

DISEÑO DEL MÓDULO DE SELECCIÓN DE CONECTIVIDAD PARA EL
MANUAL GENERAL DE COMPLETAMIENTO DE POZOS DE ECOPETROL S.A.

SAVIETH ACEROS GARCIA
JUAN CAMILO SARMIENTO MONCALEANO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C.
2017

DISEÑO DEL MÓDULO DE SELECCIÓN DE CONECTIVIDAD PARA EL
MANUAL GENERAL DE COMPLETAMIENTO DE POZOS DE ECOPETROL S.A.

SAVIETH ACEROS GARCIA
JUAN CAMILO SARMIENTO MONCALEANO

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
CARLOS ACEVEDO
Ingeniero de Petróleos

Orientador
DIEGO MONROY
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C.
2017

Nota de aceptación (Dirección de Investigaciones)

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá D.C, Abril de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUÍS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano de Ingenierías y Decano de Carrera

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de investigaciones

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director (E) Programa de Ingeniería de Petróleos

Dr. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estas corresponden únicamente al autor.

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por darnos la sabiduría, paciencia, inteligencia y las fuerzas para cumplir este sueño.

Agradecemos al convenio FUA (Fundación Universidad de América) –ECP (Ecopetrol S.A.) –ICP (Instituto Colombiano de Petróleo), por permitir el desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias por ser el apoyo incondicional y darnos la oportunidad de alcanzar esta etapa que culmina.

A la Universidad de América por aportarnos y brindarnos conocimientos para nuestro futuro.

Al Grupo de Investigación por brindarnos su ayuda, especialmente al Semillero de Nuevas Tecnologías de Perforación y Completamiento.

A los Ingenieros Williams Duarte y Diego Monroy por su asesoría y apoyo en la elaboración de este proyecto.

A ECOPETROL S.A. por su aporte técnico, financiero y permitir el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Carlos Acevedo y aquellos Ingenieros que nos colaboraron desde el inicio en la elaboración de este proyecto; gracias por ser un apoyo, asesorarnos y regalarnos conocimiento del ámbito profesional y laboral.

Por ultimo dar gracias a todas aquellas personas que aportaron su ayuda para lograr culminar esta etapa de nuestras vidas.

DEDICATORIA

A Dios por darme vida y permitirme llegar a culminar mis estudios universitarios

A mis padres por ser mi apoyo incondicional y motivarme día a día para alcanzar este gran sueño

A mis hermanos quienes siempre me han brindado su amor y me han ayudado a levantarme las veces que he caído a darme cuenta de mis errores ayudándome a corregirlos

A mi hijo quién con su sonrisa y amor me inspira día a día a seguir adelante y a esforzarme por ser mejor persona para él

A mi novio por estar a mi lado y ser voz de aliento cada vez que lo necesité

A todas aquellas personas que me han brindado palabras de apoyo las cuales me han ayudado a llegar a donde estoy

A mis profesores quienes con su dedicación me ayudaron a formar para ser la profesional que soy

A mis compañeros con quienes compartí horas de aprendizaje, risas y momentos inolvidables a lo largo de este camino

Dedico este trabajo principalmente a Dios, a mis padres Gloria y Víctor, mis hermanos Valentina, Leopoldo y Daura, mi hijo Juan José, a mi novio Anderson y demás familiares, por el apoyo que siempre me brindaron durante los años de mi carrera.

No fue un camino fácil pero hoy puedo decir con mucho orgullo que alcance la meta y que esta será solo el principio de una serie de logros que alcanzaré de ahora en adelante como Ingeniera de Petróleos.

SAVIETH ACEROS GARCIA

DEDICATORIA

A Dios por darme la salud, la vida y la fuerza para poder alcanzar las metas propuestas en esta etapa, por siempre estar a mi lado e iluminarme.

A mis padres, Gabriel y Mónica, por todo su amor y apoyo incondicional, por los valores y enseñanzas otorgados a través de mi vida, por la excelente educación que me han brindado, por el ejemplo que me brindan todos los días, por ayudarme a tomar las decisiones correctas, por iluminar mi vida y llenarla de momentos inolvidables.

A mis hermanas, Paula, Daniela, Juanita, y mi sobrino Federico, por su amor constante, por su compañía incondicional, y por todos los momentos de felicidad que me brindan.

A María José por ser mi apoyo, mi consejera y amor durante todo este proceso, y por ayudarme a culminar esta etapa con éxito.

A mis abuelos, Rodrigo y Stella, por todo el cariño y amor que me han brindado, y por todo el apoyo a través de estos años.

A mis familiares, compañeros y amigos que me otorgaron su ayuda y compañía durante la elaboración de este proyecto.

