazonado consiste de arena.

Desmenuzable: La roca se desmenuza al contacto con las manos.

Friable: La roca se rompe al ejecutar una moderada presión con las manos.

Firme: El intervalo corazonado soporta la presión de las manos.

Consolidado: La roca se rompe únicamente con el golpe de un martillo.

Durante la descripción sedimentológica se establecieron litofacies teniendo como modelo de descripción de facies siliciclásticas la clasificación propuesta por Miall (1978), pero haciendo modificaciones aplicadas a las litofacies observadas en los corazones identificando facies como por ejemplo: Shl (Shale con laminación plano paralela), FAp (Arcillolita con desarrollo de paleosuelo) y Ab (Arenisca bioturbada) entre otras; las cuales están asociadas con el tamaño de grano, régimen de flujo, estructuras y texturas sedimentarias identificadas durante la descripción y anteponiendo la letra F a los sedimentos como arcillas y limos para saber que estamos hablando de sedimentos finos.

❖ CORRELACIONES

Para la realización de las correlaciones primero se definieron los pozos a correlacionar trazando una malla por todo el campo con el fin de abarcar la mayoría del área, definiendo así siete líneas de correlación como se observa en la figura 7 , seguido a esto se identificaron las electrofacies empleando el *software* PETREL teniendo en cuenta la interpretación de NANZ (1954), después se exporto la interpretación de los registros al *software Corel DrawX3* para ubicar los pozos teniendo en cuenta la distancia que hay entre cada uno y realizar las correlaciones manualmente.

Para la realización de las correlaciones primero se establece un datum, posteriormente se trazaron líneas litológicas que para este caso se representaron por líneas de color negro, con las cuales se dio la inclinación a los canales; estas líneas se establecieron teniendo en cuenta que la curva del registro fuese igual o similar en los pozos a correlacionar. Finalmente se tuvo en cuenta la forma del registro, si había amalgamación de los canales y la identificación de ciclos ya que la relación de espacio de acomodación / suministro de sedimento (A/S), permite analizar la distribución espacial de los depósitos de canal y a su vez el grado de conectividad de los cuerpos.

En la figura 8 se observan los triángulos que se usan convencionalmente para describir ciclos y hemicyclos del nivel base, así un triangulo con su ápice hacia arriba representa un hemicyclo de subida (RH) y un triangulo con su ápice hacia abajo representa un hemicyclo de caída (FH) del nivel base. Un ciclo simétrico es representado por un RH y un FH de iguales dimensiones, un ciclo ligeramente asimétrico es representado por un RH y un FH de dimensiones diferentes y finalmente un ciclo asimétrico es representado por un RH o un FH.

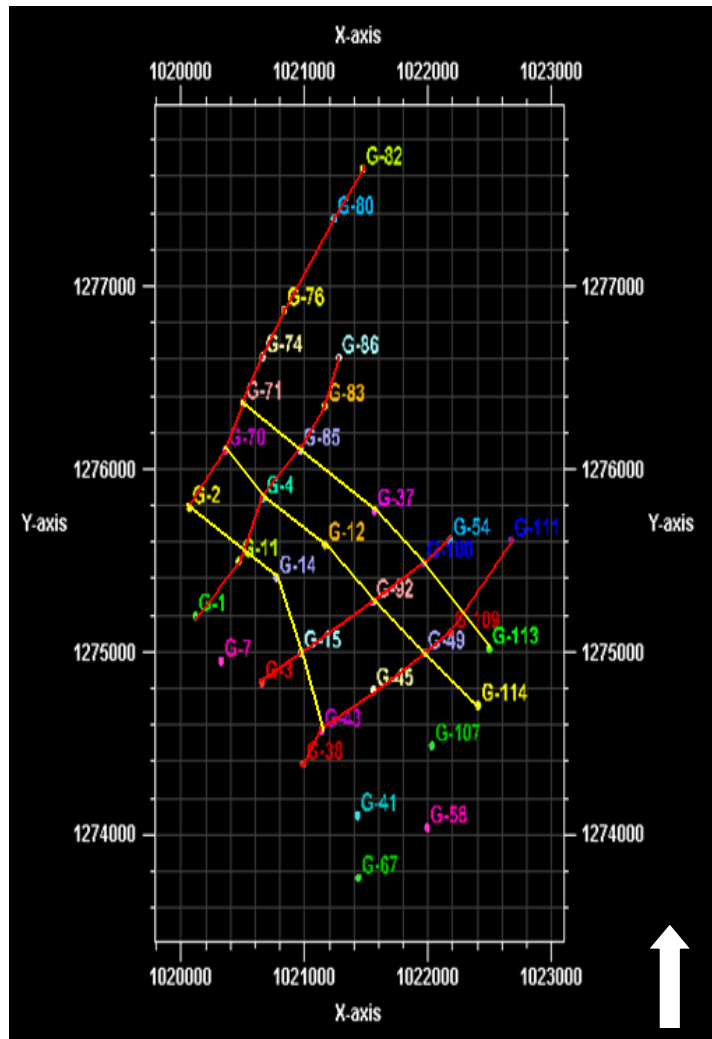


Figura 7. Localización de las transversas

Un ciclo simétrico representa sedimentación continua en una posición geográfica constante a través del tiempo; en un ciclo parcialmente asimétrico el ciclo más corto representa menor acumulación de sedimentos por unidad de tiempo que el otro hemicycle y en un ciclo asimétrico los estratos correspondientes al hemicycle que se pierde son interpretados como sedimento inicialmente sedimentado y posteriormente erodado o nunca depositado.

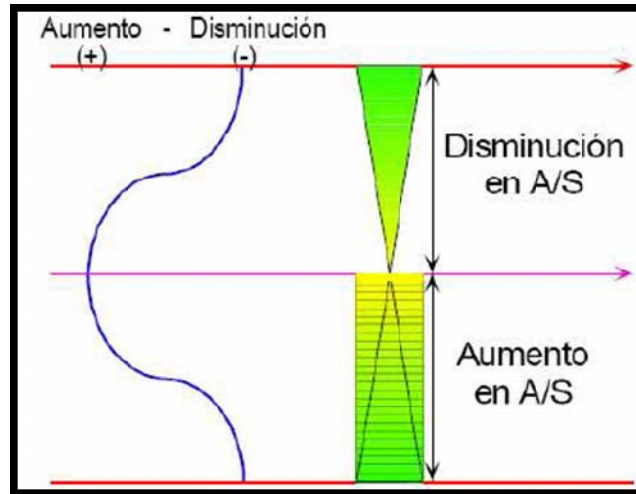


Figura 8. Ciclos estratigráficos diferenciados por cambios en la relación Acomodación/Suministro y aumento y disminución del nivel base. (RAMON 1997).

Los mínimos en la relación A/S corresponde a puntos de máxima progradación o zonas de mayor amalgamamiento de las facies existentes. (MIALL 1996).

Los máximos en la relación A/S pueden corresponder a superficies de inundación, gran diversidad de facies o intervalos lodosos. Mientras más duradero sea el hem ciclo de subida de nivel base (aumento en A/S), menos amalgamamiento de los elementos geomorfológicos se van a encontrar. (RAMON 1997). Así mismo, a partir de la forma de los registros litológicos (SP) se puede identificar en la elaboración de las correlaciones secuencias que determinan cambios en la relación Acomodación / Suministro (A/S) así como ciclos de subida y caída del nivel base estratigráfico (CROSS, 1998).

❖ MAPAS DE ELECTROFACIES

Los mapas de electrofacies se realizaron basados en la metodología de Lennon, 1976 (en Serra 1980) donde se tiene en cuenta las coordenadas y electrofacies halladas en cada uno de los pozos. La elaboración de los mapas de realizo de

forma manual y posteriormente se digitalizaron en el *software Corel Draw X*; así mismo se usaron datos de paleocorrientes con el fin de tener una idea más clara de la posible dirección de los canales.

En la tabla 2 se observan los datos de paleocorrientes para cinco pozos que tenían esta información, a pesar de que ninguno corresponde a los pozos seleccionados para el estudio, estos sirvieron de ayuda para darnos una idea de la dirección que tenían las paleocorrientes en esos momentos.

Tabla 2. Datos de paleocorrientes del campo Galán

POZO - UNIDAD OPERACIONAL	PROFUNDIDAD	AZIMUT DE DIRE. DE CORRIENTE	BUZAM. DE DIREC. DE CORRIENTE
GALÁN 121 - A1	3421,89	220	19
GALÁN 121 - A2	3914,31	70	18
GALÁN 121 - A3	4227	317	5
GALÁN 121 - A4	4741	348	16
GALÁN 122- A1	3600	223,13	9
GALÁN 122- A2	4060,64	25	26
GALÁN 122- A3	4415	79	5
GALÁN 122- A4	4930	24	12
GALÁN 123- A1	3290	260	5
GALÁN 123- A2	4002	185,5	25
GALÁN 123- A3	4428	347,3	7
GALÁN 123- A4	4930	20	32
GALÁN 80 - A1	3434	65	8
GALÁN 80 - A2	4066	98	5
GALÁN 80 - A3	4378,8	325	17
GALÁN 80 - A4	4644,3	101	5
GALÁN 81 - A1	2630,0	279	8
GALÁN 81 - A2	3426,5	178	22
GALÁN 81 - A3	4026,5	46	11
GALÁN 81 - A4	4448,0	161	8

En las tablas 3, 4, 5 y 6 se observan los parámetros empleados para la elaboración de los mapas de electrofacies al tope de cada unidad operacional.

Tabla 3. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A1.

TOPE DE COLORADO A1			
POZO	X	Y	ELECTROFACIES
Galán 1	1020115	1275197	Canal
Galán 2	1020067	1275787	Canal
Galán 3	1020655	1274829	Flooplain
Galán 4	1020664	1275841	Crevasse Splay
Galán 7	1020324	1274948	Canal
Galán 11	1020465	1275495	Canal
Galán 12	1021165	1275585	Flooplain
Galán 14	1020769	1275405	Crevasse Splay
Galán 15	1020970	1274995	Canal
Galán 37	1021566	1275771	Crevasse Splay
Galán 38	1020988	1274387	Crevasse Splay
Galán 43	1021137	1274567	Flooplain
Galán 45	1021556	1274790	Canal
Galán 49	1021975	1274993	Crevasse Splay
Galán 54	1022178	1275612	Flooplain
Galán 58	1021993	1274038	Crevasse Splay
Galán 67	1021436	1273763	Crevasse Splay
Galán 70	1020360	1276104	Canal
Galán 71	1020500	1276358	Flooplain
Galán 74	1020660	1276614	Crevasse Splay
Galán 76	1020834	1276871	Flooplain
Galán 80	1021239	1277369	Crevasse Splay
Galán 82	1021470	1277641	Crevasse Splay
Galán 83	1021166	1276346	Crevasse Splay
Galán 85	1020965	1276104	Canal
Galán 86	1021277	1276608	Crevasse Splay
Galán 92	1021557	1275273	Canal
Galán 100	1021965	1275486	Canal
Galán 106	1021590	1274368	Crevasse Splay
Galán 107	1022032	1274486	Canal
Galán 109	1022185	1275105	Flooplain
Galán 111	1022673	1275609	Canal
Galán 113	1022497	1275016	Canal
Galán 114	1022406	1274706	Canal

Tabla 4. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A2.

TOPE DE COLORADO A2			
POZO	X	Y	ELECTROFACIES
Galán 1	1020115	1275197	Floodplain
Galán 3	1020655	1274829	Crevasse Splay
Galán 4	1020664	1275841	Floodplain
Galán 7	1020324	1274948	Crevasse Splay
Galán 11	1020465	1275495	Floodplain
Galán 12	1021165	1275585	Floodplain
Galán 14	1020769	1275405	Crevasse Splay
Galán 15	1020970	1274995	Crevasse Splay
Galán 37	1021566	1275771	Floodplain
Galán 38	1020988	1274387	Floodplain
Galán 43	1021137	1274567	Floodplain
Galán 45	1021556	1274790	Floodplain
Galán 54	1022178	1275612	Floodplain
Galán 58	1020970	1274995	Crevasse Splay
Galán 70	1020360	1276104	Canal
Galán 71	1020500	1276358	Canal
Galán 74	1020660	1276614	Crevasse Splay
Galán 76	1020834	1276871	Canal
Galán 80	1021239	1277369	Canal
Galán 82	1021470	1277641	Canal
Galán 83	1021166	1276346	Floodplain
Galán 85	1020965	1276104	Canal
Galán 86	1021277	1276608	Floodplain
Galán 92	1021557	1275273	Floodplain
Galán 100	1021965	1275486	Floodplain
Galán 107	1022032	1274486	Canal
Galán 109	1022185	1275105	Floodplain
Galán 111	1022673	1275609	Floodplain
Galán 113	1022497	1275016	Floodplain
Galán 114	1022406	1274706	Canal

Tabla 5. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A3.

TOPE DE COLORADO A3			
POZO	X	Y	ELECTROFACIES
Galán 1	1020115	1275197	Canal
Galán 4	1020664	1275841	Floodplain
Galán 12	1021165	1275585	Floodplain
Galán 70	1020360	1276104	Canal
Galán 71	1020500	1276358	Canal
Galán 74	1020660	1276614	Canal
Galán 76	1020834	1276871	Floodplain
Galán 80	1021239	1277369	Canal
Galán 82	1021470	1277641	Floodplain
Galán 83	1021166	1276346	Crevasse Splay
Galán 85	1020965	1276104	Floodplain
Galán 86	1021277	1276608	Canal

Tabla 6. Parámetros empleados para la elaboración del mapa de electrofacies de Colorado A4.

TOPE DE COLORADO A4			
POZO	X	Y	ELECTROFACIES
Galán 1	1020115	1275197	Canal
Galán 12	1021165	1275585	Canal
Galán 70	1020360	1276104	Canal
Galán 71	1020500	1276358	Canal
Galán 74	1020660	1276614	Canal
Galán 76	1020834	1276871	Canal
Galán 80	1021239	1277369	Canal
Galán 82	1021470	1277641	Canal
Galán 83	1021166	1276346	Canal
Galán 86	1021277	1276608	Canal

4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1. MARCO TECTO - ESTRATIGRÁFICO

La depositación Post – Paleozoica de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) puede ser dividida en tres megasecuencias (Figura 9) que a su vez son correlacionadas con la interacción entre las placas (Montgomery, 1992).

En relación con el termino de megasecuencias, este será utilizado en esta investigación bajo la definición estricta de Montgomery, 1992.

A continuación se describe cada una de las megasecuencias indicadas en el grafico por los números romanos.

4.1.1. Megasecuencia Triásico Tardío – Jurásico: Durante el Mesozoico se da un debilitamiento de la litosfera resultado del estiramiento del área en la que actualmente está la Cordillera Oriental. (Etayo – Serna et al., 1983).

Este estiramiento se dio durante el Triásico - Jurásico mediante esfuerzos tensional / transtensional probablemente relacionado al rompimiento de Pangea y a la extensión del *backarc* lo cual produjo acortamiento de la litosfera y genero *rift* cercanos. Esta deformación extensión se concentró al Este en un sistema de arcos continentales causado por la subducción de la litosfera Pacífica sobre el margen Occidental de Sur América, debido a esto se generó en el Cretáceo temprano un sistema de cuencas asimétricas tipo *rift* y se inicia una rápida subsidencia en la cuenca.

4.1.2. Megasecuencia del Cretáceo Tardío al Paleoceno Temprano: En el Cretáceo tardío – Terciario, la exhumación de la cordillera estuvo vinculada a la evolución del margen Oeste activo de Sur América. Debido a la oblicua acreción durante el cretáceo tardío de la cordillera Occidental, se generó hacia el Oeste la propagación del levantamiento de la cordillera central (Cambpbell, 1968; Etayo et al., 1983).

El área Este del arco magmático de la cordillera oriental estaba comprendida por un largo y estrecho *back – arc* depositacional, el cual produjo cambios en los patrones de sedimentación de las arenas, arcillas y carbonatos. Las influencias primarias en este tiempo eran clásticas (arenas) las cuales eran suministradas desde el cratón, (Montgomery, 1992).

4.1.3. Megasecuencia del Eoceno temprano al Pleistoceno: Está megasecuencia se caracteriza principalmente por una depositación sin orogénica que involucra el retiro de las aguas marinas de la región (regresión) y un levantamiento repentino que limitó la cordillera, por lo cual la cuenca fue rellenada con sedimentos no marinos tipo molasa. También se caracterizó por presentar algunos pulsos mayores, separados por inconformidades y relacionados posiblemente con eventos tectónicos mayores. (Montgomery, 1992).

Durante el Eoceno temprano y el Oligoceno se registró un episodio de acreción / obducción; en el Oligoceno Tardío – Mioceno, se produjo un choque entre las Placas Nazca y Cocos, ocasionando un cambio en el movimiento relativo en la convergencia, pasando de Noreste - Suroeste a Este - Oeste; (Ben – Avraham y Nur, 1987 en Montgomery, 1992) y en el Plioceno – Pleistoceno, la colisión del arco de Panamá dio como resultado la Orogenia Andina. (Montgomery, 1992).

Además de la caracterización de las megasecuencias, en la Figura 9 se observan las sucesiones marinas del Cretáceo que pueden ser caracterizadas en términos

de cinco ciclos mayores de transgresión / regresión indicados con los números arábigos. (Montgomery, 1992).

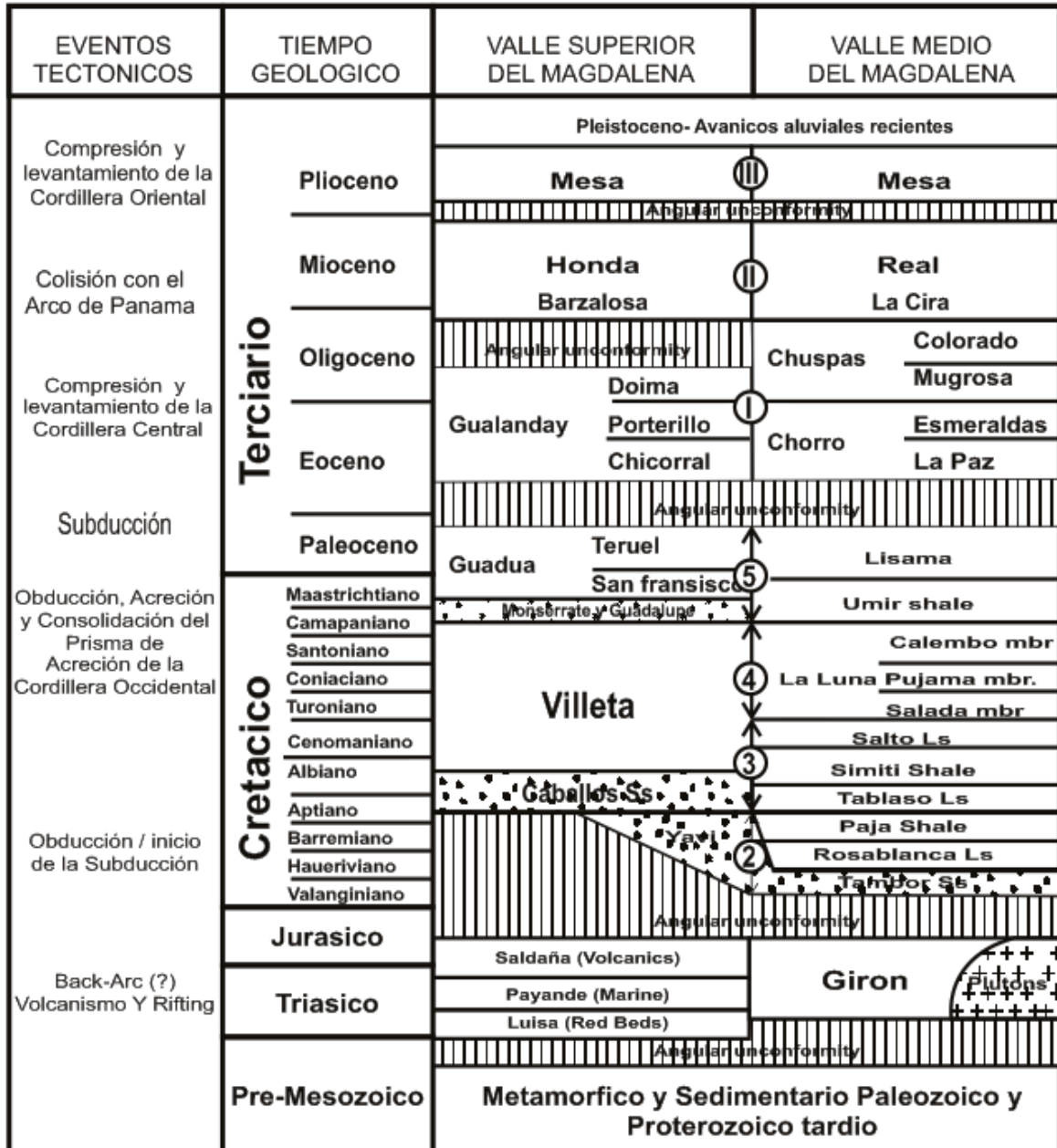


Figura 9. Resumen estratigráfico y correlación de las cuencas del Magdalena Medio y Superior, Colombia. (Tomado de Montgomery, 1992).

CICLO 1: Este ciclo no se muestra en la figura; las etapas tempranas de este ciclo están restringidas a áreas de grabenes profundos, posiblemente aun activos en ese tiempo. La transgresión marina inicial ocurrió dentro de la depresión de Bogotá y se propagó al NE. Se observó ambientes depositacionales específicos como fluvial/deltaico a marino somero (Montgomery, 1992).