JUAN CAMILO SARMIENTO MONCALEANO

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 24 |
| OBJETIVOS | 25 |
| 1. GENERALIDADES DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DE INTERÉS PARA EL PROYECTO | 26 |
| 1.1 CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES | 28 |
| 1.1.1 Localización | 28 |
| 1.1.2 Campos de interés | 28 |
| 1.1.3 Marco geológico | 29 |
| 1.2 CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA | 32 |
| 1.2.1 Localización | 32 |
| 1.2.2 Campos de interés | 33 |
| 1.2.3 Marco geológico | 34 |
| 1.3 CUENCA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA | 37 |
| 1.3.1 Localización | 37 |
| 1.3.2 Campos de interés | 38 |
| 1.3.3 Marco geológico | 38 |
| 1.4 CUENCA DEL CATATUMBO | 41 |
| 1.4.1 Localización | 41 |
| 1.4.2 Campos de interés | 42 |
| 1.4.3 Marco geológico | 42 |
| 1.5 CUENCA CAGUÁN-PUTUMAYO | 45 |
| 1.5.1 Localización | 45 |
| 1.5.2 Campos de interés | 46 |
| 1.5.3 Marco geológico | 46 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 50 |
| 2.1 CONECTIVIDAD PRIMARIA | 50 |
| 2.1.1 Tipos de cañones | 54 |
| 2.1.2 Métodos de cañoneo | 57 |
| 2.2 CONECTIVIDAD SECUNDARIA | 61 |
| 2.2.1 Fracturamiento hidráulico | 61 |
| 2.2.2 Fractura ácida | 63 |
| 2.3 OTRAS TÉCNICAS DE CONECTIVIDAD | 64 |
| 2.3.1 PURE | 64 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.2 TCP | 65 |
| 2.3.3 Extreme Overbalance Pressure (EOP) | 65 |
| 2.4 HERRAMIENTAS PARA LA ELECCIÓN DE MÉTODOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS | 66 |
| 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN | 68 |
| 3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN | 69 |
| 3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA | 70 |
| 3.2.1 Fase 1 | 70 |
| 3.2.2 Fase 2 | 71 |
| 3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS | 71 |
| 3.3.1 Fase 1 | 72 |
| 3.3.2 Fase 2 | 76 |
| 3.4 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS | 78 |
| 3.4.1 Fase 1 | 78 |
| 3.4.2 Fase 2 | 89 |
| 3.4.3 Fase 3 | 95 |
| 4. RESULTADOS | 103 |
| 4.1 FASE 1 | 103 |
| 4.1.1 Análisis de conectividad y cañoneo en campos operados por Ecopetrol S.A. | 103 |
| 4.1.2 Mapa geográfico de eventos | 111 |
| 4.1.3 Matriz de tendencias | 114 |
| 4.2 FASE 2 | 116 |
| 4.3 FASE 3 | 120 |
| 5. CONCLUSIONES | 125 |
| 6. RECOMENDACIONES | 127 |
| BIBLIOGRAFÍA | 128 |
| ANEXOS | 133 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Guía de temperatura para explosivos | 57 |
| Tabla 2. Sección final de la muestra | 70 |
| Tabla 3. Información de Pozos sección inicial | 73 |
| Tabla 4. Información de Pozos sección intermedia | 74 |
| Tabla 5. Información de Variables para la Matriz de tendencias por pozos | 76 |
| Tabla 6. Coordenadas por pozos | 84 |
| Tabla 7. Muestra de variables para importar datos | 85 |
| Tabla 8. Representación de métodos de cañoneo por pozos | 88 |
| Tabla 9. Normalización de datos de las cuencas | 98 |
| Tabla 10. Uso de los métodos de cañoneo por campo | 104 |

LISTA DE CUADROS

| | pág. |
|--|------|
| Cuadro 1. Factores que afectan el desempeño de la perforación | 54 |
| Cuadro 2. Condiciones de sobre balance y sobre balance extremo | 57 |
| Cuadro 3. Condiciones de bajo balance y bajo balance optimizado | 58 |
| Cuadro 4. Fuentes bibliográficas de mayor aporte para la formulación de la matriz | 77 |
| Cuadro 5. Fuente bibliográfica para la selección de mejoras en las tecnologías y técnicas | 78 |
| Cuadro 9. Aplicabilidad de las variables según el método de cañoneo | 91 |
| Cuadro 10. Rangos de operación de cada variable según el método de cañoneo | 92 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|---|------|
| Gráfica 1. Relación entre Población y Muestra | 71 |
| Gráfica 2. Frecuencia de métodos de cañoneo utilizados en Campo Castilla | 87 |
| Gráfica 3. Pozos Cañoneados por Año entre 2005-2015, en Cuencas productoras de Colombia donde opera ECOPETROL S.A. | 106 |
| Gráfica 4. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en LLAO | 107 |
| Gráfica 5. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en VMM | 108 |
| Gráfica 6. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en VSM | 109 |
| Gráfica 7. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en CAT | 110 |
| Gráfica 8. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en PUT | 111 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|---|------|
| Figura 1. Mapa de cuencas sedimentarias de Colombia | 27 |
| Figura 2. Cuenca de los Llanos Orientales | 28 |
| Figura 3. Columna estratigráfica de la Cuenca Llanos Orientales | 30 |
| Figura 4. Sección transversal esquemática de la Cuenca Llanos Orientales | 31 |
| Figura 5. Cuenca Valle Medio del Magdalena | 33 |
| Figura 6. Columna estratigráfica de la Cuenca Valle Medio del Magdalena | 35 |
| Figura 7. Sección transversal esquemática de la Cuenca Valle Medio del Magdalena | 36 |
| Figura 8. Cuenca Valle Superior del Magdalena | 37 |
| Figura 9. Columna estratigráfica de la Cuenca Valle Superior del Magdalena | 39 |
| Figura 10. Sección transversal esquemática de la Cuenca Valle Superior del Magdalena | 40 |
| Figura 11. Cuenca del Catatumbo | 41 |
| Figura 12. Columna estratigráfica de la Cuenca Catatumbo | 43 |
| Figura 13. Sección transversal esquemática de la Cuenca del Catatumbo | 44 |
| Figura 14. Cuenca Caguán-Putumayo | 45 |
| Figura 15. Columna estratigráfica de la Cuenca Putumayo | 47 |
| Figura 16. Sección transversal de la cuenca Putumayo | 48 |
| Figura 17. Terminación en agujero | 51 |
| Figura 18. Zonas que se atraviesan en un completamiento | 52 |
| Figura 19. Terminación en agujero | 53 |
| Figura 20. Zonas que atraviesa la conectividad primaria | 53 |
| Figura 21. Tipos de cañón | 55 |
| Figura 22. Funcionamiento y partes de un cañón | 55 |
| Figura 23. Técnica Casing Gun | 58 |
| Figura 24. Técnica de cañoneo | 59 |
| Figura 25. Cañoneo Tubing | 60 |
| Figura 26. Efecto del Fracturamiento Hidráulico | 62 |
| Figura 27. Fractura Ácida | 63 |
| Figura 28. Comparación gráfica de los túneles de los disparos obtenidos con diferentes técnicas de disparo | 64 |
| Figura 29. Metodología para la realizar un árbol de decisiones | 67 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30. Diseño del proyecto por fases | 68 |
| Figura 31. Metodología para la recolección de datos en Fase 1 | 72 |
| Figura 32. Metodología para la recolección de datos en Fase 2 | 76 |
| Figura 33. Metodología para el procesamiento y análisis de datos en Fase 1 | 78 |
| Figura 34. Explorador del MIGEP | 79 |
| Figura 35. Lista de Pozos del aplicativo MIGEP | 80 |
| Figura 36. Explorador Geovisor ANH | 80 |
| Figura 37. Ubicación del pozo Casabe XY en el GeoVisor de la ANH | 81 |
| Figura 38. Medición de las coordenadas del pozo Casabe 1441 en el GeoVisor de la ANH | 82 |
| Figura 39. Convertidor de coordenadas SUMAPA | 83 |
| Figura 40. Carga de Tabla de Datos | 85 |
| Figura 41. Mapa geográfico preliminar de eventos | 86 |
| Figura 42. Metodología para el procesamiento y análisis de datos para la matriz de tendencias | 86 |
| Figura 43. Planteamiento de la matriz de tendencias | 88 |
| Figura 44. Carga de tabla de datos de la matriz de tendencias | 89 |
| Figura 45. Metodología para el procesamiento y análisis de datos para Fase 2 | 89 |
| Figura 46. Representación de árbol de decisión | 93 |
| Figura 47. Árbol de decisión para el funcionamiento de matriz de selección teórica | 94 |
| Figura 48. Componentes del Módulo de Selección de Conectividad | 95 |
| Figura 49. Arquitectura de comunicación Cliente-Servidor | 96 |
| Figura 50. Interacción con la base de datos | 97 |
| Figura 51. Modelos de la estructura de la base de datos | 98 |
| Figura 52. Estructura de la matriz de tendencias para la base de datos | 99 |
| Figura 53. Estructura de la matriz teórica para la base de datos | 101 |
| Figura 54. Manual General de Completamiento de Pozos | 112 |
| Figura 55. Mapa geográfico de eventos final | 113 |
| Figura 56. Información del Pozo Castilla 133 | 113 |
| Figura 57. Información del Pozo Brisas 12 | 114 |
| Figura 58. Matriz de tendencias del módulo de conectividad del MGCP, selección de Cuenca | 114 |
| Figura 59. Campos de la Cuenca del Catatumbo | 115 |
| Figura 60. Resultados de tendencias de conectividad del Campo Petrolea | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 61. Matriz de selección, variable condición de presión | 116 |
| Figura 62. Matriz de selección, condición de presión desconocida | 117 |
| Figura 63. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón bajado a través del revestidor | 118 |
| Figura 64. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón bajado a través de tubería de producción | 119 |
| Figura 65. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón con TCP | 120 |
| Figura 66. Página de ingreso al MGCP | 121 |
| Figura 67. Interfaz inicial del MGCP | 121 |
| Figura 68. Sección del mapa geográfico de eventos en el MGCP | 122 |
| Figura 69. Sección de la matriz de selección teórica en el MGCP | 122 |
| Figura 70. Sección de la matriz de tendencias en el MGCP | 123 |
| Figura 71. Acceso al Video del Manual Operativo | 124 |
| Figura 72. Interfaz del Manual a manera de Video, incluido en el módulo | 124 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--|------|
| Anexo A. Representacion de los pozos cañoneados entre los años 2005-2015, en las cuencas productoras de Colombia donde opera Ecopetrol S.A. | 134 |