CICLO 2: Los depósitos basales del Cretáceo en el Valle del Magdalena comprenden conglomerados y arenas transgresivas (cuarzo y arenitas feldespáticas) de la Formación Tambor. Aquí, una inconformidad angular separa estas rocas de las infrayacentes secuencias de rift o del basamento metamórfico. La Formación Tambor, se caracteriza por tener conglomerados y areniscas con intercalaciones de lodos rojos y grises que son indicativos de ambientes de depositación fluvial y *tidal flat*. Estas rocas gradan hacia arriba de forma ininterrumpida hasta las facies carbonáticas marinas de la Formación Rosablanca, esta es suprayacida por shales micáceos negros laminados de la Formación Paja la cual marca la máxima etapa de transgresión durante este ciclo.

El ciclo 2 es separado de los depósitos más jóvenes por una inconformidad durante el Barremiano – Aptiano. Esta inconformidad corresponde al episodio de Obducción / acreción en el Cretácico Temprano propuesto por Megard, 1987 (en Montgomery, 1992).

CICLOS 3 Y 4: Los siguientes dos ciclos representan los máximos episodios de inundación marina, con facies de aguas profundas que prevalecen en la depresión de Bogotá y en las áreas del Valle del Magdalena (Montgomery, 1992).

Una disconformidad separa los depósitos de los ciclos 3 y 4, sin aparente pérdida de sección. Al NE, a través del Macizo de Santander, el ciclo 3 llega a ser dominado por sedimentos clásticos de grano más grueso y por un adelgazamiento erosional de la Formación Salto. Hacia el Sur y el Oeste, no se observa una clara

división entre los ciclos 3 y 4. Hacia el Norte y Este, el Grupo Villeta se convierte en La Formación La Luna, la cual está comprendida por shales negros, limolitas laminadas y chert. (Montgomery, 1992).

CICLO 5: El megaciclo Marino del Cretáceo termina con un retorno de la sedimentación de agua somera, sucedida por depósitos continentales y marginales marinos. Los depósitos del ciclo 5 presentan una inconformidad regional, que marca la iniciación de estos periodos regresivos, esta superficie es continua a través de toda la región y puede ser correlacionada con un evento mayor de obducción / acreción al W, el cual nuevamente se extiende hasta el flanco Oeste de la Cordillera Central. Este evento, trajo consigo una caída en el nivel eustático del mar, el retiro del mar de la región y el posterior dominio de los depósitos terrestres. (Montgomery, 1992).

4.2. MODELO GEOLÓGICO DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

Los depósitos del Eoceno – Plioceno comprenden más o menos en 60% o más del espesor estratigráfico total en la Cuenca del Magdalena. Estos depósitos son de origen no marino y pueden ser divididos en 3 distintas secuencias molásicas, separadas por inconformidades o disconformidades (Montgomery, 1992).

La etapa temprana de estas secuencias, abarca los Grupos Chuspas y Gualanday, los cuales se relacionan con el levantamiento del arco de la Cordillera Central al Oeste. Llevando hacia el Este, progradación de un enorme abanico aluvial/planicie de ríos trenzados, pasando a depósitos deltaicos en el área de los Llanos. La segunda secuencia, incluyendo el Mioceno de los Grupos Honda y Real, es particularmente rica en remanentes volcánicos e indican la reactivación del arco a lo largo de la Cordillera Central. La tercera secuencia, o Grupo Mesa,

está compuesta por material de ambas cordilleras Central y Oriental, esto como resultado de etapas anteriores a la Orogenia Andina (Montgomery, 1992).

Los conglomerados de la primeras dos secuencias (Gualanday/Chorro – Chuspas y Honda / Real) están generalmente caracterizados por una amplia distribución, buena continuidad, y fabrica relativamente uniforme, todos los indicativos de una amplia depositación a través de una planicie aluvial que fue construida fuera de las áreas de subsidencia del valle, rodeadas por tierras altas de moderado relieve. En contraste los depósitos del Terciario Tardío están pobremente sorteados, y con una fabrica variable. Ellos reflejan, en otras palabras, una rápida descarga de sedimento asociado con la Orogenia Andina, los cuales, durante millones de años, lograron crear terrenos de enormes relieves y espectaculares pendientes. Por esta razón no sería sorpresa que los reservorios de hidrocarburos se encuentren confinados en estas dos secuencias (Montgomery, 1992).

5. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

5.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

De acuerdo a Bautista & Prada (1987), la estructura de Galán se considera como la continuación de la estructura de Casabe al noreste, la cual corresponde a un anticlinal asimétrico, fallado en su flanco occidental por la Falla de Casabe. Sin embargo, los cortes transversales demuestran que la estructura se convierte en un pliegue monoclinal y que cierra contra la Falla de Casabe.

La industria petrolera en sus etapas de exploración ha definido tres horizontes productores dentro del campo Galán, determinados por máximos y mínimos niveles de inundación: Zona A, en la Formación Colorado (principal productor del campo), Zona B y Zona C en la Formación Mugrosa. Hacia el S-W de la Zona A están los mejores espesores petrolíferos como continuación de las arenas de Casabe. La mayor producción de la Zona B se encuentra contra la Falla de Casabe y se extiende hacia el S-W en los límites con Casabe y la Zona C tiene una importancia petrolífera moderada, en razón de la forma de la estructura, muestra niveles estructurales altos y desarrollos petrolíferos importantes, mientras que hacia el sur del pozo Galán-10 las acumulaciones de aceite no son comercialmente explotables, debido a los niveles estructurales bajos del campo.

En el área de estudio el entrapamiento de petróleo es de tipo estructural siendo el S-E el área más alta y de mejor producción acumulada. Hacia el norte del

campo el entrapamiento es debido al sistema de fallas donde hay un mejor desarrollo de la Zona C. (Pardo & Niño 2000).

En la Figura 10 se observa un corte del VMM donde permite ver que el área presenta una estructura tipo flor y que los depósitos de hidrocarburos están asociados a trampas de tipo estructural como se observa en el gráfico.

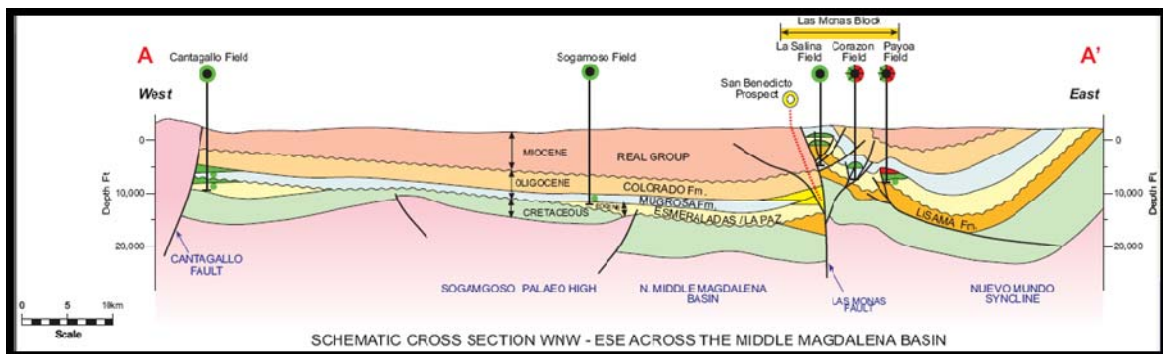


Figura 10. Corte del VMM en sentido NW – SE. Tomado de PetroSantander (2007).

5.2. ESTRATIGRAFIA

A continuación se describen las unidades que se encuentran en el área de estudio, las cuales van desde el Cretáceo hasta el Mioceno (ver figura 9) con un espesor total de 2743 metros (9000 pies).

5.2.1. Formación La Paz

Es la porción basal del Grupo Choro, sus depósitos son predominantemente de río trenzado, con un espesor consistente, arenas y conglomerados lenticulares, con intercalaciones de calizas grises y moteadas (canales abandonados). El ancho, y

la distribución continua de estos depósitos a través de la Cuenca del Magdalena pueden indicar cierto grado de inclinación tectónica, causando migración lateral de sistemas individuales de ríos (Montgomery, 1992).

5.2.2. Formación Esmeraldas

Es la porción superior del Grupo Chorro. En esta, una pequeña porción de esta unidad consiste de arenas de grano grueso con estratificación cruzada, generalmente más delgadas que las de la Formación La Paz, y con intervalos de mudstone y siltstone, indicativo de depósitos de llanura aluvial cruzados por una agradación de ríos trenzados (Montgomery, 1992).

Ha sido denominada Zona D, con aproximadamente 121,92 metros (400 pies) de espesor, es una formación muy pobre como productora de aceite. Sus límites superior e inferior son discordantes con el Oligoceno y el Cretáceo Superior respectivamente; la discordancia inferior es angular y coloca en contacto irregular al Eoceno con la Formación La Luna o con la Formación Umir hacia los flancos del alto Pre-Terciario. En general está compuesta de secuencias granocrecientes, de areniscas finas a medias de tipo fluvio-deltáico (Pardo & Niño 2000).

5.2.3. Formación Mugrosa

La Formación Mugrosa muestra arenas de grano fino – medio, con granos de subangulares a subredondeados y moderadamente bien sorteados. Se han definido dos zonas dentro de esta formación, la Zona B y la Zona C con un espesor promedio de 274.32 metros (900 pies) y 182.88 metros (600 pies) respectivamente, de esta forma el espesor petrolífero para la Zona B es de 15.24 metros (50 pies) y 12.192 metros (40 pies) respectivamente.

En la Formación Mugrosa predomina un ambiente de ríos meandriformes, con desarrollo de rellenos del canal principalmente, canales y esporádicamente

Llanuras de Inundación. La Formación se encuentra constituida por intercalaciones de arcillolitas gris-verde y areniscas cuarzo-feldepáticas, de grano medio a fino. El límite superior presenta una discordancia local identificada por el nivel guía de los “Fósiles de Mugrosa”. Se desarrolla en un ambiente fluvial de corrientes meandriforme generando un frecuente cambio lateral de facies y una discontinuidad litológica (Pardo & Niño 2000).

5.2.4. Formación Colorado

El nombre Colorado fue usado originalmente por A. K. McGill en 1929 y luego publicado por Wheeler (1935). Esta formación corresponde al tope de la secuencia sedimentaria del Oligoceno y está presente en las áreas norte y central del Valle Medio del Magdalena.

El contacto suprayacente con la Formación Real es discordante y en la base descansa concordantemente sobre el horizonte fosilífero de la Formación Mugrosa. Esta comprendida predominantemente de shales gris – morados altamente masivos, intercalados con cuarzoarenitas de grano fino a grueso bien sorteado. (Santacruz, 2004).

Se han definido dos zonas dentro de esta formación, La Cira Shale y la Zona A con un espesor promedio de 76.20 metros (250 pies) y 822.96 metros (2700 pies), respectivamente.

El nivel de La Cira Shale está constituido por shale verde-oliva, buena laminación, limolítico con material orgánico y abundantes Pelecípodos. La Zona A está constituida por arcillas claras, predominantemente pardo-amarillas, con intercalaciones de areniscas verdosas y blancas, de grano fino a medio, calcáreas, arcillosas y muy friables (Pardo & Niño 2000).

5.2.5. Formación Real

Consiste en arenas, conglomerados, shales de colores variables y material volcanoclástico (En Montgomery, 1992). La Formación Real está constituida por arenisca cuarzosa de grano medio a conglomeráticas, subangular a subredondeado con intercalaciones arcillosas de colores gris verdoso, rojo y violeta, parcialmente limosas; existen pequeños lentes de carbón lignítico micropiritoso (Santacruz,2004).

Desde la superficie hasta el tope de las arcillas fosilíferas de La Cira Shale. Tiene aproximadamente 762,00 metros (2500 pies) de espesor. Yace inconformemente sobre la Formación Colorado. Corresponde principalmente a conglomerados y areniscas gruesas con intercalaciones menores de limo-arcilloso. Depositado principalmente por ríos de corrientes entrelazadas y abanicos aluviales (Pardo & Niño 2000).

6. FUNDAMENTOS TEORICOS

6.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS REGISTROS ELÉCTRICOS

La técnica de registros eléctricos de perforación fue desarrollada por primera vez en los años 1920 por Conrad y Marcel Schlumberger. Este registro eléctrico de perforación fue realizado en California en 1929 dos años después de que los hermanos Schlumberger realizaran el primer sondeo eléctrico en Francia.

Para evaluar zonas donde se encuentren reservorios de hidrocarburos se requiere conocer los siguientes parámetros: porosidad, saturación de hidrocarburos, espesor permeable de la capa y su permeabilidad, los cuales pueden ser deducidos de perfiles eléctricos, nucleares y acústicos.

A continuación una breve descripción de algunos registros.

6.1.1. Potencial Espontaneo (SP)

La curva de potencial espontáneo es la respuesta a la diferencia de corriente entre el potencial que ocurre naturalmente en las formaciones y el potencial de la formación es registrado por un electrodo móvil a través del pozo.

El SP permite identificar y diferenciar intervalos permeables tales como las arenas y zonas impermeables como las arcillas, por lo que se considera un indicador de espesores permeables.

Para fines de interpretación, la medida del SP se toma con referencia a la línea base de arcillas, la cual en la mayoría de los casos es constante a iguales condiciones de litología y resistividad del agua intersticial. En capas de suficiente espesor la curva de SP tiende a alcanzar una desviación constante definiendo una línea de arenas mientras que para el caso de formaciones permeables, con alta tendencia de fracturamiento, suele ocurrir invasión del filtrado de lodo en la fractura, lo cual origina fuertes efectos de auto potencial que se ven reflejados por deflexiones negativas de dicha curva indicando aumento de permeabilidad en la roca (Pirson, 1977).

La desviación de la curva del SP puede ser hacia la izquierda (negativa) o hacia la derecha (positiva) dependiendo de las salinidades relativas del agua de formación y del filtrado de lodo.

El SP no se puede registrar en pozos llenos de lodos no conductores (base – aceite) debido a que dichos lodos no forman una conexión eléctrica entre el electrodo del SP y la formación. Si las salinidades (resistividades) del filtrado del lodo y del agua de formación son más o menos iguales, las deflexiones del SP serían pequeñas y la curva no presentaría casi variación.

6.1.2. Registro de Rayos Gamma

Es un registro que mide la radioactividad natural de las formaciones, es decir, la medida de la radiación que se emite espontáneamente. Es importante en la detección y evaluación de minerales como Potasio (K) y Uranio (U).

En formaciones sedimentarias el perfil de Rayos Gamma generalmente refleja el contenido de lutita de las formaciones (Bendeck, 1992). Esto se debe a que los elementos radiactivos se concentran principalmente en lutitas y arcillas.

Este registro es frecuentemente usado como sustituto del Registro de Potencial Espontáneo (SP) en los pozos entubados, donde es imposible obtener un SP, ó en pozos abiertos cuando el SP no es satisfactorio. En ambos casos es útil en la ubicación de capas no arcillosas y para correlaciones.

6.1.3. Registros de Resistividad

Teniendo en cuenta que la conductividad de la matriz es nula, la capacidad de la formación para transmitir corriente está en función de los fluidos que se encuentran dentro del espacio poroso y considerando que los hidrocarburos tampoco tienen propiedades conductivas, la capacidad de conducción queda a cargo del agua de formación.

Este tipo de registros, generalmente se corren a tres diferentes profundidades de investigación, las medidas de las cuales proporcionan las resistividades de formación, zona virgen y zona invadida (R_{xo} y R_t), que son los parámetros finalmente buscados (Bendeck, 1992).

6.2. ANÁLISIS DE PROCEDENCIA DE LOS SEDIMENTOS

En las últimas tres décadas, se han modificado los conceptos geológicos, particularmente con el advenimiento de la tectónica de placas, y se han propuesto una serie de criterios para relacionar la composición de las areniscas al contexto tectónico de las cuencas de depósito y de las áreas de aporte (por ejemplo

Dickinson y Suczek (1979). Es decir, a partir del tipo de partículas se infiere la fuente o procedencia de los sedimentos, y con base en el análisis estadístico de numerosas cuencas actuales, varios autores han propuesto una relación directa entre la composición del sedimento y el ambiente tectónico en que se forma.

Es importante mencionar que el relieve y las condiciones climáticas que controlan el intemperismo y grado de transporte, además de los procesos post-sedimentarios (diagénesis) pueden originar diferentes texturas y alterar la composición de los sedimentos aunque su roca fuente sea la misma, por lo que se hace indispensable reconocer estos procesos para evitar interpretaciones erróneas y se puede lograr identificando la mayor cantidad de propiedades de los sedimentos.

Las arenas son los sedimentos detríticos más utilizados en estudios de procedencia, ya que se originan como partículas sólidas que se desprenden de la roca pero a la vez son lo suficientemente pequeñas como para observar una muestra considerable de granos en una sección delgada.

La ventaja de las areniscas es que conservan la composición y textura original cuando están formadas por fragmentos líticos, a pesar del transporte y de los procesos diagenéticos estos están casi inalterados, además de que guardan información sobre la roca de la cual se derivaron.

Dickinson (1986) encontró una relación muy estrecha entre la composición de las areniscas y el ambiente tectónico al que se asocian las grandes cuencas sedimentarias donde se depositan (Figura 11). En general las areniscas derivadas de zonas continentales y depositadas en márgenes pasivas, zonas de rift intracontinental y cuencas cratónicas están compuestas de cuarzo y feldespato principalmente.

En el caso de las areniscas depositadas en las cuencas asociadas a cinturones de deformación están enriquecidas en cuarzo y líticos. En cambio, las cuencas

asociadas a arcos volcánicos, contienen areniscas con abundantes fragmentos feldespáticos y líticos (principalmente volcánicos y plutónicos) y menor cantidad de cuarzo.

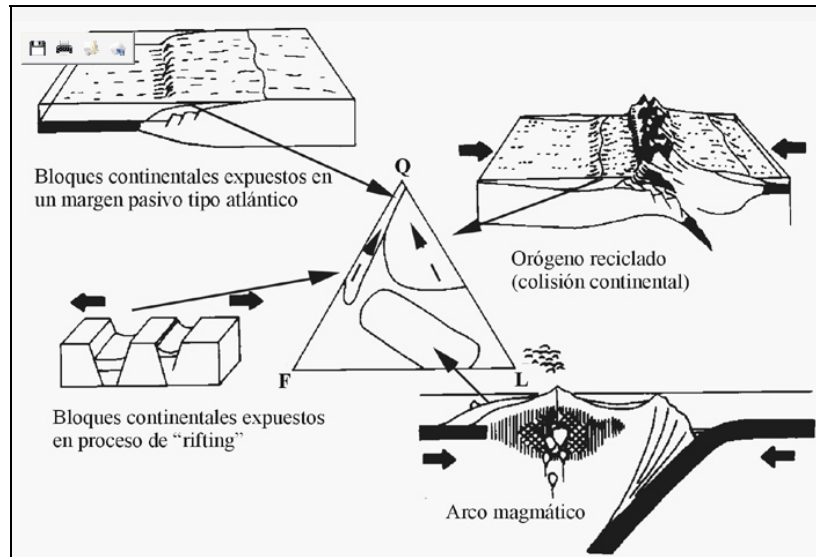


Figura 11. Contenido modal de las areniscas procedentes de diferentes ambientes tectónicos a partir de los diagramas QFL de Dickinson (1986). Q=cuarzo total; F=feldespatos monocristalinos totales. Las flechas discontinuas indican incremento de madurez. L=fragmentos líticos totales. Tomado de http://www.geologia.unam.mx/academia/temas/Procedencia/Image_8.jpg

En la Tabla 7 se muestra el tipo de procedencia, el ambiente tectónico y la composición de las areniscas, así, en la primera columna se describe la naturaleza de la fuente de aporte de los sedimentos, en la segunda columna se encuentra la relación con el ambiente tectónico al que se asocian las cuencas donde se depositaron y la última columna muestra una descripción más detallada de las características petrológicas de las areniscas (Dickinson 1985).

Tipo de procedencia	Ambiente tectónico	Composición de areniscas
Cratón estable	Plataforma estable o en el interior del continente	Areniscas cuarzosas (ricas en Qt) con altas relaciones Qm/Qp y K/P
Basamento levantado (<i>basament uplift</i>)	Borde de rift o ruptura transformante	Areniscas cuarzo feldespáticas (ricas en Qm y F) con bajas concentraciones de Lt y relaciones similares de Qm/F y K/P similares a las de la fuente de aporte
Arco magmático	Arco de isla o arco continental	Areniscas volcanoclásticas y feldespato líticas (ricas en F) con altas relaciones de P/K y Lv / Ls. Si están expuestas rocas plutónicas entonces las areniscas son cuarzo feldespáticas (ricas en Qm y F).
Orogeno reciclado	Complejos de subducción o cinturones de pliegues y cabalgaduras	Areniscas cuarzo líticas (ricas en Qt y Lt) con bajas concentraciones de F y Lv y relaciones variables de Qm / Qp y Qp / Ls

Tabla 7. Determinación de la procedencia y ambiente tectónico a partir de la composición QFL de las areniscas. Tomado de Dickinson (1985)

7. RESULTADOS DEL ESTUDIO

7.1. DESCRIPCIÓN DE NUCLEOS

7.1.1. Pozo Galán 1

Este pozo se encuentra ubicado en las coordenadas Gauss origen Bogotá N 1.275.197, E 1.020.115.

A continuación se presenta la descripción para la Formación Colorado en el intervalo de 829.36 – 1524.91 metros (2721 – 5003 pies) y en el Anexo 2 se puede observar la columna sedimentológica y en el Anexo 4 se encuentran las convenciones empleadas durante la descripción.