ABREVIATURAS

| | |
|------------------------|--|
| %. | Porcentaje. |
| ANH. | Agencia Nacional de Hidrocarburos. |
| API. | American Petroleum Institute. |
| CAT. | Catatumbo. |
| ECOPETROL S.A. | Empresa Colombiana de Petróleos. |
| EOB. | Extreme Over Balance (Sobre balance extremo). |
| EUB. | Extreme Under Balance (Bajo balance extremo). |
| Ft. | Medida de longitud en pies. |
| ICP. | Instituto Colombiano del Petróleo. |
| Km. | Kilómetros. |
| Km². | Kilómetros cuadrados. |
| LLAO. | Llanos Orientales. |
| MD. | Profundidad medida. |
| MGCP. | Manual General de Completamiento de Pozos. |
| MIGEP. | Modelo Integrado de Gestión de Exploración y Producción de Hidrocarburos. |
| OB. | Over Balance (Bajo balance). |
| OCM. | Evento de Completamiento en Ecopetrol S.A. |
| ODR. | Evento de Perforación en Ecopetrol S.A. |
| ORM. | Object Relational mapping (Mapeo de Objeto-Relacional) |
| Ph. | Presión hidrostática. |
| PURE. | Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation (Perforación para la explotación del depósito final) |
| PUT. | Putumayo. |
| Pyacimiento. | Presión de yacimiento. |
| TCP. | Tubing Conveyed Perforating (cañoneo bajado con la tubería de producción). |
| TTP. | Through Tubing Perforating (cañoneo a través del tubing) |
| TVD. | True vertical depth (Profundidad vertical). |
| UB. | Under Balance (Bajo balance). |
| VMM. | Valle Medio del Magdalena. |
| VSM. | Valle Superior del Magdalena. |
| WRK. | Evento de "Workover" en Ecopetrol S.A. |

GLOSARIO

ABRASIVE JET: método de cañoneo abrasivo que utiliza un flujo de alto volumen cargado con componentes abrasivos como arena.

AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN: punto geográfico donde se da la acumulación de sedimentos. Suelen clasificarse en continentales, marinos o de transición.

ANTICLINAL: pliegue producido en las rocas en forma de arco en el que las capas de roca son convexas hacia arriba. Las rocas más antiguas se encuentran en la parte central de la estructura, mientras que las más jóvenes se encuentran hacia la parte externa.

APLICACIÓN WEB: Programa informático que se ejecuta en un servidor web. Son un tipo especial de aplicación cliente/servidor en donde el cliente, el servidor y el protocolo que los comunica están estandarizados.

CAMPO: área que contiene uno o más yacimientos de petróleo, relacionados con los mismos aspectos geológicos.

CAÑÓN: dispositivo utilizado para perforar pozos de petróleo y gas en la preparación para la producción o inyección de fluidos.

CAÑÓN BAJADO A TRAVÉS DEL REVESTIDOR (CASING GUN): operaciones de cañoneo realizadas a través del revestimiento con diferentes tipos de líneas o guayas.

CAÑÓN BAJADO A TRAVÉS DE TUBERÍA DE PRODUCCIÓN (THROUGH TUBING): operación de cañoneo realizada a través de la tubería de producción lo que facilita el control de presiones.

CAÑÓN CON TCP (TUBING CONVEYED PERFORATING): técnica que involucra la corrida de un cañón unido a la tubería de producción.

CAÑONEO: proceso por el cual se comunica el pozo con las formaciones de interés hidrocarburífero de un yacimiento o formaciones receptoras para inyección de agua, esto a través de unas aberturas realizadas en el casing y zona cementada del pozo.

CEMENTO: insumo utilizado para sellar permanentemente los espacios anulares existentes entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo. También se utiliza cemento para sellar las formaciones y evitar la pérdida de fluido de perforación y para operaciones que implican desde la colocación de tapones de desviación hasta el taponamiento y abandono del pozo.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA: representación gráfica vertical de las unidades litológicas conformantes de un área específica.

CUENCA: depresión de la corteza terrestre formada por la actividad tectónica de las placas, en la que se acumulan sedimentos.

DENSIDAD DE DISPARO: número de disparos por pie que se realizan en una operación de cañoneo.

DIÁMETRO DE CAÑONEO: representa el diámetro del agujero de abertura que se crea en el revestidor durante el cañoneo.

EVENTO DE CONECTIVIDAD PRIMARIA: Ecopetrol S.A. define evento de conectividad primaria (cañoneo) como el proceso en el cual se crea la conectividad entre el pozo y el yacimiento por primera vez.

EXPENDABLE: configuración especial de cañones utilizados en métodos de cañoneo Through Tubing.

FALLA: interrupción en las capas de una roca, a lo largo de la cual existe un desplazamiento observable.

FALLA INVERSA: se da cuando el bloque de techo se desplaza en forma ascendente a lo largo del plano de falla respecto al bloque de piso.

FALLA NORMAL: se da cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo respecto al bloque de piso, y la superficie de falla se inclina en forma abrupta.

FASE: dirección en la cual las cargas son disparadas en relación a los otros disparos.

FORMACIÓN: cuerpo de roca suficientemente característico y continuo para ser mapeado.

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO: aplicación de la geología encargada del estudio de las características litológicas relacionadas con la formación, migración, entrapamiento y almacenamiento del petróleo.

GRAVA: rocas de pequeño tamaño que proceden de la fragmentación y disgregación de rocas.

HIDROCARBURO: compuesto orgánico, formado por hidrogeno y carbono. Se encuentra en forma de gases, líquidos y sólidos.

HIGH SHOT DENSITY (ALTA DENSIDAD DE DISPARO): configuración de cañones con alta densidad de disparo que permite cañonear grandes intervalos en menor tiempo.

INTERVALO DE INTERÉS: es la formación prospecto de ser productora de petróleo.

MODELOS: representan elementos o definiciones de términos en una base de datos.

OPENWELLS: Software que permite la administración y registro de las actividades de perforación y terminación de pozos. Además, simplifica y racionaliza la recopilación de datos de informes y análisis.

ORM (Mapeo de Objeto-Relacional): modelo de programación que consiste en la transformación de tablas de una base de datos, en una serie de entidades de fácil acceso para el programador.

PENETRACIÓN: profundidad o longitud de la zona penetrada por la carga detonante durante una operación de cañoneo.

PERMEABILIDAD: capacidad de la roca de permitir el flujo de fluidos a través de sus poros interconectados.

PERMEABILIDAD ABSOLUTA: es la medición de la permeabilidad obtenida cuando existe un solo fluido o fase presente en la roca.

POROSIDAD: porcentaje de volumen de poros o espacio poroso, o el volumen de roca que puede contener fluidos.

POZO: hace referencia a cualquier perforación del suelo, cuyo objetivo es extraer fluidos de un yacimiento o inyectar fluidos a una formación receptora.

PRESIÓN: fuerza distribuida sobre una superficie, usualmente medida en libra fuerza sobre pulgada cuadra, o psi, en unidades de campo de petróleo de Estados Unidos.

PRESIÓN HIDROSTÁTICA: es la fuerza por unidad de área producida por una columna de fluido.

PURE: Sistema de perforación para limpieza de las perforaciones.

ROCA GENERADORA: roca con alto contenido de materia orgánica, que al estar sometida a altas temperaturas y presiones necesarias generara hidrocarburos.

ROCA RESERVORIO: roca que posee la capacidad de almacenar fluidos y permitir su paso a través de esta. Debe poseer buenas condiciones de porosidad y permeabilidad.

ROCA SELLO: roca de baja permeabilidad que actúa como barrera frente a la migración de petróleo.

SCALL GUN (SCALLOP GUN): configuración especial del cañón, con un perfil hueco dentro del cañón y cercano a la carga explosiva.

SEPARACIÓN DE CARGAS: Distancia existente entre el interior del casing y la carga.

SKIN (DAÑO DE LA FORMACIÓN): se refiere a cualquier pérdida de presión adicional en la zona del yacimiento en la cercanía del pozo que causa disminución en la productividad del mismo.

SLICK GUN (SLICKLINE GUN): línea delgada con la cual se transporta el cañón de superficie a fondo.

TRAMPA: es una configuración rocosa impermeable que evita la migración de hidrocarburo.

WGS84: sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto en la tierra, y el cual es utilizado para el desarrollo del aplicativo MGCP.

WIRELIN: línea eléctrica con la cual se transporta el cañón de superficie a fondo, mientras transmite señales.

YACIMIENTO CONVENCIONAL DE HIDROCARBUROS: unidad del subsuelo constituida por roca permeable que contiene petróleo y/o gas con agua las cuales conforman un solo sistema.

ZONA DE DAÑO: zona en la cual ha sido alterada la permeabilidad a raíz del proceso de cañoneo.

RESUMEN

TÍTULO: Diseño del módulo de selección de conectividad para el manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A.

DESCRIPCIÓN

Durante la planeación del completamiento de pozos los profesionales se ven abrumados por las grandes cantidades de información que deben tener en cuenta en un tiempo limitado generando en algunos casos una inadecuada planeación, afectando directamente la eficiencia del cañoneo, muchas veces afectando las propiedades de la formación y finalmente la producción del pozo.