El tipo de roca es sedimentaria, clasificada como Arenitas, limolitas, Arcillas y Shales con colores abigarrados, grises verdosos, entre otros. En cuanto a la litificación, las areniscas se encuentran de friables a moderadamente duras y las arcillas y limos se encuentran firmes, el tamaño de los granos varían desde los más finos como arcilla hasta arenas muy gruesas ligeramente conglomeráticas en tendencias grano decrecientes (secuencias normales) y grano crecientes (secuencias inversas), la forma de los granos predominante es subangular – subredondeada, esféricos generalmente; el calibrado en las arenas es de moderado a bueno; las texturas y composiciones principales encontradas fueron

granos de cuarzo con brillo vítreo, granos de feldespato alterados a caolín, asociados a algunas arcillas más claras, fragmentos rocosos de diferentes tamaños (arena), en algunas ocasiones se encontraron líticos como micas moscovitas, y en menor proporción óxidos con brillo metálico (oscuros) y carbonatos (como material cementante); las estructuras sedimentarias como laminación y bioturbación se presentaron en las muestras con tamaños de grano más finos y se observaron fracturas abiertas en arenas hacia la base de esta Formación.

El cemento predominante en las muestras es silíceo y en menor proporción calcáreo, en muestras con considerable ausencia de cemento la Matriz es lodosa y arcillosa en algunos casos, la porosidad visual fue variable dependiendo de la clase de muestra, en arcillas y arenas muy finas cementadas fue de extremadamente pobre a trazas, en algunas de las arenas de grano medio a grano grueso las porosidades variaban desde buena a pobre en las más cementadas; los accesorios principales fueron los óxidos y micas moscovitas y en cuanto a las manifestaciones de aceite, se presentaron principalmente en las arcosas y subarcosas friables y moderadamente duras con tamaños de grano medios a gruesos, subangulares - subredondeados de moderado a bien calibrados, mostrando una leve impregnación.

A continuación se mencionan las profundidades donde se encontraron impregnación de hidrocarburos: 1129.89 – 1130.17 metros (3707 – 3707.9 pies), 1226.52 – 1226.82 metros (4024 – 4025 pies) y 1297.83 – 1298.38 metros (4258 – 4259.8 pies), todas con leve impregnación.

7.1.2. Pozo Galán 92

Este pozo se encuentra ubicado en las coordenadas Gauss origen Bogotá N 1.275.273, E 1.021.557.

A continuación se presenta la descripción para la Formación Colorado en el intervalo de 704.39 – 1120.14 metros (2311 – 3675 pies) y en el Anexo 3 y 3.1 se puede observar la columna sedimentológica y en el anexo 4 las convenciones empleadas.

El tipo de roca es sedimentaria, clasificada como Areniscas, Areniscas Conglomeráticas, Limolitas y Arcillolitas con colores café, gris, gris verdoso, entre otros. En cuanto a la litificación, las areniscas se encuentran de friables a moderadamente duras y los limos se encuentran firmes, el tamaño de los granos varían desde limos hasta arenas gruesas y ligeramente conglomeráticas con tendencias grano decrecientes (secuencias normales), la forma de los granos predominante es subangular – subredondeado, generalmente esféricos; el calibrado en las arenas es de moderado a bueno, en cuanto al aspecto, las texturas y composiciones principales encontradas fueron granos de cuarzo con brillo vítreo, granos de feldespato alterados a caolín, asociados a algunas arcillas más claras, en algunas ocasiones se encontraron micas moscovitas, y en menor proporción óxidos con brillo metálico (oscuros); se observó intraclastos ferruginosos alterados y lodosos; las estructuras sedimentarias como laminación y la bioturbación se presento en las muestras con tamaños de grano más finos, se observo fracturas abiertas a una profundidad de 972.31 metros, 1063.81 metros y 1116.18 metros (3190, 3490.2 y 3662 pies, respectivamente).

El cemento predominante en las muestras es silíceo, en muestras con considerable ausencia de cemento, la matriz es lodosa y arcillosa en algunos

casos; la porosidad visual fue variable dependiendo de la clase de muestra, en arcillas y arenas muy finas cementadas fue de extremadamente pobre a trazas; en algunas de las arenas de grano medio a grano grueso las porosidades variaban desde buena a pobre en las más cementadas, los accesorios principales fueron los óxidos y micas moscovitas; en cuanto a las manifestaciones de aceite, se presentaron principalmente en las arcosas y subarcosas friables de moderado a bien calibrados, mostrando una impregnación desde incipiente a buena, mientras que en la arcosa ligeramente conglomeráticas no hay impregnación de hidrocarburos.

Profundidades en las que se halló impregnación:

1022.3 – 1022.5 metros (3354 – 3354.7 pies): impregnación leve

1022.6 – 1023.4 metros (3355 – 3357.6 pies): impregnación desde moderada a buena

1063.75 – 1064.02 metros (3490 – 3490.9 pies): impregnación leve

1064.4 – 1064.73 metros (3492 – 3493.2 pies): impregnación leve

1072 – 1072.23 metros (3517 – 3517.8 pies): impregnación moderada

948.84 – 949.76 metros (3113 – 3116 pies): impregnación moderada a buena

970.18 -970.45 metros (3183 – 3183.9 pies): impregnación buena

970.8 – 970.9 metros (3185 – 3185.4 pies): impregnación leve

972.3 – 972.74 (3190 – 3191.4 pies): impregnación moderada a buena

992.73 – 993.34 metros (3257 – 3259 pies): impregnación moderada

7.2. DESCRIPCIÓN DE LITOFACIES

Se denomina facies al conjunto de características litológicas y paleontológicas que permiten diferenciar un conjunto de estratos o paquetes de otros. En su forma más simple es un término descriptivo que se puede mencionar como facies arenosas, facies arenosas con estratificación cruzada, facies lodosas etc. Sin embargo, puede usarse en sentido interpretativo, facies marinas, facies fluviales, facies de canal, facies de crevasse splay etc.

Con base en la descripción de núcleos de perforación de la Formación Colorado en los dos pozos (Anexos 2 y 3), se determina cada una de las litofacies teniendo en cuenta parámetros tales como estructuras físicas primarias (estratificación, laminación, etc.), estructuras orgánicas (fósiles, fragmentos vegetales, bioturbación), granulometría, color, composición, selección, etc., dando así una visión de las características del medio de depósito.

De acuerdo al análisis litológico general descrito anteriormente, se identificaron las siguientes litofacies.

7.2.1. Litofacies de Shl.: Shale con laminación plano paralela

Esta litofacies está constituida por Shale físil de color café-amarillo oscuro, con presencia de óxidos. Como estructuras se observa laminación plano paralela. Roca firme, con nula impregnación de hidrocarburos. El shale se acumula por suspensión en medios subacuáticos, tranquilos de baja energía. La laminación indica ausencia de organismos bioturbadores en el fondo de acumulación.

7.2.2. Litofacies de Shcl.: Shale calcáreo con laminación plano paralela.

La litofacies Shale calcáreo con laminación plano paralela (Shcl) ocurre hacia la base del intervalo corazonado en el Pozo Galán-1 (Figura 12) el cual corresponde a la Formación Mugrosa.

Esta litofacies está constituida por Shale compacto de color gris oscuro, con presencia de óxidos; como estructuras se observa laminación plano paralela, no presenta impregnación de hidrocarburos debido a sus características, las cuales corresponden a una roca sello.

El shale se acumula por suspensión en medios subacuáticos, tranquilos de baja energía. La laminación indica ausencia de organismos bioturbadores en el fondo de acumulación.



Figura 12. Shale fisil de color N1 a N2, con laminación plano paralela, calcáreo a ligeramente calcáreo, con presencia de pequeños nódulos de azufre.

7.2.3. Litofacies de FAp.: Arcillolita con desarrollo de paleosuelos

La litofacies de arcillolita con desarrollo de paleosuelos (FAp) ocurre en intervalos corazonados en los pozos Galán 1 y 92.

Litofacies constituida por arcillolitas moteadas, arcillolitas abigarradas y arcillolitas limosas moteadas de color gris claro a gris-oliva claro, rojo-púrpura pálido a grisáceo, café-rojo oscuro, café claro a moderado, naranja-amarillo oscuro, rojo oscuro a muy oscuro y café-amarillo moderado a oscuro. Localmente se observa oxidación, arcilla expansiva, óxidos e intraclastos carbonosos; secuencias uniformes, localmente granodecrecientes, la roca varía de friable a consolidada y no presenta impregnación. Dentro de las estructuras observadas hay desarrollo de paleosuelos, raíces, bioturbación no diferenciada y *Teichichnus*.

La arcilla se deposita por suspensión en medios subacuosos, tranquilos de baja energía. La bioturbación indica la presencia de fondos ricos en oxígeno y la bioturbación asociada con remanentes de plantas indica colonización o transporte de remanentes de plantas de zonas contiguas; conjuntamente el moteado y los vestigios de restos vegetales pueden estar asociados a una colonización de plantas con incipiente desarrollo de suelo, Pérez & Smith (1992). De acuerdo a la interpretación ambiental, ésta facies corresponde a depósitos de llanura de inundación con desarrollo de paleosuelos y exposición subaérea.

7.2.4. Litofacies de FLbp.: Limolita bioturbada con desarrollo de paleosuelos

La litofacies de limolita con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos (FLbp.) ocurre en los dos pozos descritos (Figura 13).

Litofacies constituida por limolitas, limolitas arenosas y limolitas arcillosas, moteadas y abigarradas de color gris, gris-oliva, café, café-rojo, café-amarillo, rojo, rojo-púrpura y naranja-amarillo, de grano muy fino a fino, subangular, buena calibración.

Localmente se presenta óxidos de hierro, intraclastos arcillosos, minerales opacos, arcilla expansiva; secuencias granodecipientes y localmente granocrecientes. Como estructuras se observa desarrollo de paleosuelos, Planolites, *Teichichnus*, raíces, bioturbación y madrigueras no diferenciadas, localmente laminación lenticular. La resistencia de la roca en esta facies varía de consolidada a friable, con nula impregnación de hidrocarburos.

El limo se acumula por disminución de la energía de transporte en medios subacuosos y con mayor rapidez que la arcilla debido a que su tamaño de grano es mayor. En algunos niveles, la presencia de moteamiento está asociada a bioturbación, Pérez & Smith (1992), lo cual indica fondos oxigenados.



Figura 13. Limolita varicoloreada 5R3/4, 10R2/2, 5R4/2 y 5YR5/6 con desarrollo de paleosuelo, al tope se presenta una subarcosa bien seleccionada.

En otros niveles esta litofacies corresponde a depósitos de paleosuelo, con exposición subaérea, mostrada en el moteamiento y la variedad de tonos de la roca; los vestigios de restos vegetales posiblemente están asociados a colonización del fondo por plantas o aporte de restos vegetales, Pérez & Smith (1992).

7.2.5. Litofacies de Al.: Arenisca lodosa.

La litofacies arenisca lodosa (AL) ocurre en el intervalo corazonado del pozo Galán-1. Constituida por areniscas lodosas (subarcosas y arcosas) de diferentes tonalidades de naranja, naranja-amarillo, café-amarillo, rojo-púrpura y gris; de grano muy fino a medio, subangular, localmente subredondeado, moderada a buena calibración y localmente muy buena selección. En la roca se observó cuarzo, feldespato y una matriz arcillosa. Presenta óxidos, minerales opacos, biotita, clorita, moscovita, intraclastos ferruginosos y lodosos, arcilla expansiva; secuencias uniformes, localmente granodecrescentes. Como estructuras se observa localmente bioturbación no diferenciada y algunas raíces. La resistencia de la roca en esta facies varía de consolidada a friable, con nula a ligera impregnación de hidrocarburos. De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de desborde de canales (*crevasse splay*).

7.2.6. Litofacies de Ab.: Arenisca bioturbada.

La litofacies arenisca bioturbada (Ab) ocurre en intervalos corazonados de los pozos Galán-1 y 92.

Litofacies constituida por areniscas (arcosas, subarcosas) de color gris-oliva claro, café-rojo oscuro y diferentes tonalidades de café-amarillo, café, rojo-púrpura,

naranja-amarillo y naranja; de grano muy fino a fino, localmente medio, subangular a subredondeado, buena a muy buena calibración, localmente pobre. Composicionalmente está formada por cuarzo, feldespatos, y una matriz arcillosa, también se observó moscovita, biotita, clorita, óxidos, minerales opacos, intraclastos y laminillas de arcilla, arcilla expansiva; secuencias granodecrecientes y en algunos sectores, granocrecientes. La resistencia de la roca varía de consolidada a friable, con impregnación de hidrocarburos que va de nula a moderada.

Como estructuras se observa bioturbación no diferenciada, *Teichichnus* y Planolites, localmente laminación *flaser*, desarrollo de paleosuelos y raíces. La presencia de moteamiento está asociada a bioturbación, lo cual indica fondos oxigenados, esta bioturbación sugiere colonización de organismos perturbadores del sedimento, Pérez & Smith (1992). De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de canal.

7.2.7. Litofacies de A.: Arenisca friable.

La litofacies arenisca friable (A) ocurre en intervalos corazonados de los pozos Galán-1 y 92.

Está constituida por areniscas y areniscas ligeramente lodosas de diferentes tonalidades de gris, gris-oliva, café-amarillo, café, café-rojizo, naranja y naranja-amarillento; de grano fino a medio, localmente grueso y muy fino, subangular a angular, localmente subredondeado, buena a moderada calibración, localmente pobre y muy buena. Composicionalmente se observo cuarzo, feldespato, óxidos, minerales opacos, clorita, biotita, moscovita, feldespato alterados a caolín, intraclastos y láminas arcillosas; con gradación inversa.

Como estructuras se observa, laminación *flasser* y bioturbación no diferenciada. La resistencia de la roca en esta facies varía de consolidada a suelta con nula a buena impregnación de hidrocarburos. De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de canal.

7.2.8. Litofacies de Acg.: Arenisca conglomerática

La litofacies arenisca conglomerática (Acg) ocurre en el pozo Galán 92. Está constituida por areniscas ligeramente conglomeráticas de color café-amarillo moderado a oscuro, gris y rojo terroso; de grano arena gruesa a media y guijos muy finos a medios, subangular a angular, moderada calibración; secuencias granodecrescentes. Composicionalmente está formada por cuarzo, feldespatos matriz arcillosa y accesorios. Presenta feldespatos alterados a caolín, arcilla expansiva e intraclastos. La resistencia de la roca varía de firme a friable sin impregnación de hidrocarburos.

La preservación de intraclastos lodosos indica que dichos sedimentos fueron transportados por flujos laminares no turbulentos, Shanmugan (1996). De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de canal.

7.2.9 Litofacies de Fl.: Limolita

Esta litofacies se presenta en galán 1 y 92; constituida por limolitas de color café-amarillo oscuro y limolitas arenosas de color rojo-púrpura a grisáceo, naranja pálido a grisáceo; de grano muy fino, subredondeado, con muy buena calibración. La roca presenta feldespatos, minerales opacos, localmente se observan óxidos (Figura 14); arcilla expansiva, intercalaciones de láminas arenosas; secuencias uniformes y laminación *flasser*. La roca es consolidada sin impregnación de hidrocarburos.

El limo se acumula por disminución de la energía de transporte en medios subacuáticos y con mayor rapidez que la arcilla debido a su mayor tamaño de grano. La laminación indica ausencia de organismos bioturbadores en el fondo de acumulación y la presencia de láminas arenosas, posiblemente está relacionada con depósitos producidos ocasionalmente por desborde de canales y lagos. De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de depósitos de lago.



Figura 14. Limolita de color grisáceo, con intercalaciones de láminas lodosas y presencia de óxidos

7.2.10 Litofacies de Ac.: Arenisca calcárea

Esta litofacies ocurre en el intervalo corazonado del pozo Galán-1. Está constituida por areniscas calcáreas de color gris; de grano fino, subangular a angular, buena a

muy buena calibración. Presenta cemento calcáreo, laminillas arcillosas, minerales opacos y clorita. La roca es consolidada y no presenta impregnación de hidrocarburos, la selección es buena y los granos son subangulares. Está litofacies se interpreta como depósitos de *crevasse splay*.

7.2.11 Litofacies de Arx.: Arenisca con relictos de estratificación cruzada

Esta litofacies se observa en el intervalo corazonado del pozo Galán 92. Está constituida por areniscas de color café pálido a moderado, café oscuro y naranja-grisáceo; de grano fino a medio, subangular a angular, buena a moderada calibración y secuencias granodecrecientes. La roca contiene cuarzo, feldespatos y una matriz arcillosa. Presenta moscovita, biotita, clorita, minerales opacos, feldespatos alterados a caolín, laminillas de feldespatos e intraclastos arcillosos. Como estructuras se observa relictos de estratificación cruzada en artesa y laminación *flaser*. La resistencia de la roca en esta facies varía de firme a friable, con nula impregnación de hidrocarburos.

Esta litofacies fue acumulada en un régimen hidrodinámico bajo, con poca persistencia de la energía durante la acumulación. La estratificación cruzada en artesa a pequeña escala es producto de la migración de pequeñas rizaduras de corriente, Reineck & Singh (1980), depositadas en un régimen de flujo bajo. Según Miall (1977), la estratificación cruzada en areniscas es producto de la migración de dunas o barras. De acuerdo a la interpretación ambiental, esta litofacies corresponde a depósitos de canal.

7.2.12. Litofacies de Arenisca lodosa con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos (ALbp)

Esta litofacies ocurre en Galán-1 y está constituida por areniscas lodosas de color gris-oliva claro y diferentes tonalidades de café-amarillo, rojo-púrpura, naranja-

amarillo y café-rojo; de grano muy fino a fino, subangular, buena calibración. Composicionalmente está formada por cuarzo, feldespatos, accesorios como moscovita; matriz arcillosa, por alteración de feldespato (posiblemente caolín). Presenta óxidos, minerales opacos, intraclastos arcillosos y arcilla expansiva; secuencias granodecrecientes. Como estructuras se observa desarrollo de paleosuelos, bioturbación no diferenciada y raíces, localmente laminación flasser. La resistencia de la roca varía de consolidada a friable, sin impregnación de hidrocarburos.

De acuerdo a la interpretación ambiental en las columnas estratigráficas de los intervalos corazonados, esta litofacies corresponde a depósitos de llanura de inundación.

7.3 ASOCIACIONES FACIALES

Para el análisis facial se agruparon las litofacies individuales descritas en la sección 7.2 en asociaciones faciales teniendo en cuenta la interpretación ambiental realizada para cada una. Esto permite hacer un mejor amarre registro roca teniendo en cuenta que en los registros se identificaron las mismas facies pero las cuales se llamaron electrofacies ya que son el producto de la interpretación de los registros eléctricos.

7.3.1. Asociación Facial 1

Esta asociación se interpreta como depósito de lago (tabla 8), consisten de sedimentos finos, arcillas y lodo, que han sido introducidos a los lagos laterales durante las épocas de inundaciones. Son comúnmente laminados, y pueden llegar a presentar restos de plantas, así como ostrácodos y moluscos de agua dulce.

Esta asociación consta de las facies de Fl, Shcl y Shl, teniendo en cuenta la presencia de condiciones anóxicas que generan la presencia de azufre como se observaba en la facie Shcl y fragmentos de carbón hallados en la facie Shl.

Tabla 8. Asociaciones facial 1 para la Formación Colorado.

FACIES	CARACTERISTICAS	AMBIENTE
Shcl	Shale calcáreo con laminación plano paralela	LAGO
Shl	Shale con laminación plano paralela	
Fl	Limolita	

7.3.2. Asociación facial 2

Esta asociación se interpretó como depósito de desborde de Canal (Crevasse Splay), ver tabla 9. Estos depósitos se generan cuando las aguas de la corriente principal logran romper los muros que la confinan, considerándose eventos de alta energía. La sedimentación por tracción y suspensión ocurre rápidamente cuando el agua cargada tanto con material grueso como fino, pierde su competencia en el transporte, dando como resultado depósitos gradados.

Los *crevasse splay* tienen cierto interés en la industria petrolera por sus facies arenosas, aunque no presentan mucha continuidad, los *crevasse splay* o desborde de canal corresponden a depósitos progradacionales identificados por la facies de arenas lodosas, y arenas con bioturbación en menor proporción. (ROJAS 2000).

Tabla 9. Asociaciones facial 2 para la Formación Colorado.

FACIES	CARACTERISTICAS	AMBIENTE
Ac	Arenisca calcárea	CREVASSE SPLAY
Al	Arenisca lodosa	

7.3.3. Asociación facial 3

Se interpretó como depósito de llanura de inundación (tabla 10), el cual está constituido por sedimentos finos depositados por suspensión a partir de las aguas que inundan la planicie adyacente al canal. Estos depósitos tienden a desarrollar poco espesor, y comúnmente contienen grandes cantidades de material vegetal; así mismo, presentan una bioturbación moderada, con características de depositación por suspensión y de bajo régimen.

Las facies de floodplain o de llanura de inundación representan ambientes de baja energía, donde el río toma control de la mayoría del valle. Estos son depósitos de tipo agradacional que corresponden a limolitas y arcillolitas de color gris verdoso representadas por las subfacies arcillolita, arcillolita bioturbada, limolita y limolita bioturbada. (ROJAS 2000).

Tabla 10. Asociaciones facial 3 para la Formación Colorado.

FACIES	CARACTERISTICAS	AMBIENTE
FLbp	Limolita bioturbada con desarrollo de paleosuelos	LLANURA DE INUNDACIÓN
Albp	Arenisca lodosa con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos.	
FAp	Arcillolita con desarrollo de paleosuelo	

7.3.4. Asociación facial 4

Esta asociación se interpretó como depósito de Canal (tabla 11). Son depósitos compuestos generalmente de material grueso que los ríos pueden mover o transportar durante los períodos de máxima competencia de las corrientes. Este material incluye gravas, troncos u otro material vegetal de grandes dimensiones, y lodo parcialmente consolidado que ha sido erosionado de las paredes del canal. Tienden a ser depósitos de forma lenticular, en donde lo más característico es la imbricación de clastos que presentan.