Este proyecto tiene como objetivo identificar los métodos de conectividad primaria (cañoneo) utilizados por Ecopetrol S.A., durante los años 2005 a 2015 en las cuencas sedimentarias de Colombia donde se tienen operaciones de completamiento por parte de Ecopetrol S.A. como el Valle Medio del Magdalena (VMM), el Valle Superior del Magdalena (VSM), el Catatumbo (CAT), el Putumayo (PUT) y los Llanos Orientales (LLAO). Dicha información técnica, se empleó para conformar el módulo de selección de conectividad primaria.

Este módulo conducirá a un proceso de selección del método de cañoneo a través de un mapa de eventos ubicados por pozos, y dos matrices, una matriz de selección basada en las tendencias de los métodos por campo, y otra basada en variables teóricas para la selección del método más adecuado.

PALABRAS CLAVE

Selección de conectividad

Completamiento

Cañoneo

Cuencas sedimentarias

Módulo de selección

INTRODUCCIÓN

La operación de cañoneo es muy importante durante el desarrollo del completamiento inicial de un pozo, debido a que es el paso para garantizar la óptima producción de hidrocarburos del yacimiento. El realizar una buena conectividad depende primariamente en escoger un buen método para conectar el pozo con el yacimiento sin afectar este último.

El presente trabajo pretende realizar un aporte a la empresa Ecopetrol S.A y a la Fundación Universidad de América, mediante una herramienta de fácil interpretación como lo es un módulo de selección de conectividad que hará parte del manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A. Este se plantea como parte de la solución ante los problemas que se presentan durante la etapa de planeación de proyectos de completamiento, específicamente inconvenientes en cuanto al tiempo de su maduración, siendo éste afectado directamente por un alto volumen de información por analizar, acompañado por la ausencia de una herramienta de soporte para un diseño eficiente de procesos de conectividad, generando una pérdida de valor agregado en la maduración de proyectos de selección de conectividad del yacimiento con el pozo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar el módulo de selección de conectividad para el manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar información de los eventos de conectividad y cañoneo en los campos de Ecopetrol S.A. en el periodo comprendido entre enero de 2005 a diciembre de 2015.
- Representar en un mapa geográfico de Colombia los datos de conectividad identificados en los pozos de Ecopetrol S.A.
- Determinar las variables teóricas para la identificación de procesos de conectividad.
- Generar una matriz teórica con variables operativas que permita facilitar la toma de decisiones en la selección de procesos de conectividad para las operaciones de Ecopetrol S.A.
- Estructurar el modelo de gestión de información sistematizada para el módulo de selección de conectividad para el manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A.

1. GENERALIDADES DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DE INTERÉS PARA EL PROYECTO

En éste capítulo, se presenta una descripción general que incluye su localización, geología estructural y geología del petróleo para las cuencas sedimentarias de Colombia donde se encuentran los campos operados por Ecopetrol S.A. En Colombia actualmente de acuerdo con la clasificación realizada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), se tienen 23 cuencas sedimentarias como se detalla en la **Figura 1**, Ecopetrol S.A. actualmente tiene operaciones en nueve de esas cuencas, pero con la revisión preliminar realizada a través de Openwells se determinaron operaciones de cañoneo y conectividad en las siguientes cinco (5) cuencas: Llanos Orientales, Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Catatumbo y Putumayo.

Figura 1. Mapa de cuencas sedimentarias de Colombia



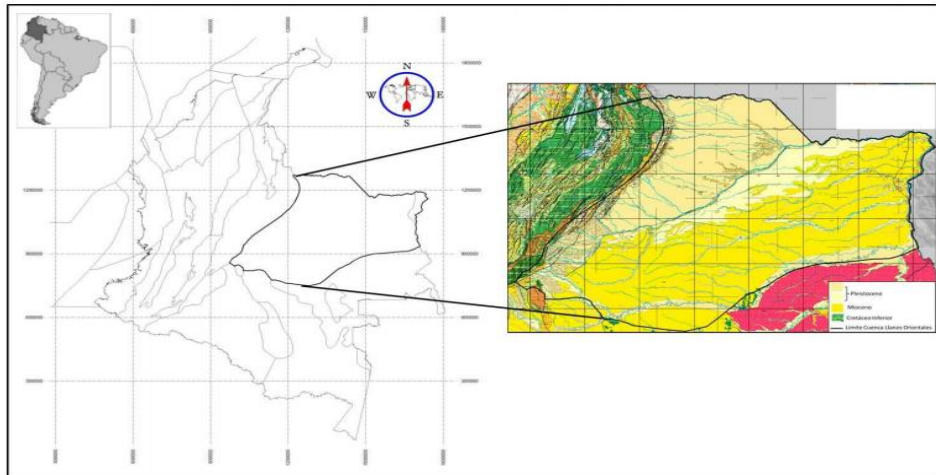
Fuente: Barrero, Dario, et al. "Colombian Sedimentary Basins".PDF. Página 26. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). [citado septiembre 14, 2016]. Modificada por los autores.

A continuación, se presentan las generalidades de cada cuenca donde se obtuvieron datos de conectividad en campos operados por Ecopetrol S.A. en el periodo de 2005 -2015, que corresponden a: Llanos Orientales (LLAO), Valle Medio del Magdalena (VMM), Valle Superior del Magdalena (VSM), Catatumbo (CAT) y Putumayo (PUT).

1.1 CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

1.1.1 Localización. Se encuentra ubicada en el noreste de Colombia. Según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) e ICP/Ecopetrol¹, la cuenca cubre una extensión de 225.603 km², y sus límites son la cuenca Apure- Barinas, al norte (con la cual se encuentra separada por el límite internacional de Colombia con Venezuela); la Serranía de la Macarena y el Arco del Vaupés, al sur; el sistema de fallas de Guaicáramo y la Cordillera Oriental, al oeste; y el Escudo de Guyana, al este. Las Cuencas Sedimentarias con las que tiene frontera son la Cuenca de la Cordillera Central y la Cuenca Caguan- Vaupés. La cuenca atraviesa los Departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta. En la **Figura 2** se muestra la ubicación de la cuenca de los Llanos Orientales. En esta cuenca se han descubierto más de 50 campos, entre los que se encuentran los gigantes Caño-Limón, Castilla, Rubiales y Apiay.

Figura 2. Cuenca de los Llanos Orientales



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. PDF. Página 33 [citado septiembre 14, 2016].

1.1.2 Campos de interés. A continuación, se presentan los campos donde se encontraron procesos de cañoneo, convirtiéndose así en campos de interés para el proyecto:

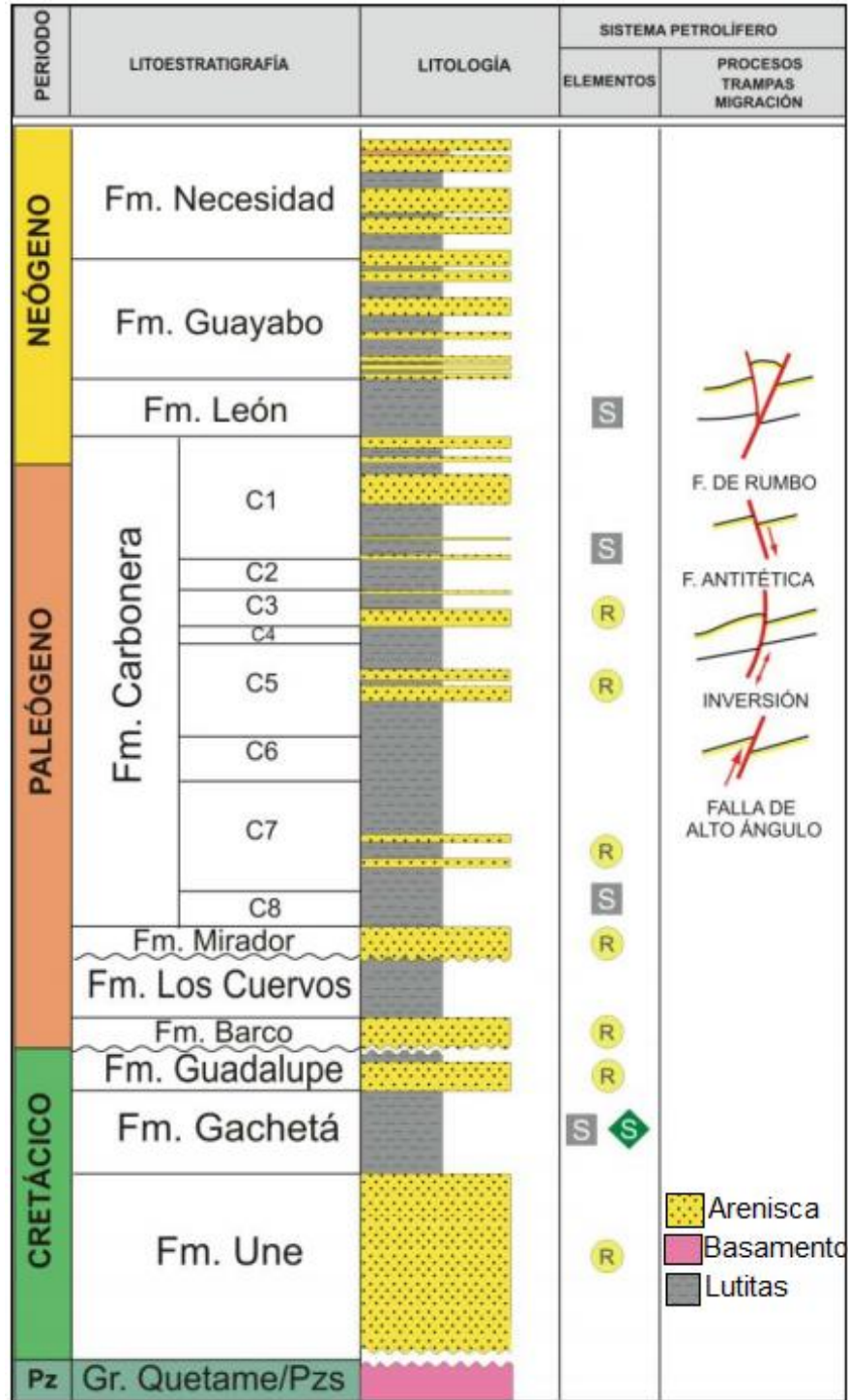
¹ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. PDF. Página 32.