Estas facies son las más importantes en un yacimiento de hidrocarburos de origen fluvial, porque son cuerpos arenosos que pueden acumular mayor volumen de hidrocarburos gracias a su continuidad, los *channels sand* o arenas de canal, son depósitos de tipo agradacional compuestos por facies de arenas con estratificación cruzada. (ROJAS 2000).

En esta asociación se incluyeron las facies de Acg, Ab, A y Arx.

Tabla 11. Asociaciones facial 4 para la Formación Colorado.

FACIES	CARACTERISTICAS	AMBIENTE
Acg	Arenisca conglomerática	CANAL
Ab	Arenisca bioturbada	
A	Arenisca	
Arx	Arenisca con relictos de estratificación cruzada	

La asociación de facies shale con laminación plano paralela (Shl), arcillolita (FA), arcillolita con desarrollo de paleosuelos (FAp), limolita (FL), limolita con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos (FLbp), arenisca lodosa (AL), arenisca lodosa con bioturbación y/o desarrollo de paleosuelos (ALbp), arenisca friable (A),

arenisca bioturbada (Ab), arenisca con relictos de estratificación cruzada (Arx), arenisca conglomerática (Acg), y arenisca calcárea (Ac); permiten interpretar depósitos de lago, llanura de inundación, desborde de canal (*crevasse splay*) y canal, definiendo como ambiente de sedimentación para la Formación Colorado, un valle fluvial con amplios canales principales y tributarios, con el desarrollo de las facies asociadas a este ambiente.

8. ANALISIS PETROGRÁFICO

8.1. ANÁLISIS DE SECCIONES DELGADAS

Teniendo en cuenta que las secciones delgadas analizadas corresponden composicionalmente a rocas terrígenas y las compañías petroleras comúnmente usan la clasificación propuesta por Folk (1974), las cuatro secciones fueron analizadas bajo este punto de vista.

8.1.1 Galán 15 937.85 metros (3076.92 pies) de profundidad

El tamaño de las partículas en promedio es 0,46mm (arena media), granos esféricos a no esféricos, partículas de angulares a subredondeadas, mal calibrado, empaquetamiento Intermedio, no presenta matriz, cemento 15% (calcita y siderita), porosidad primaria 14%, el armazón está compuesto por cuarzo monocristalino (Qm 36%), cuarzo policristalino (Qp 20%), feldespato potásico (FK 26%), plagioclasa (P 10%) y otros líticos (8%); el cuarzo se caracteriza por presentar extinción predominantemente ondulosa 75% y extinción recta 25%. Clasificación composicional en la tabla 12 y fotografía representativa de la sección en la figura 15.

8.1.2. Galán 92 1023.19 metros (3356,92 pies) de profundidad

El tamaño de las partículas es 0,35mm (arena media), granos esféricos a granos no esféricos, partículas de angulares a subredondeadas, mal calibrado, empaquetamiento Intermedio, no presenta matriz, cemento 21% (calcita), porosidad primaria 11%, el armazón está compuesto por Qm 45%, Qp 11%, FK

13%, P 18% y otros líticos con el 13%, el cuarzo se caracteriza por presentar extinción predominantemente ondulosa 91% y extinción recta 8%. Clasificación composicional en la tabla 13 y fotografía representativa de la sección en la figura 16.

Tabla 12. Composición de la sección Galán 15 937.85 metros (3076.92 pies)

Clasificación Composicional: ARCOSA	
% Cuarzo Total	56
% Feldespato	36
% Fragmentos de roca	8
Total	100

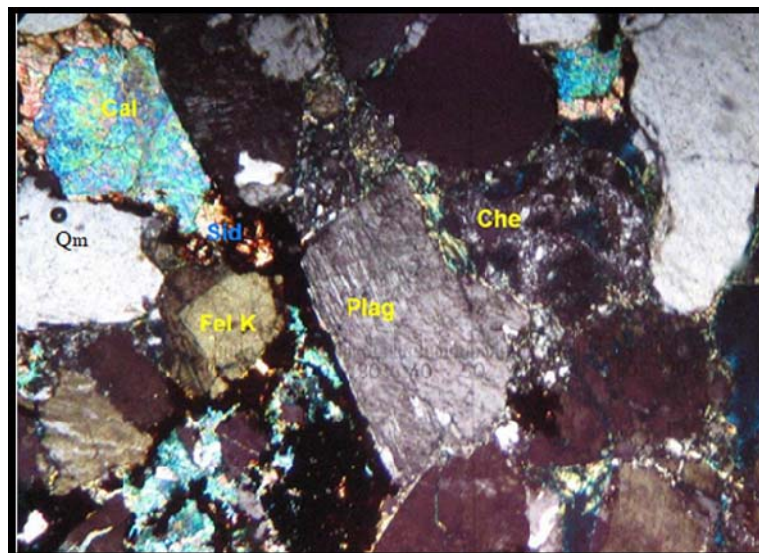


Figura 15. Fotografía con objetivo de 10X con nicoles cruzados. Se puede observar la calcita bien cristalizada (Cal), siderita alterando a goetita (Sid), chert (Che), cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico (Fel K) y plagioclasa (Plag).

Tabla 13. Composición de la sección Galán 92 1023.19 metros (3356.92 pies)

Clasificación Composicional: ARCOSA LITICA	
% Cuarzo Total	56
% Feldespato	31
% Fragmentos de roca	13
Total	100

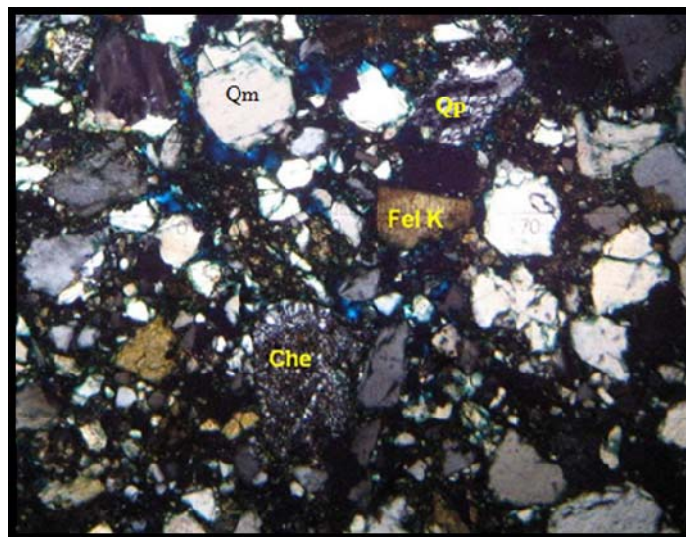


Figura 16. Fotografía con objetivo de 5X con nicoles cruzados. En esta imagen se muestra el cuarzo policristalino (Qp) con sus cristales internos orientados, cuarzo monocristalino (Qm), feldespato potásico (Fel K), y chert (Che), porosidad (tensión azul).

8.1.3. Llanito 30 1669.39 metros (5477 pies) de profundidad

El tamaño de las partículas es de 0,61mm (arena gruesa), granos esféricos a no esféricos, partículas angulares a subredondeadas, mal calibrado,

empaquetamiento intermedio, no presenta matriz, cemento 17% (calcita), porosidad primaria 12%, el armazón está compuesto por Qm 41%, Qp 10%, FK 19%, P 18% y otros líticos 12%; el cuarzo se caracteriza por presentar extinción predominantemente ondulosa 90% y extinción recta 10%. Clasificación composicional en la tabla 14 y fotografías representativas de la sección en la figura 17 y 18.

Tabla 14. Composición de la sección Llanito 30 1669.39 metros (5477 pies)

Clasificación Composicional: ARCOSA LITICA	
% Cuarzo Total	51
% Feldespato	37
% Fragmentos de roca	12
Total	100

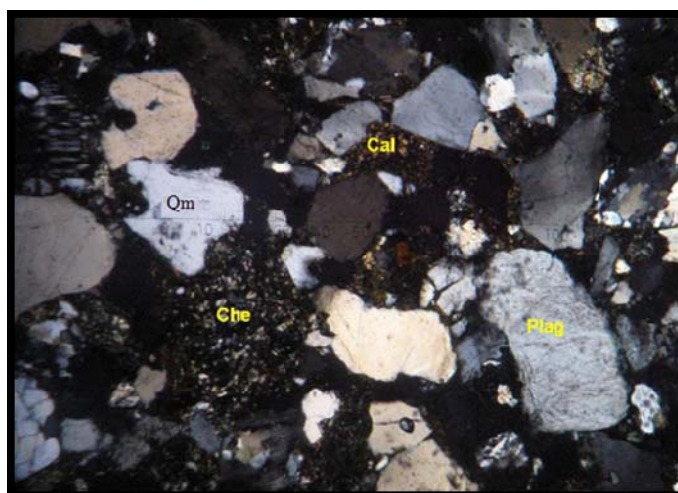


Figura 17. Fotografía con objetivo de 5X con nicols cruzados. Se observa chert (Che), cuarzo monocristalino (Qm) y plagioclasa (Plag) con cemento intersticial de calcita (Cal).



Figura 18. Fotografía con objetivo de 10X con nicols cruzados. Vemos cuarzo policristalino (Qp) con contactos suturados, un cuarzo policristalino con cristales orientados en la parte interior, chert (Che) y plagioclasa (Plag).

8.1.4. Llanito 30 a 1667 metros (5502 pies) de profundidad

El tamaño de las partículas es de 0,42mm (arena media), granos esféricos con a granos no esféricos, partículas angulares a subredondeadas, mal calibrado, empaquetamiento intermedio, no presenta matriz, cemento 9% (calcita), porosidad primaria 8%, el armazón está compuesto por Qm 26%, Qp 7%, FK 26%, P 28% y otros líticos 13%; el cuarzo se caracteriza por presentar extinción predominantemente ondulosa 76% y extinción recta 24%. Clasificación composicional en la tabla 15 y fotografía representativa de la sección en la figura 19.

Tabla 15. Composición de la sección Llanito 30 a 1677 metros (5502 pies)

Clasificación Composicional: ARCOSA LITICA	
% Cuarzo Total	33
% Feldespato	54
% Fragmentos de roca	13
Total	100

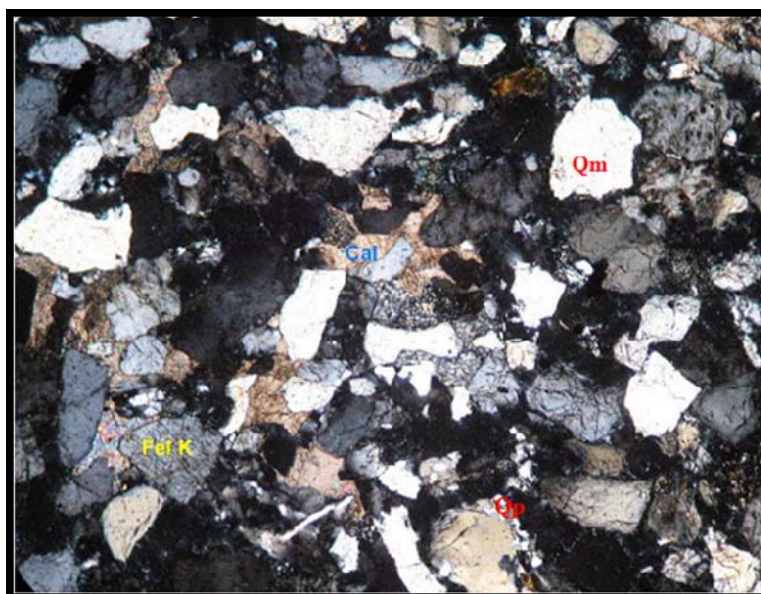


Figura 19. Fotografía con objetivo de 5X con nicols cruzados. Se puede ver la presencia de calcita como cementante (Cal) que ocupa todo el espacio entre granos, cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp) y feldespato potásico (Fel K).

De forma general, las rocas descritas presentan contacto de tipo longitudinal y otros puntuales pero generalmente con granos de menores tamaños en los intersticios, la roca es grano soportada ya que el armazón representa aproximadamente entre el 70% y el 83% de la roca y en cuanto al cemento, se observó que en las dos secciones del pozo Llanito 30 y Galán 92 se halló calcita y en la muestra Galán 15 calcita y siderita. Las muestras presentan granos que van desde angulares a subredondeadas y debido a que están mal calibradas se consideran texturalmente rocas submaduras, así mismo presentan porosidades entre 8 y 14%.

8.2 ANÁLISIS DE PROCEDENCIA

Una vez diferenciados los distintos componentes detríticos descritos en la metodología, estos fueron representados en el diagrama ternario de la figura 19 mostrando los resultados obtenidos. En las tablas 16, 17, 18 y 19 se muestran los datos recalculados para cada una de las secciones, donde la nomenclatura empleada significa: Qt es el cuarzo total, que corresponde a la suma de cuarzo mono y policristalino; F es el feldespato, corresponde a la suma de feldespato potásico y plagioclasa; y la L corresponde a líticos.

8.2.1. Galán 15 a 937.85 metros (3076.92 pies) de profundidad

En esta sección se pudo observar que hay mayor concentración de cuarzo con extinción predominantemente ondulosa (75%) y extinción recta (25%).

Tabla 16. Componentes recalculados para Galán 15 a 937.85 metros (3076.92 pies). (Serrano, 2007)

Porcentajes Recalculados	
% Cuarzo Monocristalino	36
% Cuarzo Policristalino	20
% Feldespato K	26
% Plagioclasa	10
% otros líticos	8
Total	100

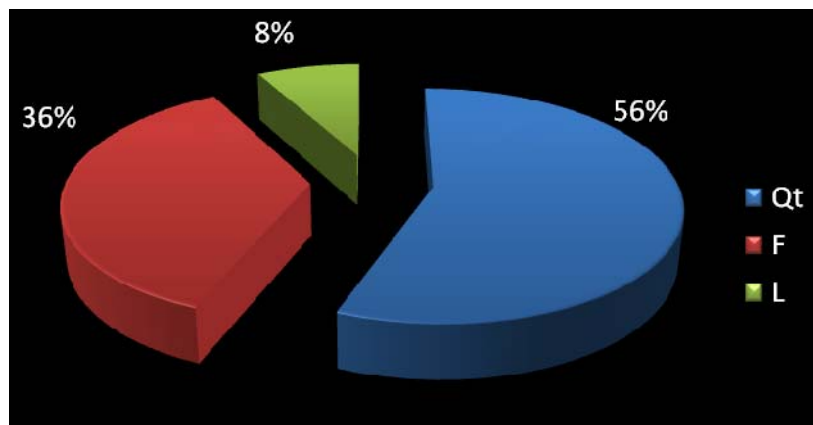


Figura 20. Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)

8.2.2. Galán 92 a 1022.9 metros (3356 pies) de profundidad

En esta sección se pudo observar que hay mayor concentración de cuarzo con extinción predominantemente ondulosa (91%) y extinción recta (8%).

Tabla 17. Componentes recalculados para Galán 92 a 102.9 metros (3.356 pies). (Serrano, 2007)

Porcentajes Recalculados	
% Cuarzo Monocristalino	45
% Cuarzo Policristalino	11
% Feldespato K	13
% Plagioclasa	18
% otros líticos	13
Total	100

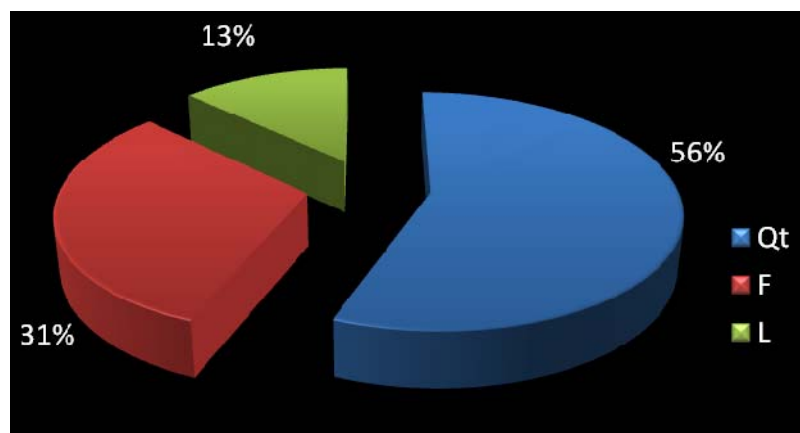


Figura 21. Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)

8.2.3 Llanito 30 a 1669.39 metros (5.477 pies) de profundidad

El predominio de cuarzo también es notorio en esta sección, caracterizado por tener una extinción predominantemente ondulosa 90% y extinción recta 10%.

Tabla 18. Componentes recalculados para Llanito 30 a 1669.39 metros (5477 pies). (Serrano, 2007)

Porcentajes Recalculados	
% Cuarzo Monocristalino	41
% Cuarzo Policristalino	10
% Feldespato K	19
% Plagioclasa	18
% otros líticos	12
Total	100

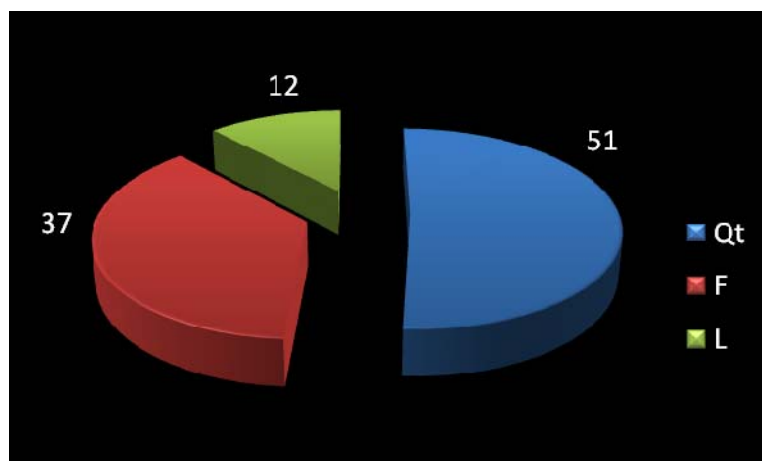


Figura 22. Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)

8.2.4 Llanito 30 1677 metros (5502 pies) de profundidad

En esta sección el cuarzo deja de ser el componente mayor pero sigue conservando mayor predominio de extinción ondulosa (76%) frente a la extinción recta (24%).

Tabla 19. Componentes recalculados para Llanito 30 1677 metros (5502 pies). (Serrano, 2007)

Porcentajes Recalculados	
% Cuarzo Monocristalino	26
% Cuarzo Policristalino	7
% Feldespato K	26
% Plagioclasa	28
% otros líticos	13
Total	100

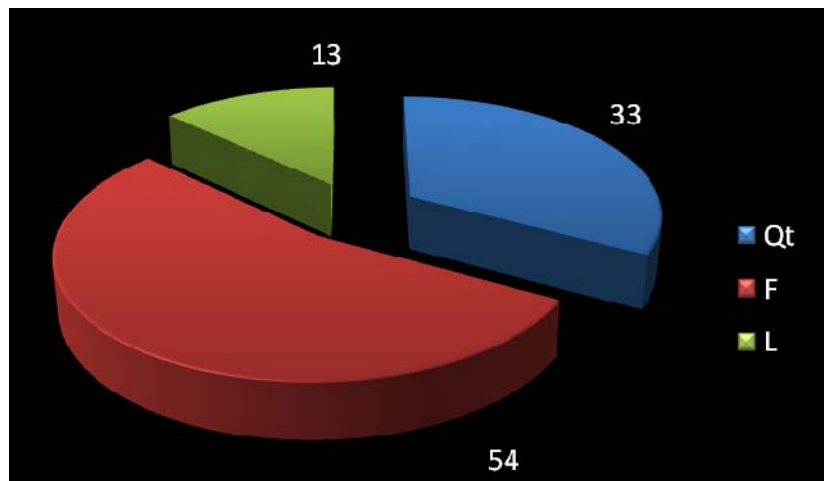


Figura 23. Representación grafica de los componente hallados. (Serrano, 2007)

De acuerdo a los resultados obtenidos se procedió a ubicar los datos en el diagrama ternario propuesto por Dickinson (1985) como se muestra a continuación (Figura 18).

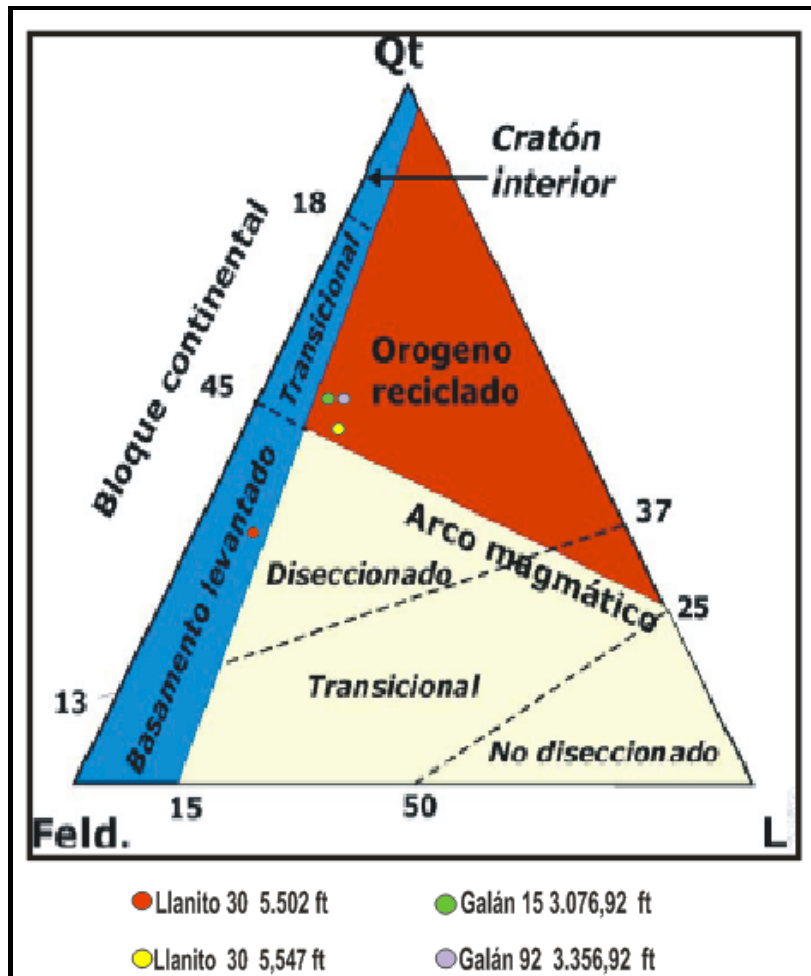


Figura 24. Ubicación de la secciones analizadas en el triángulo de campos composicionales de arenas derivadas de diferentes tipos de proveniencia (Dickinson, 1985). Datos graficados de Serrano, 2007.

Dickinson y Suczek (1979) y Dickinson (1985) distinguen cuatro entornos bien definidos: cratones estables, basamentos levantados, arcos magmático y orogenos reciclados (complejos de subducción, orogenos de colisión y entornos *foreland* traseros a márgenes activos), en los cuales la composición modal de las arenas presenta características diferenciadas.

Los datos graficados indican una fuente de orogeno reciclado, en donde la caracterización de orógeno reciclado, en el sentido de Dickinson y Suczek (1979), para el entorno geotectónico en que tuvo lugar el depósito de las arenas oligocenas aparece sustentado por la composición modal de éstas.

Pero para dar mayor confiabilidad a los resultados teniendo en cuenta que solo se describieron 4 secciones se decidió tomar los datos de Badillo (1996) quien realizó un estudio petrográfico en el Valle Medio del Magdalena para siete secciones pertenecientes al campo La Cira. En el siguiente diagrama (Figura 19) están ubicadas las secciones analizadas por los dos estudios.

Como se puede observar en la Figura 25, el 91% de las muestras cae en un ambiente tectónico de orogeno reciclado, mientras que una sola muestra (9%) aparece aislada en un ambiente de basamento levantado. Sin embargo tenemos la mayoría de los datos ubicados en una área fuente específica; el predominio de fragmentos líticos sedimentarios (chert) y metasedimentarios es un rasgo típico de las arenas de procedencia de orogenos reciclados, en los que el área fuente consiste en formaciones sedimentarias más o menos metamorfizadas, con posible presencia local de rocas plutónicas y volcánicas, intensamente plegadas, fracturadas y ascendidas (Dickinson y Suczek, 1979).

Para tener mayor certeza de que las arenas en estudio corresponden a áreas fuentes de tipo ígneo o metamórfico, se aplicó otra metodología donde solo se tienen en cuenta los tipos de cuarzo hallados en las muestras.

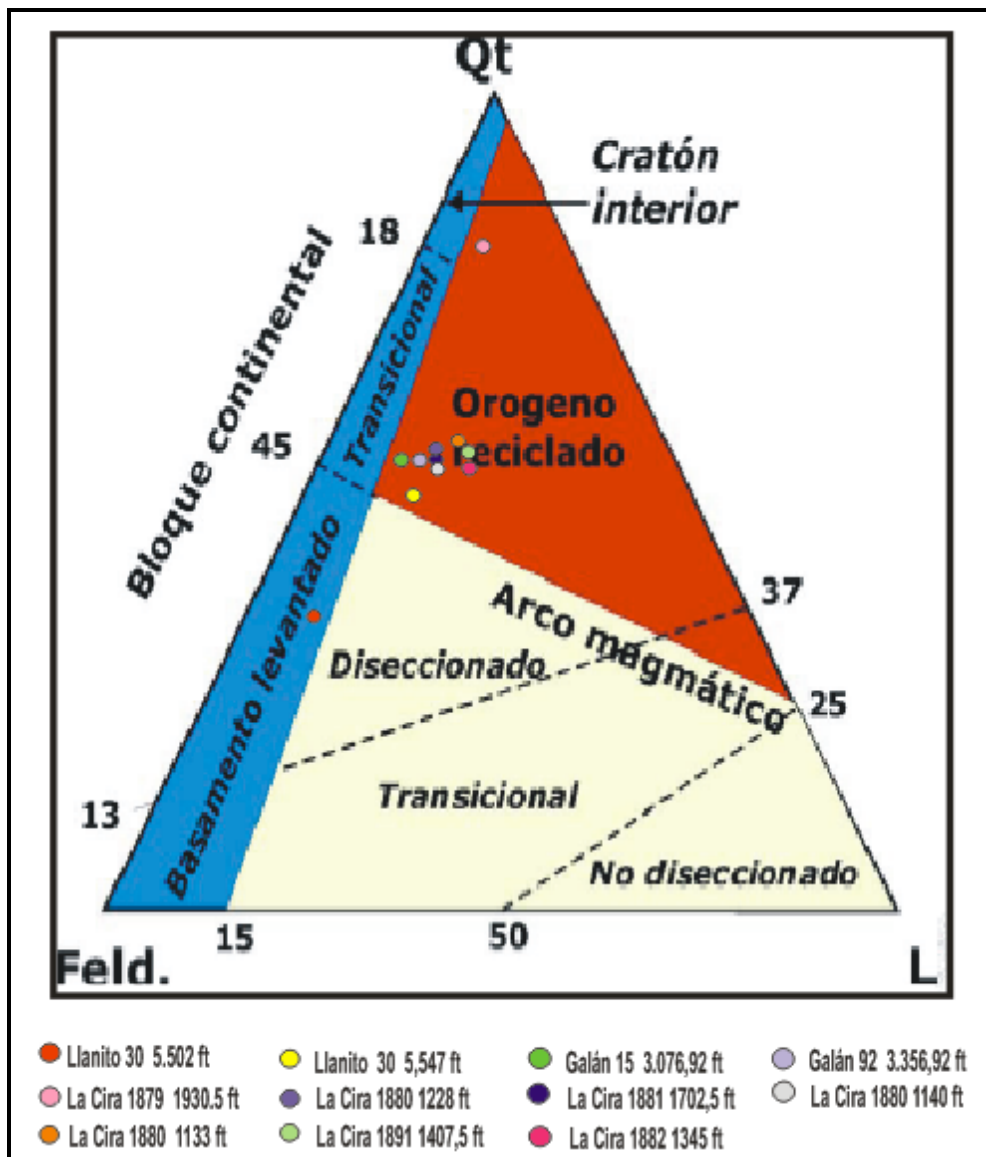


Figura 25. Triangulo de campos composicionales de arenas derivadas de diferentes tipos de proveniencia (Dickinson, 1985). Todas las secciones de la Cira corresponden a Badillo (1996) y las de Llanito y Galán corresponden a Serrano (2007).

8.3. TIPOLOGÍA DE LOS GRANOS DE CUARZO

De acuerdo a lo manifestado en los trabajos de Basu *et al.* (1975) y Basu (1976), las distintas tipologías de cuarzo son indicativas de la procedencia de las arenas que contienen dichos granos, permitiendo las proporciones relativas de los distintos tipos de cuarzo, diferenciar arenas procedentes de rocas plutónicas y metamórficas de alto y bajo grado.

En la siguiente tabla, se muestran los porcentajes hallados para Qo (cuarzo con extinción ondulosa), Qr (cuarzo con extinción recta) y Qp (cuarzo policristalino).

Tabla 20. Porcentajes de cuarzos hallados en cada una de las secciones.

	G15 a 937.56 metros (3076 pies)	G92 a 1022.9 metros (3356 pies)	LI 30 a 1669.39 metros (5477 pies)	LI 30 a 1677 metros (5502 pies)
Qr	21	7	9	22
Qo	62	83	82	71
Qp	17	10	9	7
Total %	100	100	100	100

La proyección, en el diagrama propuesto por Basu (1976), de los distintos tipos de cuarzo reconocidos, se efectúa en el triángulo que se muestra a continuación (Figura 26), donde se observa que todas las muestras se clasifican como rocas metamórficas de bajo grado.

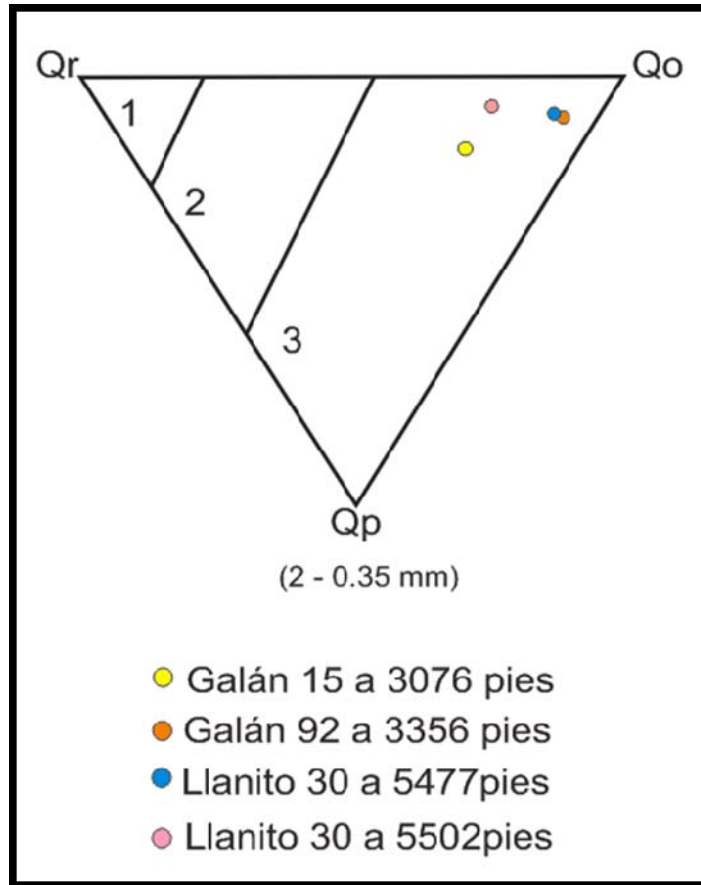


Figura 26. Proyección de las muestras estudiadas en el diagrama propuesto por Basu *et al.* (1975).
 1. Rocas plutónicas. 2. Rocas metamórficas de grado medio-alto. 3. Rocas metamórficas de bajo grado.

En el diagrama se puede observar la mayor proporción de cuarzos monocristalinos en los tamaños estudiados (>0,35 mm). Ello se explica por la mayor inestabilidad y menor resistencia al transporte de los cuarzos policristalinos en relación a los monocristalinos (Harrel y Blatt, 1978; Mack, 1978), de ahí que durante el transporte los cuarzos policristalinos tiendan a fragmentarse en sus componentes monocristalinos.

La existencia de cuarzo policristalino con cristales orientados y con contacto suturado, nos señala como posible fuente una roca metamórfica de bajo grado

posiblemente de la Cordillera Central teniendo como consideración lo expuesto en el marco geológico regional por Montgomery (1992) donde se habla del levantamiento de dicha cordillera en el Eoceno donde además autores como Cooper (1995) señalan que en el periodo del Eoceno al Mioceno temprano la cuenca era de tipo *Foreland*, la cual se rellenó de sedimentos cuya depositación fue controlada por el levantamiento de la Cordillera Central con vergencia tectónica hacia el Este y hacia la base de esta secuencia se presenta la discordancia regional del Eoceno y la mega secuencia depositada sobre esta, la cual involucra rocas fluviales de las formaciones la Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado donde además se dice que la principal fuente de sedimentos fue la cordillera Central, el Macizo de Santander y los paleoaltos de La Cira y Cáchira. (Cooper, 1995).

De acuerdo a la clasificación de Folk (1974), las rocas se clasificaron como Arcosas y Arcosas Líticas, lo cual indica rocas constituidas principalmente por arenas ricas en feldespatos y fragmentos de roca respectivamente; y relacionando los resultados hallados con la metodología de Dickinson observamos que los sedimentos provienen de un orogeno reciclado que contienen alto contenido cuarzo con extinción ondulosa y feldespatos lo que podría coincidir con la propuesta de que los sedimentos provienen de la cordillera central y no de la oriental, la cual hubiese apartado en ese momento su cobertera sedimentaria, por lo tanto las muestras presentarían otra composición.

9. ANALISIS DE REGISTROS ELECTRICOS

El análisis de los registros eléctricos se realizó para 34 pozos del campo Galán ubicados como se muestra en la Figura 7, enfocando tres aspectos principales, el primero corresponde al amarre registro – roca para los núcleos descritos; el segundo corresponde a las correlaciones estratigráficas y el tercero a los mapas de electrofacies realizados para la Formación Colorado.

La interpretación del ambiente depositacional puede realizarse de acuerdo a la forma del registro junto con la descripción del corazón, por ejemplo una forma de campana en la curva de potencial espontáneo (SP) indica depósitos de canal, que solo se puede comprobar con la información de los núcleos de perforación; aunque la forma del registro no es información suficiente para reflejar directamente los tipos de facies, es una herramienta a tener en cuenta especialmente cuando no se tiene núcleos en buen estado de preservación o si no los hay.

9.1. AMARRE REGISTRO – ROCA

El amarre registro - roca inicialmente pretendía llevarse a cabo con el *registro gamma ray*, pero debido a que no fue posible conseguirlo, se optó por comparar lo descrito en los núcleos de perforación con las electrofacies halladas en la interpretación de los registros de potencial espontáneo (SP) ya que con este se puede identificar litologías y permitió llevar a cabo la comparación entre este y la descripción sedimentológica.

Debido a que los núcleos descritos presentan muchos gaps, la comparación se llevo a cabo por secciones, es decir se mostrara la sección del núcleo descrito y al frente la sección del registro que le corresponda teniendo en cuenta la profundidad.

Los colores que aparecen en la interpretación del registro (parte izquierda de las figuras) indican depósitos de canal (amarillo), floodplain (gris) y crevasse splay (naranja) y las convenciones para la litología que aparecen del lado derecho se pueden ver en el anexo 4.

GALÁN 92

A continuación se presentan algunas secciones del amarre registro roca.

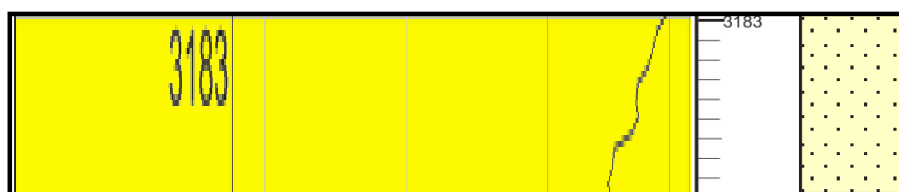


Figura 27. El registro SP indica una arena corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una subarcosa de grano medio a una profundidad de 970.18 a 970.45 (3183 a 3183.9 pies) indicando depósito de canal.

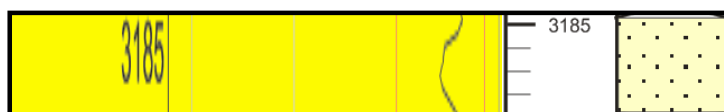


Figura 28. El registro SP indica una arena corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una subarcosa de grano grueso a una profundidad de 970.8 a 970.9 metros (3185 a 3185.4 pies) indicando depósito de canal.



Figura 29. El registro SP indica un sedimento fino como shale y en la descripción sedimentológica se identifico una limolita arenosa a una profundidad de 1021.38 a 1021.6 metros (3351 a 3351.7 pies).



Figura 30. El registro SP indica un sedimento fino como shale pero en la descripción sedimentológica se identifico una subarcosa de grano fino a una profundidad de 1022.3 a 1022.5 metros (3354 a 3354.7 pies).



Figura 31. El registro SP indica un shale o sedimentos finos; la descripción sedimentológica indica una arcillolita a profundidad de 1025 a 1025.16 metros (3363 a 3363.4 pies) indicando depósito de llanura de inundación.

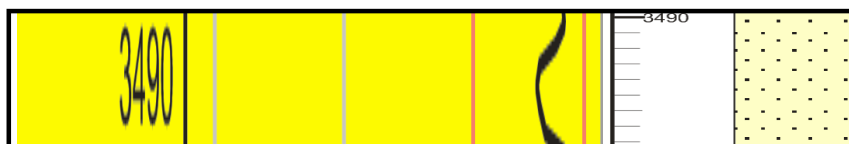


Figura 32. El registro SP indica una arena, corroborada con la descripción sedimentológica que la clasifica como una arcosa de grano medio a una profundidad de 1063.75 a 1064.03 metros (3490 a 3490.9 pies) indicando depósito de canal.

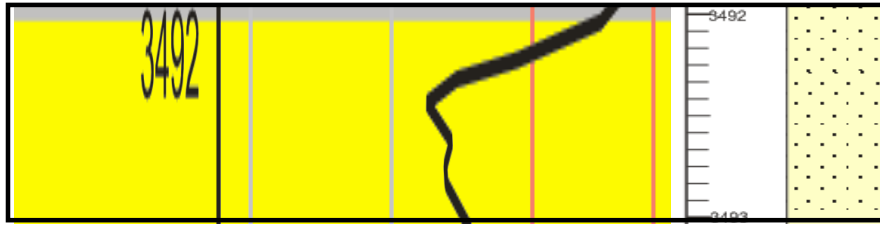


Figura 33. Se observa el registro SP indicando una arena y la descripción sedimentológica una arcosa de grano fino a una profundidad de 1064.36 a 1064.73 (3492 a 3493.2 pies) indicando depósito de canal.

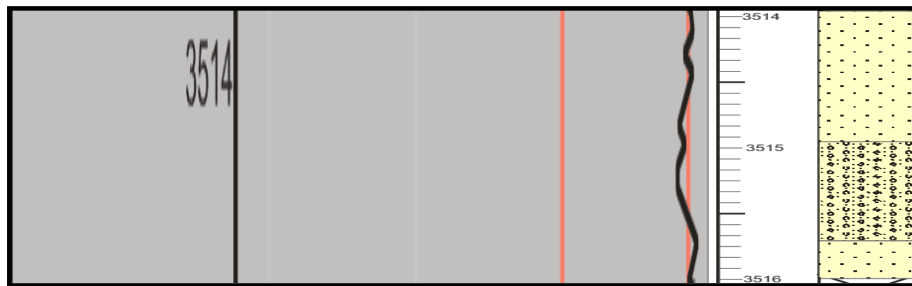


Figura 34. Se observa el registro SP indicando un sedimento fino y la descripción sedimentológica una arcosa de grano medio a fino a una profundidad de 1071.07 a 1071.68 metros (3514 a 3516 pies).

GALÁN 1

A continuación, algunas secciones del amarre registro - roca.



Figura 35. El registro SP indica arenas pero en el núcleo se describió una arcillolita a una profundidad de 861.36 a 862.28 metros (2826 a 2829 pies).



Figura 36. Como se observa en la figura, el registro SP indica arenas y sedimentos finos, lo cual se corrobora con la descripción del núcleo, al tope una subarcosa lodosa y hacia la base una arcillolita a una profundidad de 1014.37 a 1015.29 metros (3328 a 3331 pies).

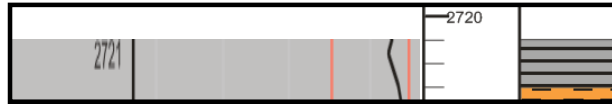


Figura 37. El registro SP indica sedimentos finos, corroborado con la descripción sedimentológica, en la cual se identifico de base a techo, un shale calcáreo y una arcillolita hacia la base a una profundidad de 829.36 a 830.28 metros (2721 a 2724 pies).



Figura 38. El registro SP indica sedimentos finos, corroborado con la descripción sedimentológica en la que se identifico una limolita arenosa a una profundidad de 1092.7 a 1093 metros (3585 a 3586 pies).



Figura 39. El registro SP indica arenas, corroborado .con la descripción sedimentológica en la que se identifico una arcosa a una profundidad de 1226.5 a 1226.8 metros (4024 a 4025 pies).



Figura 40. El registro SP indica arenas, corroborado con la descripción sedimentológica en la que se identifico una subarcosa lodosa a una profundidad de 1297.8 a 1298.4 metros (4258 a 4259.8 pies).

De acuerdo al respectivo amarre registro – roca, se pudo establecer que el registro es confiable (aproximadamente 80%) ya que de las catorce comparaciones realizadas, solo tres no coinciden con lo descrito en los núcleos; esto es de gran utilidad para establecer con tranquilidad las electrofacies de los 32 pozos restantes que serán empleadas para realizar los mapas de electrofacies que se verán más adelante.

9.2. CORRELACIONES ESTRATIGRAFICAS

Se realizaron siete correlaciones en total, cuatro en sentido NE-SW y tres en sentido NW – SE (Figura 7) con el fin de ver la orientación de los canales y si están interconectados o no; para este ítem se utilizó el registro de potencial espontáneo (SP) presente en todos los pozos y se tomó como datum la Cira Shale considerado buen marcador litológico y eléctrico en el Valle Medio del Magdalena.

9.2.1. Transversa A – A'

Está conformada por los pozos G2, G70, G71, G74, G76, G80 y G82. (Ver anexo 5); se observa un buen desarrollo de canales hacia las zonas A3 y A4 y presentan muy buena continuidad lateral, tanto los niveles de arcilla como los paquetes de arena se pueden seguir en esa zona; sin embargo se observan zonas donde se acuñan, especialmente entre las zonas de colorado A2 y A3.

9.2.2. Transversa B - B'

Está conformada por los pozos G1, G11, G4, G85, G83 y G86. (Ver anexo 6). Se observa acuñamiento hacia la parte inferior de Galán 11 y entre Galán 83 – 86 entre colorado A1 y A2. En la parte superior de toda la correlación, la secuencia de arenas disminuye y tiene menos continuidad lateral; las zonas comprendidas entre la Cira Shale y colorado A2 e incluso hasta la parte media de colorado A3 presenta mayor contenido de arcillas en los pozos 1 – 11 – 4, mientras que en los pozos 85 – 83 – 86 desde colorado A3 y todo colorado A4 presenta mayor desarrollo de canales y continuidad lateral como se observa en la figura 41.

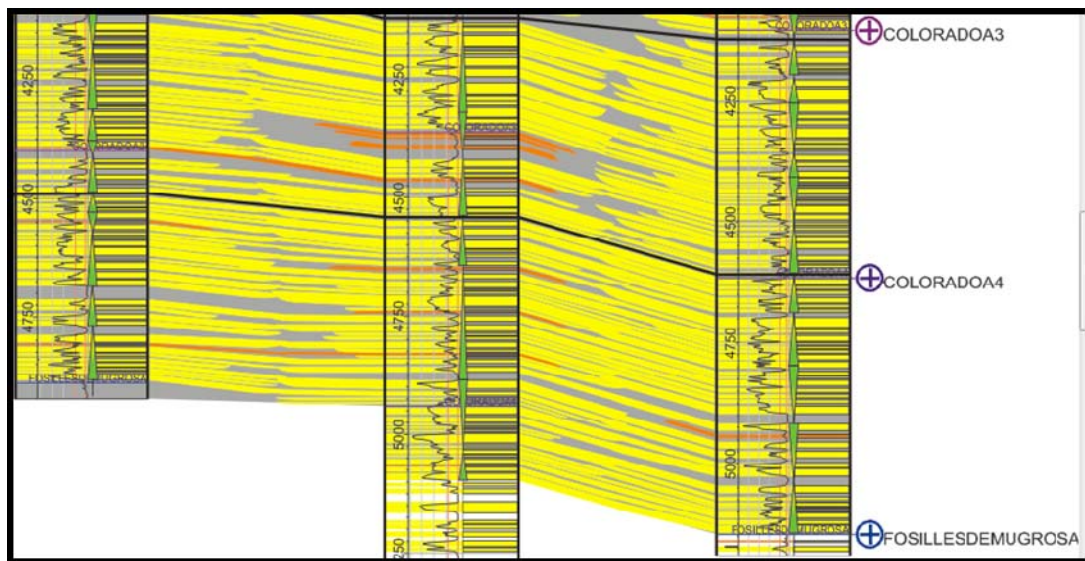


Figura 41. Evidencias del buen desarrollo de canales y continuidad lateral para las zonas de colorado A3 y A4.

9.2.3. Transversa C - C'

Está conformada por los pozos G3, G15, G92, G100 y G54. (Ver anexo 7). Se observa dominio de arcillas en toda la correlación; el desarrollo de canales es muy pobre y hay zonas de *crevasse splay* que podrían denominarse complejos de *crevasse splay* (Figura 42).

Debido al poco desarrollo de canales y a la falta de continuidad de los mismos, esta área no es recomendada para realizar perforaciones.

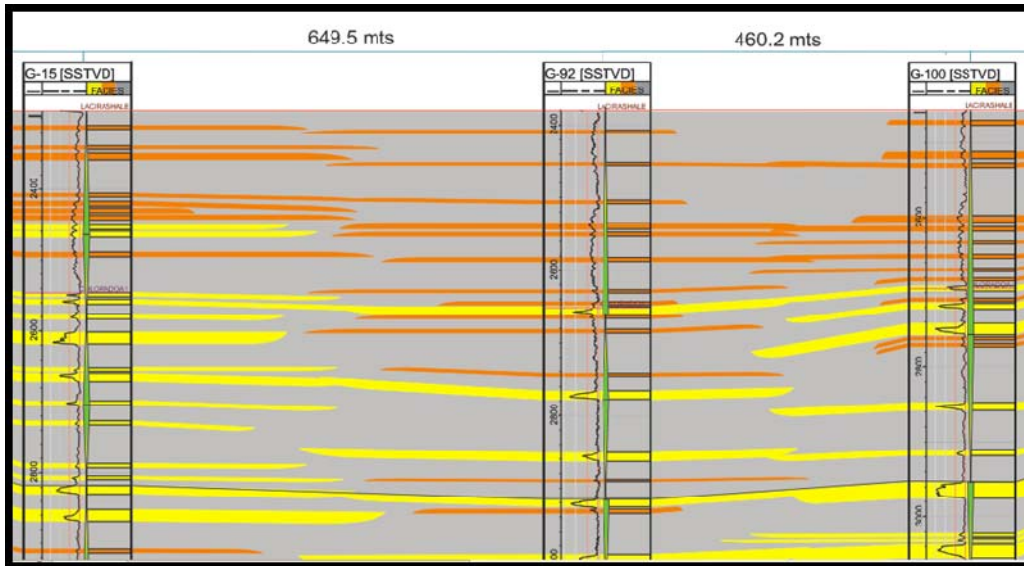


Figura 42. En la parte superior se observa una zona denominada complejo de *crevasse splay* (zonas de color naranja), así como el dominio de arcillas en la zona.

9.2.4. Transversa D – D'

Está conformada por los pozos G38, G43, G45, G49, G109 y G111. (Ver anexo 8). Se mantiene la tendencia de la correlación anterior, donde hay mayor dominio de las arcillas, pobre desarrollo de canales y desarrollo de complejos de *crevasse splay*, especialmente en la parte superior; sin embargo, hacia la base de la correlación, en la zona de colorado A2 ya hay un mayor desarrollo de canales comparada con la anterior correlación, pero con baja continuidad lateral.

Las transversas E-E', F-F' y G-G' tienen una orientación NW – SE como se indica en la Figura 7, trazadas con las líneas de color amarillo.

9.2.5. Transversa E – E'

Está conformada por los pozos G2, G14, G15, G43. (Ver anexo 9). Entre Galán los tres pozos finales se observa buen desarrollo de canales, especialmente hacia la base, presentado buena continuidad lateral pero los canales tienen poco espesor 0.762 – 2.286 metros (2.5 – 7.5 pies) sin embargo se observan canales con espesores entre 3.048 – 3.81 (10 y 12.5 pies). Hacia el tope de la correlación la cantidad y continuidad lateral de las arenas disminuye.

9.2.6. Transversa F – F'

Está transversa esta dividida en dos secciones A y B debido a un error en el momento de extraer los registros del software PETREL a COREL con respecto a las escalas de los pozos, por esta razón se trabajó la correlación en dos secciones; la sección A está conformada por los pozos G70, G4, G12 demarcado cada 7.6 metros (25 pies), mientras que la sección B involucra los pozos G92, G49 y G114 esta demarcada cada 6 metros (20 pies). (Ver anexo 10).

En la sección A se observa un buen desarrollo de canales pero con poca continuidad lateral en la parte superior; mientras que hacia la base se observa más continuidad lateral de los canales como se aprecia en la Figura 43.

En la sección B se observa un pobre desarrollo de canales y poca continuidad lateral; en la zona predominan las arcillas y hay una escasa presencia de canales y de *crevasse splay* (Figura 44).

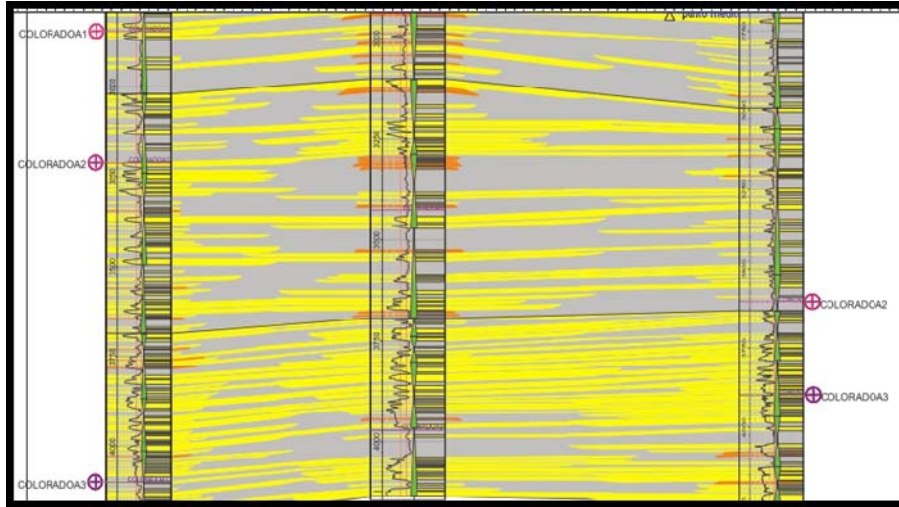


Figura 43. Buen desarrollo y continuidad lateral de los canales en la sección A, en la parte inferior de la correlación.

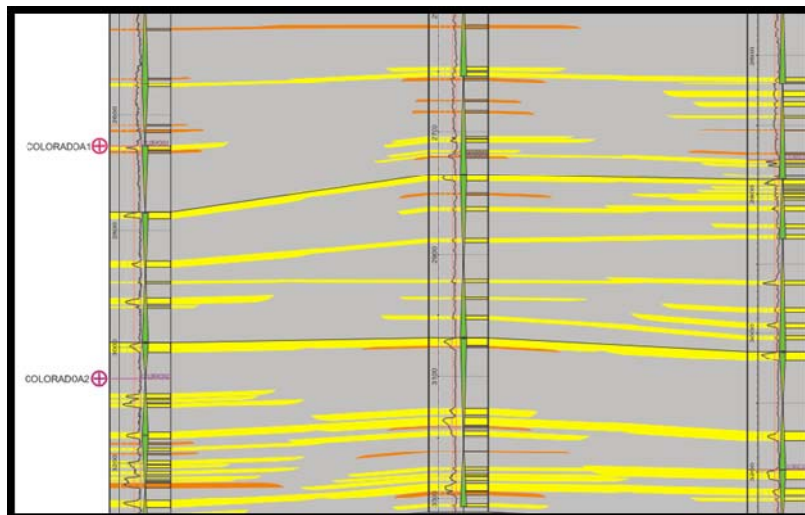


Figura 44. Pobre desarrollo y continuidad lateral de los canales en la sección B.

9.2.7. Transversa G – G'

Está conformada por los pozos G71, G85, G37, G100, y G113 (Ver anexo 11)
Hacia el SE, se observa un desarrollo de canales moderado pero con poca

continuidad lateral, la presencia de *crevasse splay* es muy escasa y siguen predominando las arcillas como se puede ver en la figura 45.

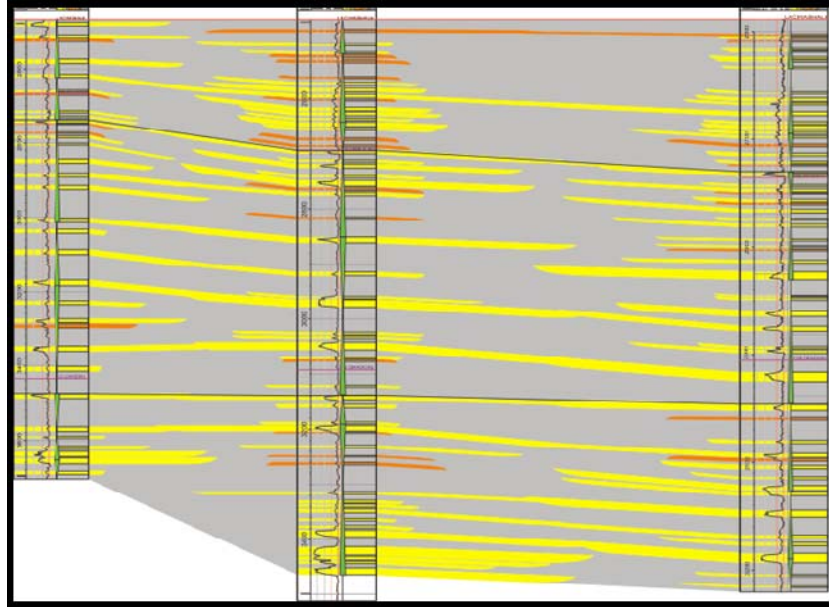


Figura 45. Imagen del sector derecho de la correlación, donde la continuidad lateral de las arenas es poco.

En esta sección el desarrollo de canales es abundante y tiene muy buena continuidad lateral, especialmente hacia las zonas de colorado A3 y A4 (Figura 46). Los canales tienen un espesor entre promedio entre 2.13 y 4.6 metros (7 y 15 pies), también hay canales con espesores entre 3.81 y 6.86 metros (12.5 y 22.5 pies).

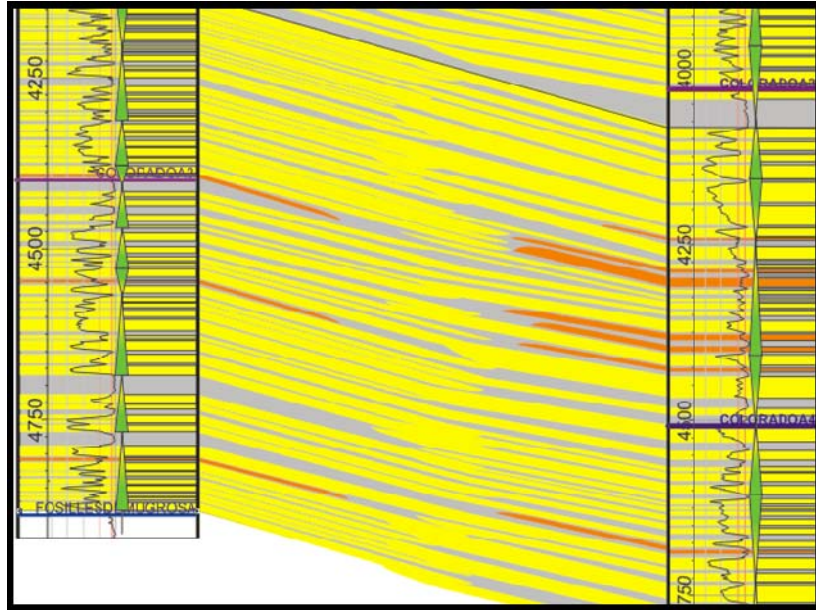


Figura 46. Imagen del sector izquierdo, donde hay mayor cantidad y continuidad de las arenas.

Para las unidades estratigráficas en estudio, el ICP – Ecopetrol definió los ciclos que se muestran en la figura 47 donde identificaron para Colorado A4, Colorado A3 Y Colorado A2 un ciclo estratigráfico completo de subida y bajada del nivel base respectivamente, mientras que para la unidad Colorado A1, se definieron dos ciclos de cambio de nivel base estratigráfico relativamente más cortos que los anteriores, siguiendo con un ciclo completo largo de subida y descenso del nivel base para la unidad estratigráfica La Cira Shale.

Los ciclos de Colorado A4, A3, A2 y La Cira Shale representan ciclos simétricos de sedimentación continua en una posición geográfica constante a través del tiempo; y para Colorado A1 se observan dos ciclos simétricos, el ciclo más corto representa menor acumulación de sedimentos por unidad de tiempo que el otro ciclo.

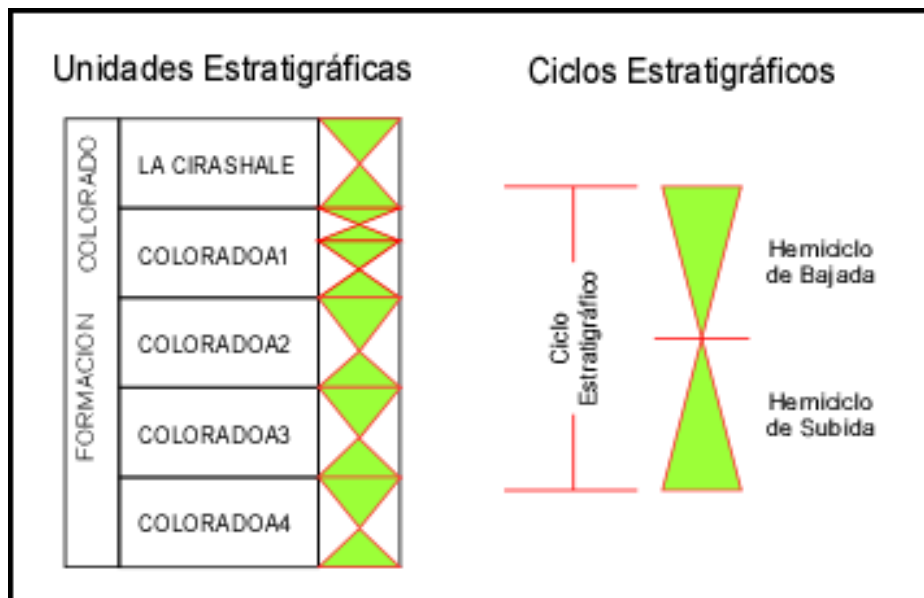


Figura 47. Definición de ciclos estratigráficos para las unidades estratigráficas de la Formación Colorado en el Campo Galán. Información suministrada por ICP – Ecopetrol.

Esta información es de importancia junto con los ciclos hallados en las correlaciones elaboradas para relacionarlos con los mapas de electrofacies y dar una explicación lógica a la forma que exhiben los canales y los mapas en general como se verá más adelante.

9.3. CALCULO DE ESPESORES

En esta etapa se llevo a cabo la medición para cada uno de los canales identificados en los pozos analizados, desde la Cira Shale hasta la base de Colorado A4 obteniendo los siguientes resultados.

Para La Cira Shale (figura 48), los espesores más frecuentes varían entre 1.52 y 3.05 metros (5 – 10 pies) de espesor, seguido por arenas entre 0 y 1.52 metros (0 – 5 pies), los cuales debido al espesor podrían considerarse como lentes y que comparados con las correlaciones equivalen a niveles poco continuos lateralmente.

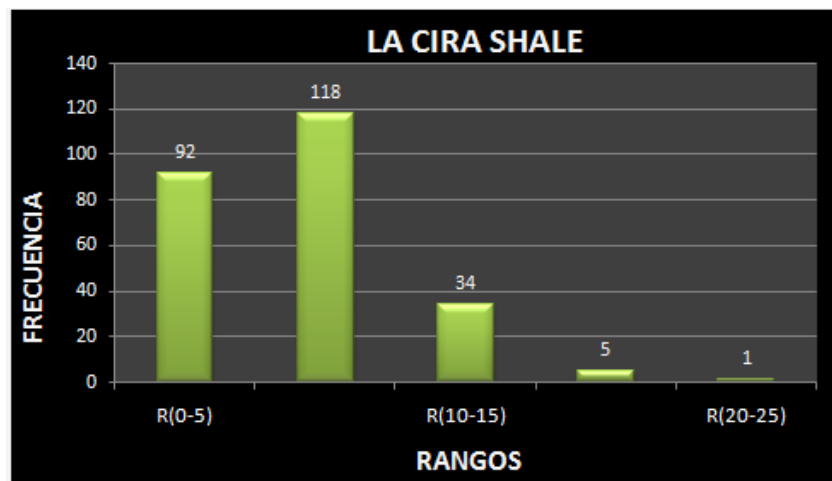


Figura 48. Espesores de Arenas para la Cira Shale

Para Colorado A1 (figura 49), los espesores más frecuentes varían entre 1.52 y 3.05 metros (5 – 10 pies) de espesor, seguido por arenas entre 0 y 1.52 metros (0 – 5 pies) y 3.05 y 4.6 metros (10 – 15 pies); estos últimos presentan mejor continuidad lateral que las arenas entre 0 y 3.05 metros (0 – 10 pies).

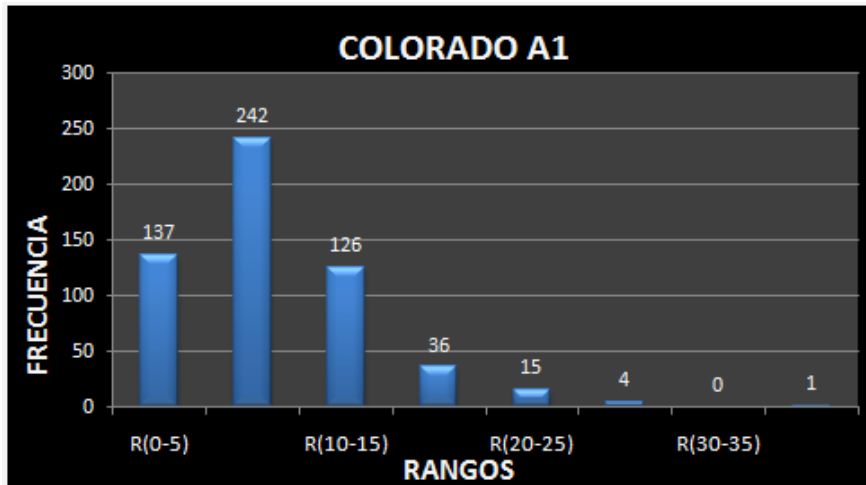


Figura 49. Espesores de Arenas para Colorado A1

En Colorado A2 (figura 50), los espesores más frecuentes son los mismos observados en las unidades anteriores, sin embargo hay una abundancia significativa de canales entre los 3.05 y 4.6 metros (10 – 15 pies) de espesor, importantes porque pueden almacenar mayor cantidad de hidrocarburos, al igual que los de mayor espesor presentes en el área.

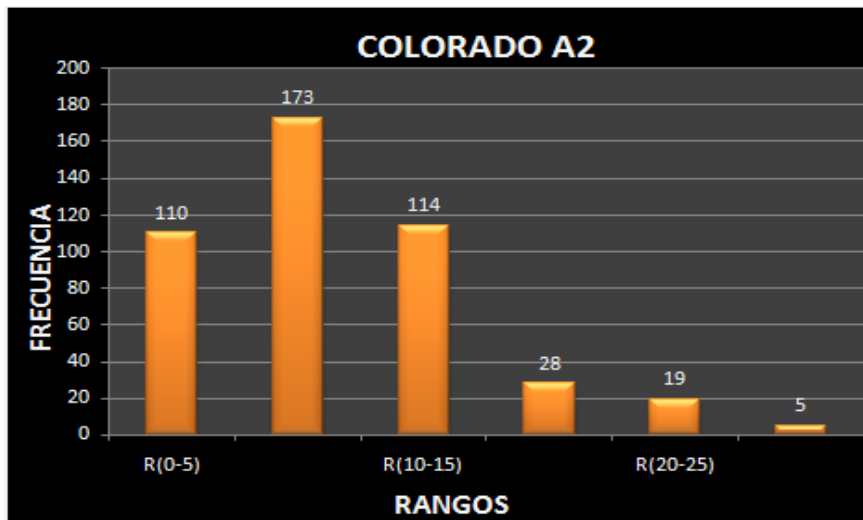


Figura 50. Espesores de Arenas para Colorado A2

En Colorado A3 (figura 51), los espesores más abundantes oscilan entre 0 y 4.6 metros (0 y 15 pies) de espesor y comparando con las correlaciones, esta unidad es mas continúa lateralmente que las anteriores.

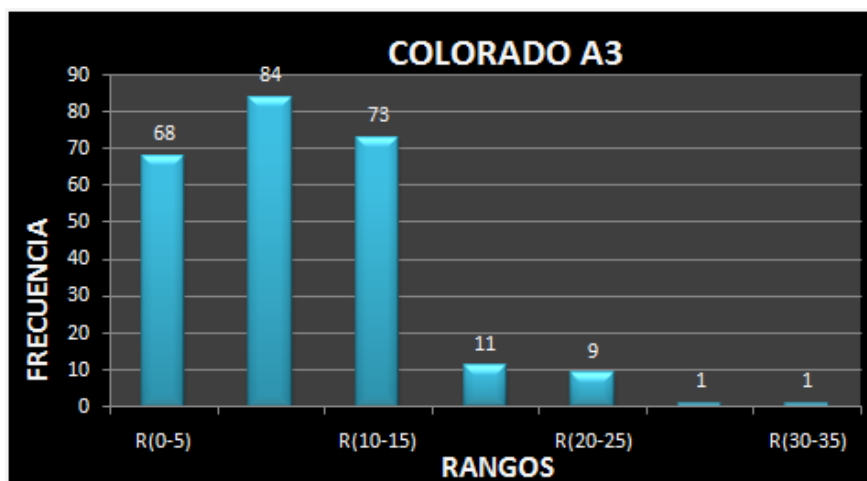


Figura 51. Espesores de Arenas para Colorado A3

En Colorado A4 (figura 52), los espesores más abundantes oscilan entre 1.52 y 4.6 metros (5 y 15 pies) de espesor y comparando con las correlaciones, esta unidad es muy continúa lateralmente y presenta amalgamamiento de canales.

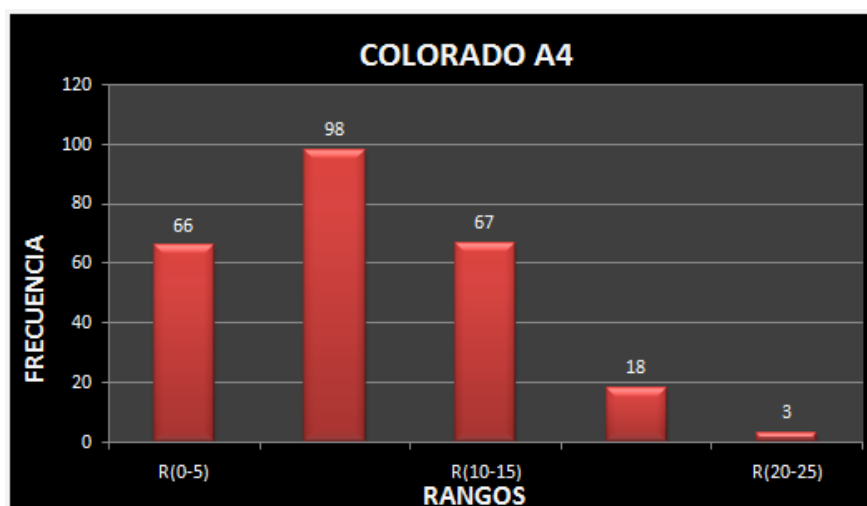


Figura 52. Espesores de Arenas para Colorado A4

En las graficas se puede observar que el espesor promedio de las arenas se encuentra entre 1.52 y 3.05 metros (5 – 10 pies) para todas las unidades analizadas, sin embargo también se observa otro patrón entre los 3.05 y 4.6 metros (10 y 15 pies) de espesor, lo que quiere decir que los canales de la Formación Colorado tienen un espesor que varía entre 1.52 y 4.6 metros (5 – 15 pies).

9.4. MAPAS DE ELECTROFACIES

Los mapas de facies permiten visualizar la disposición espacial de estos subambientes en el momento que fueron depositadas, por lo tanto son el reflejo de las condiciones paleoambientales. La elaboración de estos mapas permite ampliar el conocimiento geológico de la zona, debido a que en la industria petrolera estos mapas juegan un papel importante porque permite identificar las facies de interés (arenas de canal).

La elaboración de los mapas se realizo teniendo en cuenta la interpretación de los registros de Potencial Espontaneo (SP) de los 34 pozos seleccionados(Figura 53); donde se tuvo en cuenta las diferentes respuestas eléctricas del registro SP para establecer las respectivas electrofacies.

De acuerdo con las características morfológicas de la curva de potencial espontáneo SP se identificaron tres electrofacies. *

- ⊕ Electrofacies de Canal
- ⊕ Electrofacies de *Crevasse Splay* (desborde de canal)
- ⊕ Electrofacies de *Flood Plain* (llanura de inundación)

De acuerdo a esto, se elaboraron cuatro mapas de electrofacies para el campo galán al tope de las unidades colorado A1, A2, A3 y A4, agrupando la información de cada tope operacional con la información hallada en cada pozo estableciendo así zonas de electrofacies. Estas zonas permiten la elaboración de un mapa de la distribución de las diferentes electroformas del nivel estratigráfico estudiado, dando como resultado los respectivos mapas de electrofacies.

A continuación se muestra cada uno de los mapas de Electrofacies realizados, donde los colores representan cada Electrofacies, el color amarillo indica arenas de canal, el naranja indica *crevasse splay* y el color gris representa llanuras de inundación.

* EL término Electrofacies ha sido introducido por Serra (1972) y matizado por Serra y Abbott (1980) quienes lo definen como "el conjunto de las respuestas de las diagrfias que caracterizan un estrato y permiten que este pueda ser diferenciado de los otros que le rodean.

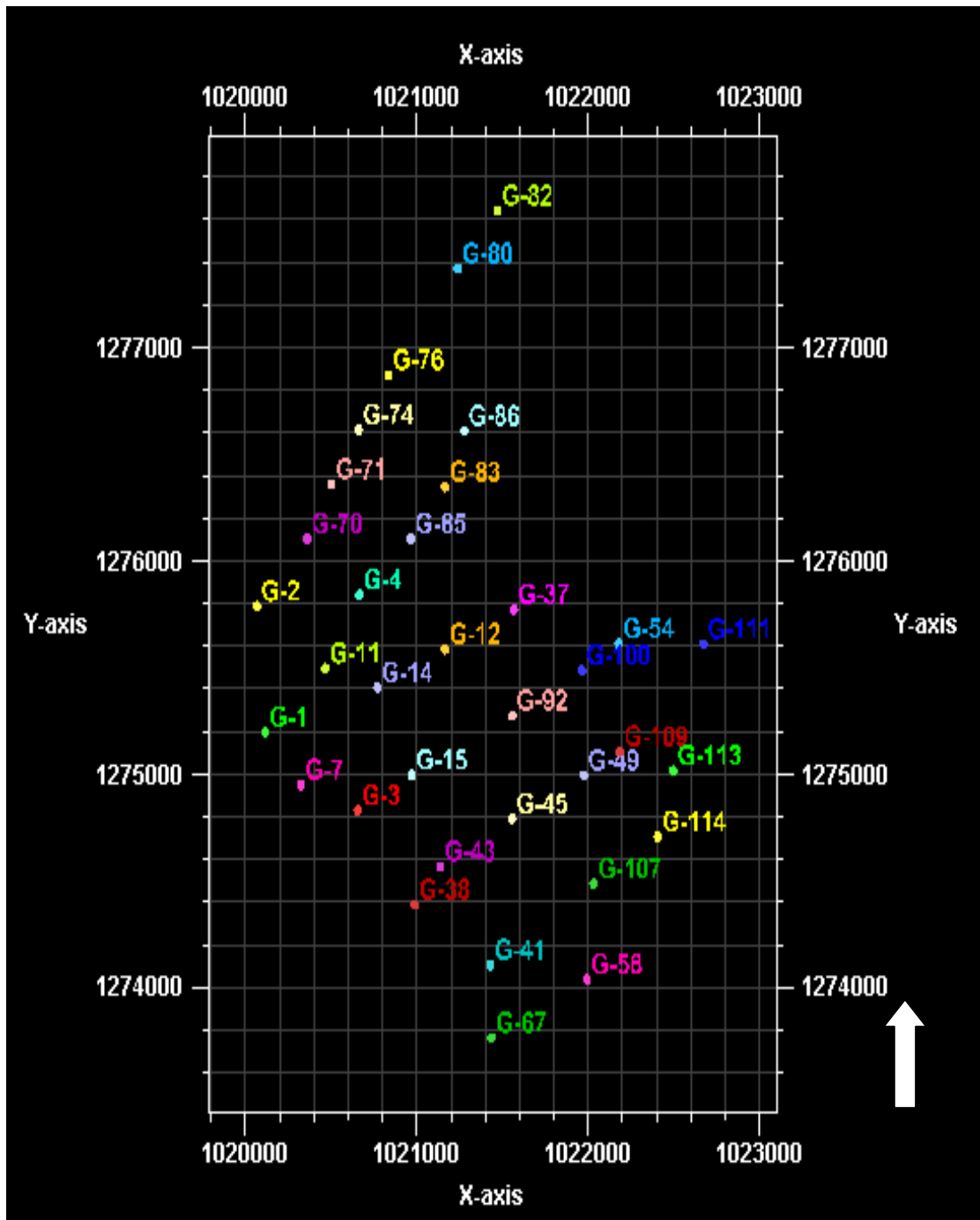


Figura 53. Localización de los 32 pozos empleados en los mapas de electrofacies.

9.4.1. Mapa de Electrofacies del tope de la unidad Colorado A1

Se observan dos canales principales hacia el margen izquierdo y derecho del mapa respectivamente, a los cuales están asociados los depósitos de *crevasse splay* que se encuentran principalmente en el centro del mapa y que están ubicados sobre llanuras de inundación (Figura 54).

Los picos presentan un espesor entre 1.52 y 3.05 metros (5 y 10 pies), mientras que las campanas tienen un espesor entre 3.05 y 4.6 metros (10 y 15 pies).

9.4.2. Mapa de Electrofacies del tope de la unidad Colorado A2

Las respuestas predominantes corresponden a llanuras de inundación, mientras que en menor proporción se observan depósitos de *crevasse splay* como en la parte superior que se observa un depósito de este tipo asociado al desborde de un meandro, mientras que en la parte inferior derecha se observa la ruptura del canal; los canales están ubicados a la derecha e izquierda del mapa con una dirección SW - NE (Figura 55).

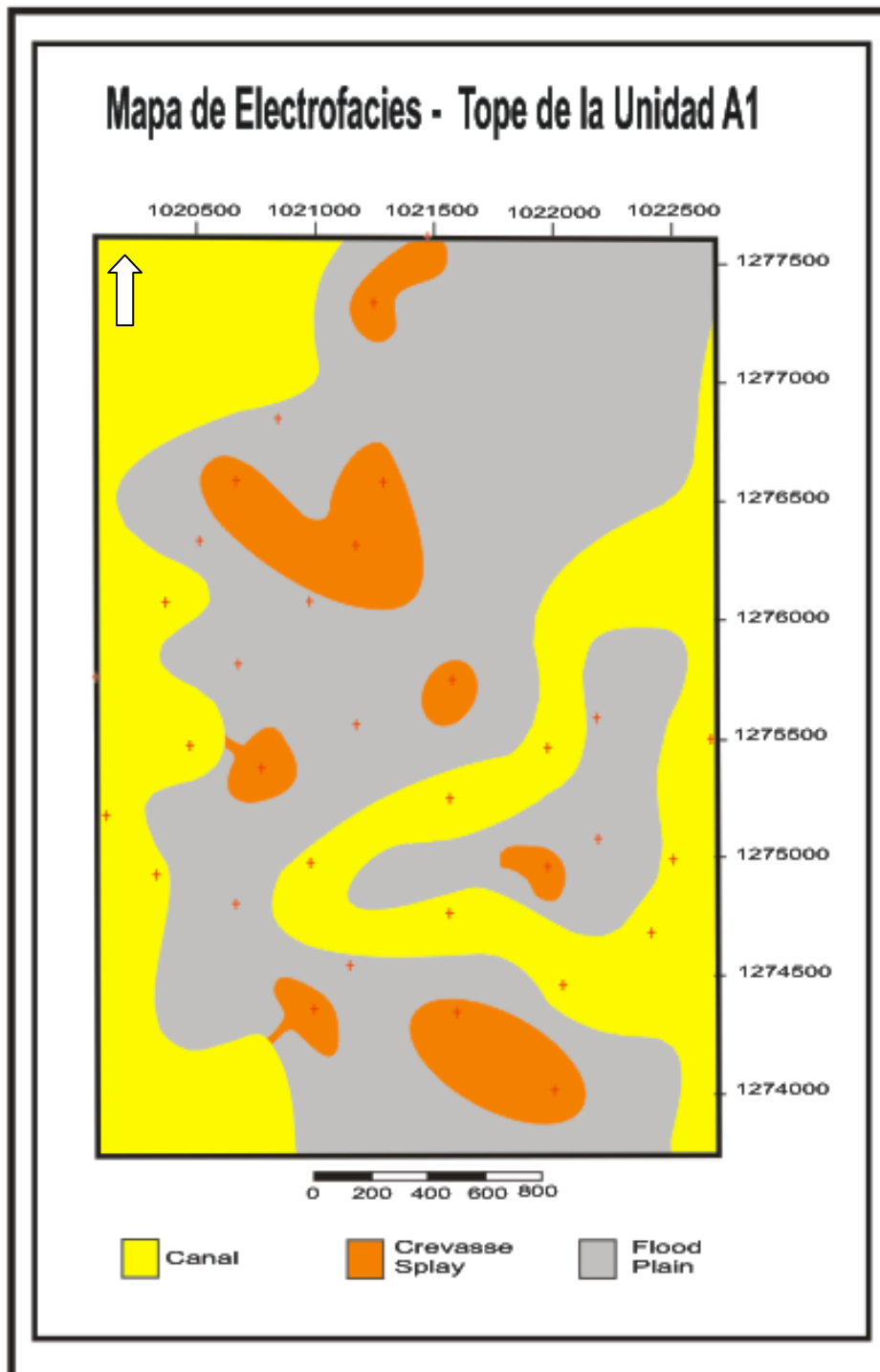


Figura 54. Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A1

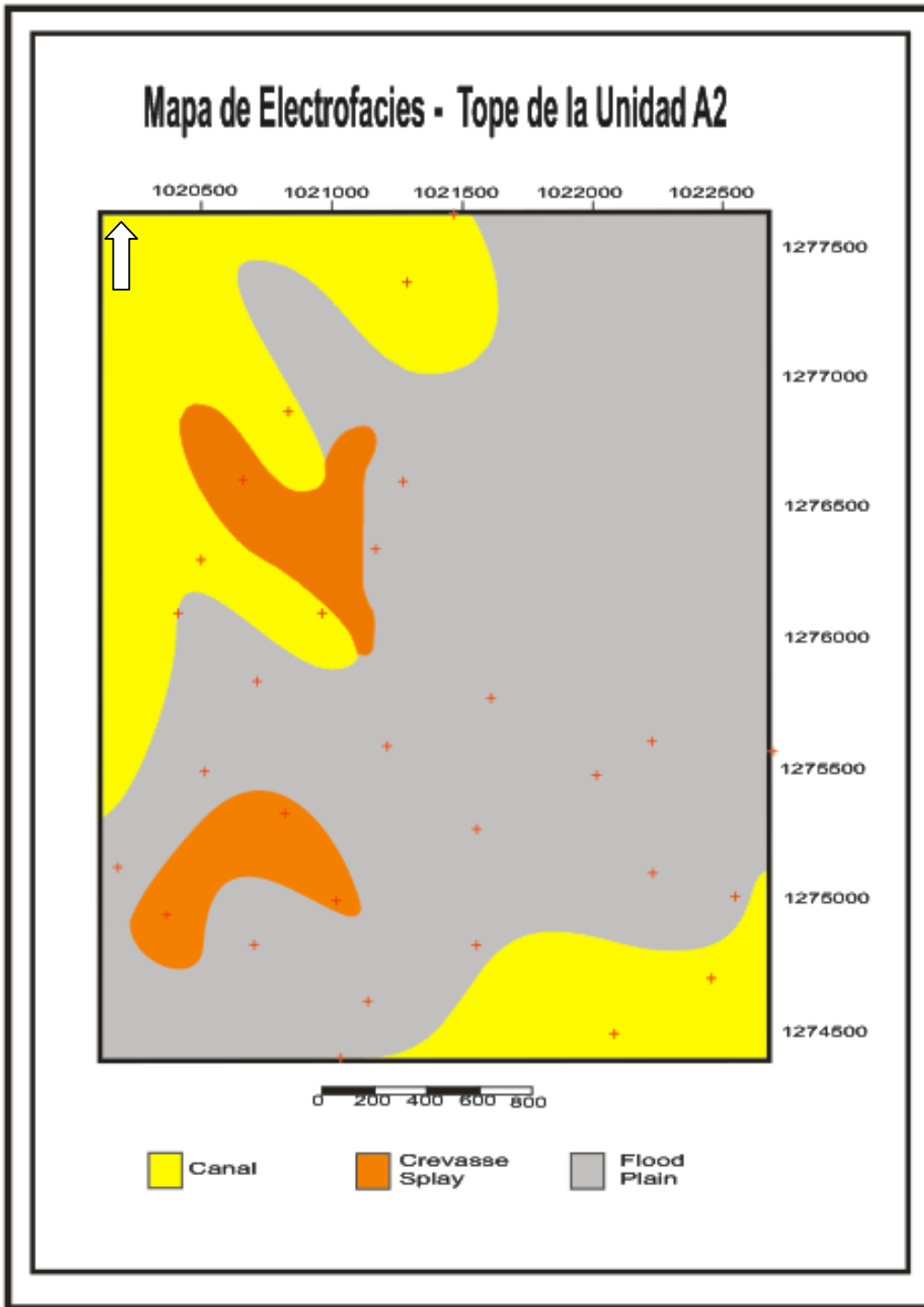


Figura 55. Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A2

9.4.3. Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A3.

Las respuestas predominantes son las campanas que constituyen una distribución del 38% y los picos el 20% principalmente, mientras que las superficies de llanura de inundación tienen un predominio del 42%. Las respuestas de los intervalos arenosos se encuentran hacia la parte derecha e izquierda del mapa, es decir que los canales están siguiendo una dirección SW – NE (Figura 56).

Las campanas tienen un espesor promedio entre 3.05 y 4.6 metros (10 y 15 pies), mientras que los picos varían entre 1.52 y 3.05 metros (5 y 10 pies).

9.4.4. Mapa de electrofacies del tope de la unidad Colorado A4.

Se observa dos canales principales rodeados por llanuras de inundación como se observa en la Figura 57. Las cuales ocupan la mayoría del área. Las respuestas eléctricas más destacadas fueron los bloques y campanas principalmente. Sin embargo es importante aclarar que este mapa se realizó con siete datos de pozos, lo cual quiere decir que es poco confiable debido a que en la mayoría de los pozos el registro no llegaba hasta este tope o simplemente en esa zona, esta unidad operacional no está presente.

Los canales tienen un espesor aproximado entre 3.05 y 4.6 metros (10 y 15 pies), hay presencia de bloques que tiene un espesor entre 4.6 y 6.1 metros (15 y 20 pies).

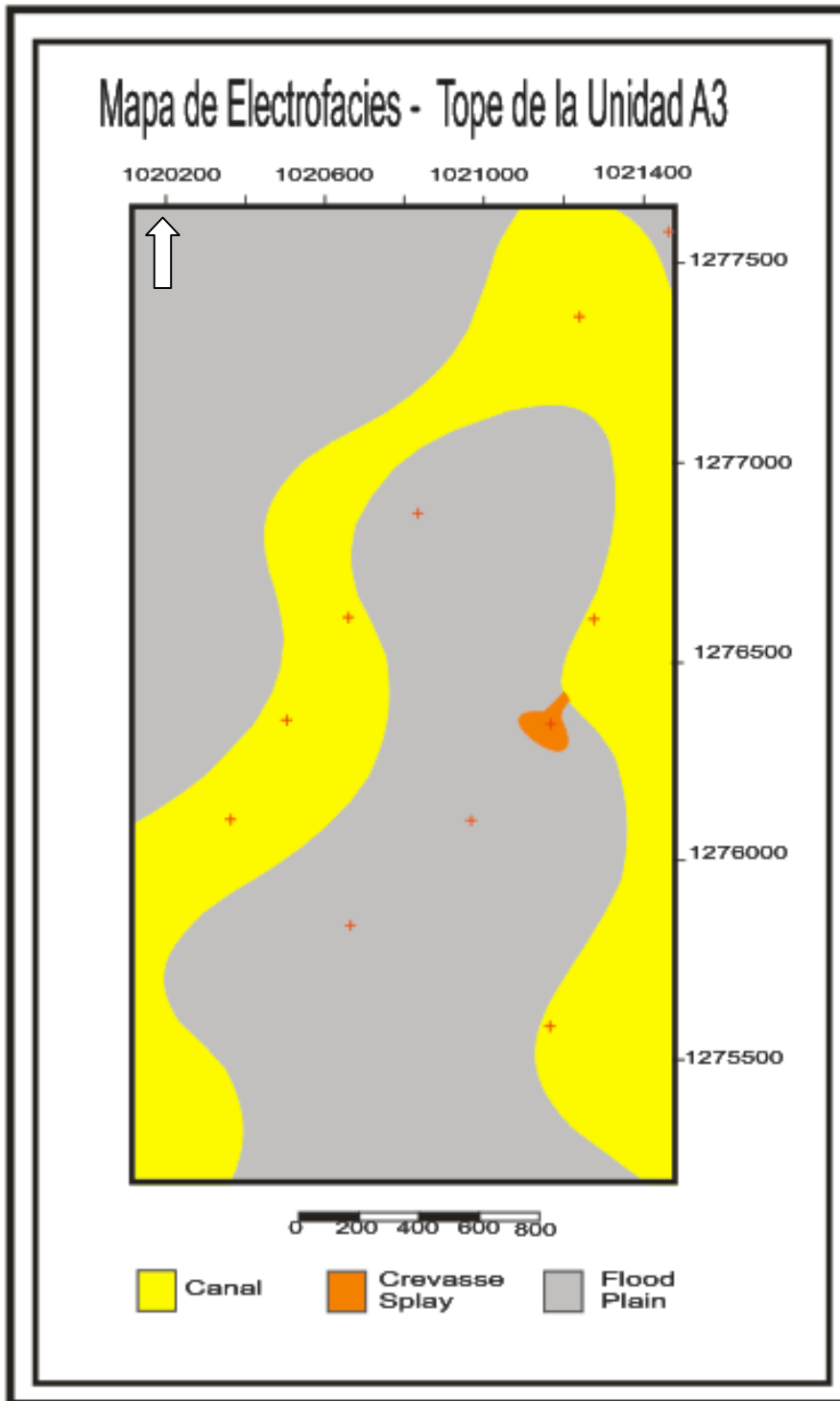


Figura 56. Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A3

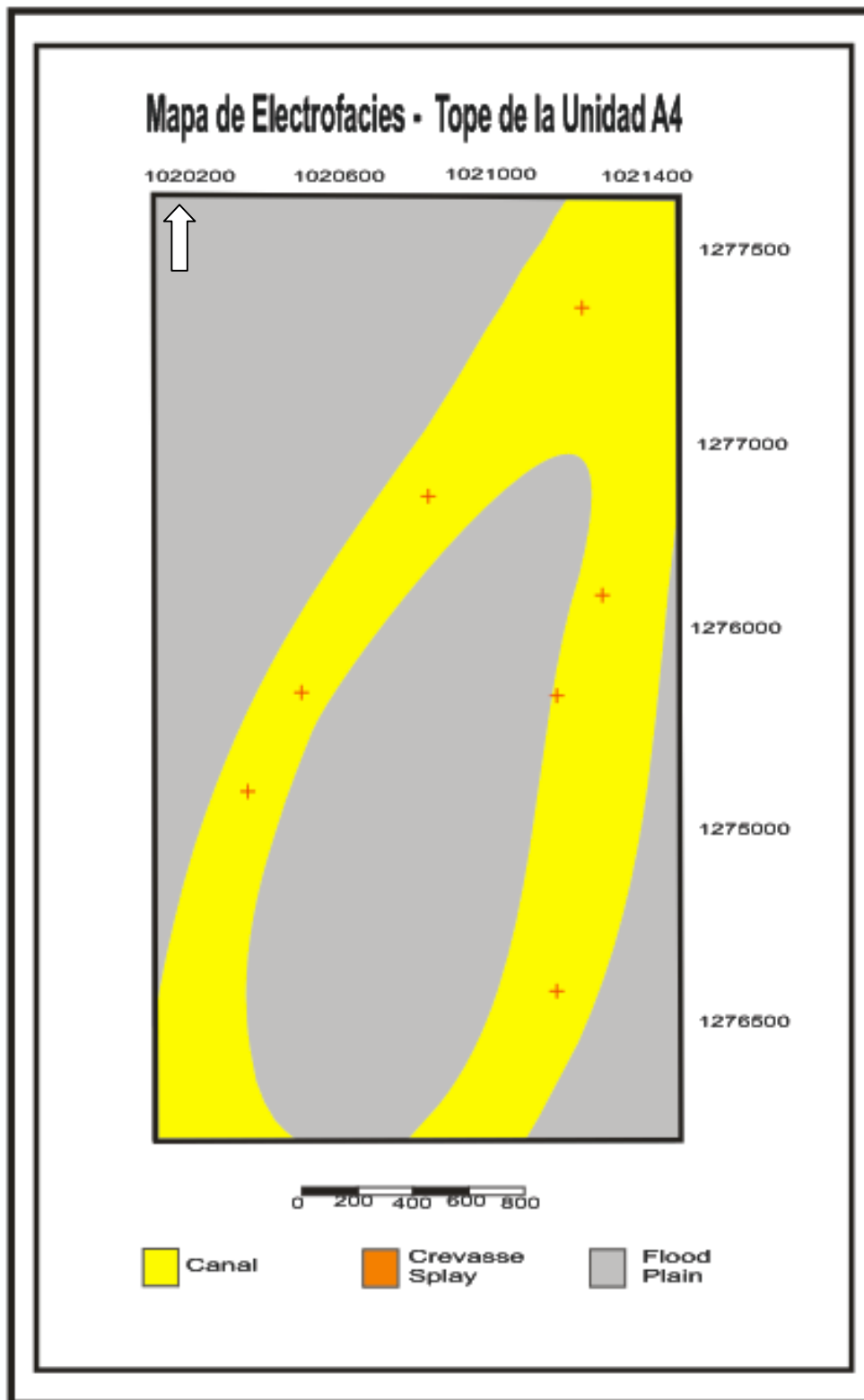


Figura 57. Mapa de distribución de electrofacies para el tope de colorado A4

De acuerdo a las características observadas en los mapas, se puede decir que para el mapa del tope de colorado A1 hay dos canales principales con dirección NE – SW evidenciando alta sinuosidad, los depósitos de *crevasse splay* (desborde de canal) se encuentran distribuidos de forma homogénea en el área evidenciando apocas de alta energía donde hubo varios evento de rupturas de canal.

Para el tope de Colorado A2, se observan dos canales principales con alta sinuosidad y dos depósitos de *crevasse splay*, sin embargo el área está dominada por depósitos de *floodplain* (llanuras de inundación) que permiten inferir épocas de máxima relación de espacio de acomodación / sedimentación (A/S).

Para Colorado A3 se observan dos canales principales y un solo deposito asociado a *crevasse splay*, el resto del área representa depósitos de *floodplain* donde se puede decir que hay una proporción equivalente entre estos y los canales que podrían asimilarse como un ciclo simétrico relacionándose con lo observado en la figura 47.

En el mapa de colorado A4 de acuerdo a los datos gráficos, se observa básicamente depósitos de canal, manteniendo la misma dirección NE – SW. Para estas dos últimas unidades la sinuosidad del río es menor en comparación con las unidades A1 y A2, interpretándose también épocas de menor energía debido al alto contenido de depósitos de llanuras de inundación asociados a una máxima relación A/S.

Finalmente se puede decir que la tendencia general del río durante la depositación de esta formación tuvo siempre una tendencia NE – SW y la elaboración de estos mapas son importantes para la industria, ya que se requieren para determinar si todas las arenas potencialmente petrolíferas se han producido y cuál es la variación lateral de las mismas a partir del reconocimiento de la importancia de contar con un modelo geológico que se usará como base para programas de estimulación y recobro secundario.

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En cuanto al análisis de procedencia con respecto a la roca fuente de los sedimentos que conforman la Formación Colorado en el VMM se considera que los sedimentos provienen de rocas cristalinas de la Cordillera Central debido al contenido de cuarzos con predominio de extinción ondulosa que sugiere un origen de rocas metamórficas de acuerdo a los resultados obtenidos con la metodología de Basu (1976) y al contenido de feldespatos hallados en las muestras; mientras que si consideramos una procedencia de rocas de la cordillera Oriental, estaríamos hablando de rocas de origen sedimentario teniendo en cuenta que para el momento de la depositación de la Formación Colorado (Oligoceno) dicha cordillera no había iniciado el proceso de levantamiento, el cual se da en el Plioceno (Montgomery, 1992).

De acuerdo a los mapas de electrofacies se observa que para el momento de la depositación de los sedimentos se tuvo una máxima relación de A/S debido a la gran cantidad de depósitos de llanuras de inundación observados en todos los mapas, aunque es importante mencionar que los mapas de electrofacies de las unidades A3 y A4 no son muy confiables debido a la escases de datos hallados ya que estas unidades no están presentes en todos los pozos analizados, mientras que para colorado A1 y A2 se tuvo un buen control ya que estas unidades están distribuidas en todos los pozos de estudio haciéndolos más confiables.

Con respecto a las correlaciones se pudo observar que las mejores áreas son las unidades colorado A3 y A4 porque presentan mayor continuidad lateral y debido a

la mínima relación A/S se presentan muchas zonas de amalgamación de canales lo que favorece la búsqueda de hidrocarburos.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la descripción sedimentológica de los pozos Galán 1 y Galán 92 para la Formación Colorado se pudo establecer las facies de Shcl y Shl que corresponde a un depósito de lago; Flbp, FAp y Albp a depósitos de llanura de inundación, A, Fl, Al, Ac, Ab y Flbp a depósitos de desborde de canal y Acg, Ab, A y Arx a depósitos de canal, entendiendo esto como un ambiente continental de tipo fluvial.

En cuanto a las manifestaciones de aceite, se presentaron principalmente en las arcosas y subarcosas friables de moderadas a bien calibradas, mostrando una impregnación desde leve a buena.

En la Formación Colorado se encontró que el principal componente aglutinante es el mineral arcilloso compuesto por caolinita y smectita, las cuales se observan dispersas en las secciones analizadas.

En el área de estudio, el entrapamiento de petróleo es de tipo estructural producto de la Falla Casabe que se encuentra casi paralela a la correlación A – A', y como se pudo observar en las correlaciones el mejor desarrollo de canales y continuidad lateral se presentan hacia el S-E donde esta la mejor producción acumulada, pero no se descartan las posibles trampas estratigráficas teniendo en cuenta los acuíferos observados en las correlaciones.

En las correlaciones se observa mayor predominio de sedimentos finos hacia el tope de la Formación Colorado, entre la Cira Shale, Colorado A1 y A2 interpretándose como un río anastomosado, mientras que en la parte inferior que corresponde a Colorado A3 y A4 se observa mayor cantidad de arenas, lo cual se interpreta como un río meandriforme.

De acuerdo a la clasificación composicional propuesta por Folk (1974) las secciones analizadas se clasificaron como arcosas y arcosas líticas.

Después de aplicar la metodología propuesta por Dickinson, las muestras estudiadas se catalogaron como arenas que provienen de un orogeno reciclado y según la metodología de Basu, aplicada para los cuarzos, se considera que las arenas tienen una roca fuente metamórfica de bajo grado posiblemente de la cordillera central teniendo en cuenta el marco tectonosedimentario del área.

De acuerdo al cálculo de espesores de arenas, se observó que en el intervalo de 1.52 a 3.05 metros (5 a 10 pies) el número de arenas es el más alto en todas las unidades analizadas; sin embargo los espesores entre 3.05 y 4.6 metros (10 y 15 pies) presentan también una alta distribución a lo largo del campo.

Los mapas de distribución de electrofacies permiten ver una tendencia general de los canales con dirección NE – SW y mayor número de zonas de depósitos de *crevasse splay* en los mapas de las unidades operacionales Colorado A1 y A2.

La distribución de las arenas de esta formación, tiene un sentido general con dirección SW - NE desarrollándose en un ambiente fluvial de corrientes

meandriformes a anastomosadas de base a techo respectivamente, dando como resultado un frecuente cambio lateral de facies y discontinuidad litológica (lenticularidad).

Las correlaciones y el mapeo de facies permitieron identificar la continuidad y distribución de los cuerpos de arenas, los cuales son importantes porque permiten ver la dirección de los canales y ayudan al mejor desarrollo del campo.

La Formación Colorado presenta un aumento en el espacio de acomodación de base a tope, identificándose por medio de las correlaciones estratigráficas la poca continuidad lateral de los geocuerpos arenosos en estado de mayor relación A/S y una considerable continuidad y amalgamamiento de los geocuerpos arenosos en estados de menor relación A/S.

RECOMENDACIONES

Para tener mayor certeza del área fuente de los sedimentos de la Formación Colorado, se recomienda hacer un muestreo en la zona de estudio para realizar un análisis petrográfico aplicando la metodología de procedencia (Dickinson, 1985) y así plantear con mas certeza la procedencia de los sedimentos involucrados en el estudio.

Se recomienda tener en cuenta este estudio cuando se quiera hacer programas de inyección para mejorar el recobro, ya que sabiendo cual es la dirección de los canales se puede saber qué impacto va a tener inyectar fluidos debido a que estos toman la misma dirección de los geocuerpos.

Para las unidades Colorado A3 y A4 se recomienda hacer un amarre con propiedades de porosidad, permeabilidad y saturación para determinar nuevas

áreas de interés económico, teniendo en cuenta que son las unidades con mayor continuidad lateral y mejores espesores para tener un mejor desarrollo del campo.

12. REFERENCIAS

BAUTISTA, A., PRADA. A, 1987. Evaluación de las condiciones actuales de los yacimientos de campo galán y cálculo de las reservas de crudo y gas. Trabajo de grado inédito, escuela de ingeniería de petróleos, facultad de físico – químicas, universidad industrial de Santander.

BADILLO, R. Rubén. 1996. Estudio Petrológico de las Formaciones Mugrosa y Colorado del campo La Cira, Valle Medio del Magdalena. Trabajo de grado inédito, escuela de geología, facultad de fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander.

BASU, A. 1976. *Petrology of Holocene fluvial sands derived from plutonic source rocks; implications to paleoclimatic interpretation. Journal of Sedimentology Petrology*, p. 46, 694 – 709

BASU, A; SUTTNER, L. et al. 1975. *Re- evaluation of the use of ondulatory extinción and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. Journal of Sedimentology Petrology*, p. 145, 874 – 882.

BENDECK, J. 1992. Perfiles Eléctricos, Una herramienta para la evaluación de Formaciones. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Bogotá.

BAKER HUGHES INTEQ *Training & Development, 80825 Rev. B April 1996, Wellsite Geology Reference Guide Chapter 2, Baker Hughes INTEQ , Houston, TX United States of America.*

BOGGS, Jr. Sam. 2001, *Principles of Sedimentology and Stratigraphy, Third Edition, Prentice hall, New Jersey.*

CAMPBELL, C., BÜRGL, H. 1965. *Section through the Eastern cordillera of Colombia South America. GSA Bulletin*, vol 76, No. 5 p 567 – 589.

CONDIE, K.C., LEE, D. Y FARMER L. 2001. *Sedimentary Geology*, 141-142, 443-464.

COMPTON, R., 1985, *Geology in the field: Ed John Wiley & Sons, New York*. p. 1-398.

COOPER M.A., ADDISON F.T. et al. 1995. Basin Development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAPG Bulletin*, v. 79 p. 1421 – 1443.

CROSS T. A., LESSENGER M.A. (1998) Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high – resolution stratigraphic correlation. Predictive high resolution sequence stratigraphy, *Petroleum Society Special Publication 8*.

CRUZ, G., CABALLERO, V. ALVAREZ, M. 2004. *Petrología sedimentaria – Guías de Laboratorio. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*.

DICKINSON, W. R., 1970, Interpreting detrital modes of graywacke and arkose: *Journal of Sedimentary Petrology*: v. 40, p. 695-707.

DICKINSON, W.R., 1985: *Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones, Laboratory of Geotectonics, Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA*.

DICKINSON, W.R., 1986, Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and pelogeography of sedimentary basin, *in* K.L. Kleinspehn and C. Paola (eds.), *New perspectives in basin analysis*, Springer-Verlag, p. 27-42.

DICKINSON, W.R., and **SUCZEK**, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 63, p. 2164-2182.

ESCOBAR, C. I, & CARILLO, L. F. 1994. Factibilidad de reinyección de aguas producidas en las formaciones de los campos Gala-Galán, Llanito y Yariguí - Cantagallo. Instituto Colombiano del Petróleo.

ETAYO – SERNA, F., BARRERO, D. et al. 1983. Mapa de terrenos Geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas, No. 14, p 235

FALLA, 2005. Interpretación de Registros de Pozos de Petróleo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima – Perú.

FOLK, R. 1974. **FOLK, R.L.** (1974). Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing CO. Texas. P. 182.

GONZÁLEZ, H. 2.001. Mapa geológico del departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Memoria explicativa. INGEOMINAS.

HARRELL, J., BLATT, H. 1978. Polycrystallinity effect on the durability of detrital quartz. Journal of Sedimentology Petrology, p. 48, 25 – 30.

LENNON. 1976. En **SERRA, O.**, 1980, Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfilajes de pozo. P. 69.

MACK, G. H. 1978 *The survivability of labile light mineral grains in fluvial, aeolian and litoral marine environments: The Permian Cutter and cedar Mesa Formation, Moab, Utah, Sedimentology*, p.25, 587, 604.

MACK, G. H. 1984. Exceptions to the relationship between plate tectonics and sandstone composition. Jour. Sed. Petrology, 54, 212-220.

MIALL, A., 1977, *A review of the braided river depositional environment: Earth Science Reviews*, v. 62, p. 344-359.

MIALL, A., 1978. *Fluvial Sedimentology*. *Canad. Soc. Petroleum Geol., Mom.* 5.

MIALL, A., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits; Sedimentary Facies, Analysis and Petroleum Geology*. Berlin, Springer – Verlag, p. 582.

NANZ R. H., WILSON B.W. 1959. Sands Condition as Indicated by the Self-Potential Log. EPRM Memorandum Report 51, Shell Devenlopment Company, Huston, Texas.

MONTGOMERY, 1992. *Petroleum Potential of Upper and Middle Magdalena Basins. Colombia. Petroleum Information Corporation.*

MUNSELL, 1992. Tabla de colores de rocas.

PARDO, S., & NIÑO, H. 2000. Caracterización Sedimentológica – Estratigráfica Del Campo Galán. División De Exploración Y Producción Litoteca Nacional – Estratigrafía. Informe final. Instituto Colombiano del Petróleo.

PEREZ, M., AND SMITH, M., 1992, *Depositional patterns following the 1870s avulsion of the saskatchewan river (Cumberland marshes, Saskatchewan, Canada): Journal Sedimentary Research*, V. 69.

PETROSANTANDER INC. (2007). Colombia, *Middle Magdalena Valley Basin, Las Monas Block. Energy Venture Opportunities International (ENVOI), Project Synopsis P99.*

PIRSON, S.J. 1977. *Geologic Well Log Analysis*. Gulf Publishing Company,

RAMON, J.C., CROSS T. 1997. Caracterización y Predicción de Yacimientos de areniscas de canales fluviales, Cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia, CT&F, Vol.1, num. 3, p. 19 - 47.

REINECK, H. & SINGH, I., 1980, *Depositional sedimentary environments, with reference to terrigenous clastics*. Springer-Verlag.

ROJAS J.C. 2000. Caracterización sedimentológica -estratigráfica del Campo Llanito Gala Instituto Colombiano Del Petróleo División De Exploración Y Producción Litoteca Nacional-Estratigrafía.

ROYERO, J., CLAVIJO, J. 2001. Mapa geológico generalizado del departamento de Santander, Memoria Explicativa. INGEOMINAS.

ECOPETROL. SANTACRUZ, 2004. Actualización del Modelo Geológico Campo Llanito – Gala.

SAVOY, L.E., STEVENSON, R.K. Y MOUNTJOY, E.W. 2000. Journal Of SedimenTARY Research, 70, 1, 181-193.

SHANMUGAN, G., 1996, *High-density currents: are debris flow?: Journal of Sedimentary Research*, V.66.

SELLEY, R. C, 1976, Medios Sedimentarios Antiguos, Primera edición Española, Hermann Blume Ediciones, Madrid-España.

SERRA, O., 1980, *Stratigraphy, Tectonics and Multi-Well Studies Using Wireline Logs*, Schlumberger Well Services, Houston, Texas.

SERRA, O., 1980, Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfilajes de pozo. P. 69.

SERRANO, J., 2007. Resultados finales del conteo mineral en las secciones delgadas Galán 15 3.076,92', Galán 92 3.356', Llanito 30 5.502' y Llanito 30 5.477' en el intervalo arenoso de la Formación Colorado. Trabajo de investigación inédito perteneciente al grupo de investigación de estratigrafía (GIE) en convenio Universidad Industrial de Santander – Instituto Colombiano del Petróleo.

SUTTNER, L.J Y DUTTA, P.K. 1986. *Alluvial sandstone compositions and paleoclimate, I. Framework mineralogy.* Jour. Sed. Petrology, 56, 329 – 345.

ZUFFA, G.G. 1985. *Optical analysis of arenites: influence of methodology on compositional results. En: Provenance of Arenites. Ed. G. G. Zuffa, Nato ASI series, C-148, 165-189.*

VERA, J. A., 1994, *Estratigrafía: Principios y Métodos*, Ediciones Rueda, España.

WALKER, R. C., James, N. P., 1992, *Facies Models/Alluvial Deposits by Miall Andrew, Chapter 7., Geological Association of Canada, Love printing LTDA.*

YOUNG, S. W., 1976, *Petrographic textures of detrital polycrystalline quarts as an aid to interpreting crystalline source rocks: Journal of Sedimentary Petrology*, v. 46, p. 595-603.

http://www.geologia.unam.mx/academia/temas/Procedencia/Image_8.jpg