- Akacias.
- Apiay.
- Apiay Este.
- Caño Sur Este.
- Castilla.
- Castilla Norte.
- Chichimene.
- Cupiagua.
- Exploratorio.
- Gavan.
- Guatiquia.
- Libertad Norte.
- Merey.
- Pachaquiario.
- Suria.
- Suria Sur.

1.1.3 Marco geológico. A continuación, se presentan las generalidades de la Cuenca de los Llanos Orientales, su estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo.

1.1.3.1 Columna estratigráfica. Esta cuenca cuenta con 10 formaciones en su columna estratigráfica como se puede ver en la **Figura 3**, La estratigrafía de la cuenca comprende en mayor parte rocas precámbricas del Basamento, Paleozoicas, Cretáceo y Terciario.

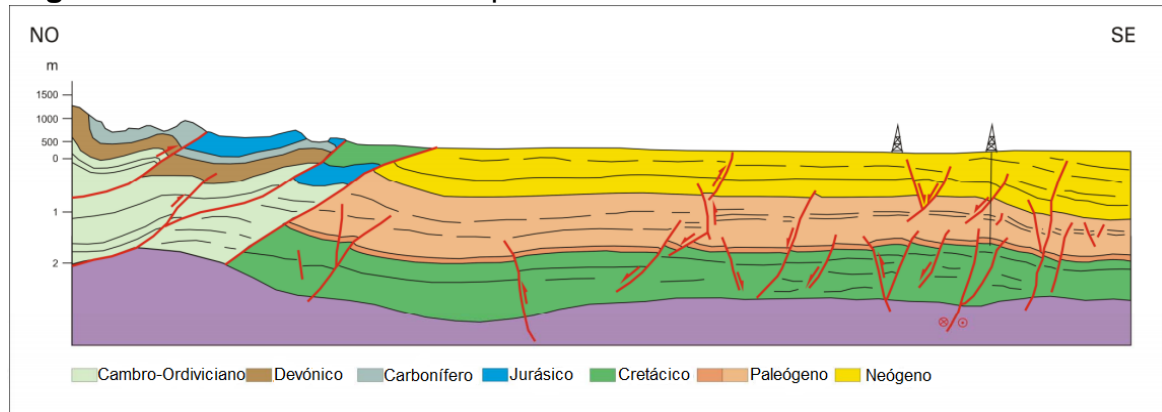
Figura 3. Columna estratigráfica de la Cuenca Llanos Orientales



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. PDF. Página 46 [citado septiembre 14, 2016]. Modificada por los autores.

1.1.3.2 Geología estructural. La cuenca de los Llanos Orientales se divide en dos dominios estructurales; el dominio del Piedemonte y el dominio de los Llanos, y este último se divide en dos partes Llanos de Casanare-Arauca y Llanos del Meta. Las formaciones productoras en esta cuenca son Une, Gacheta, Guadalupe en el Cretácico Superior, y la formación Mirador. En la **Figura 4** se puede observar la sección transversal de forma esquemática de la cuenca.

Figura 4. Sección transversal esquemática de la Cuenca Llanos Orientales



Fuente: Barrero, Dario, et al. "Colombian Sedimentary Basins".PDF. Página 40. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS.

1.1.3.3 Geología del petróleo. Sus principales parámetros geológicos relacionados con la generación de hidrocarburos son los siguientes.

- **Roca generadora.** La formación Gacheta es la roca generadora principal de la cuenca de los Llanos Orientales, compuesta por lutitas mixtas entre marinas y continentales. *"Contiene un Kerogeno tipo II y III, rangos de TOC entre 1 -3 %, y un espesor efectivo de 150-300 pies"*.²
- **Roca reservorio.** El reservorio está constituido por areniscas de las formaciones Mirador, Barco y Carbonera. Tiene una porosidad que varía entre el rango de 10% a 30%, y un rango de gravedad API de 42°.
- **Roca sello.** La Formación León es considerada como el sello regional de la cuenca. Las unidades C-2, C-4, C-6 y C-8 de la formación Carbonera son consideradas como sellos locales, pero de estas la mejor es la unidad C-2 debido a su extensión.

² Barrero, Dario, et al. Colombian Sedimentary Basins. PDF. Página 71. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH).

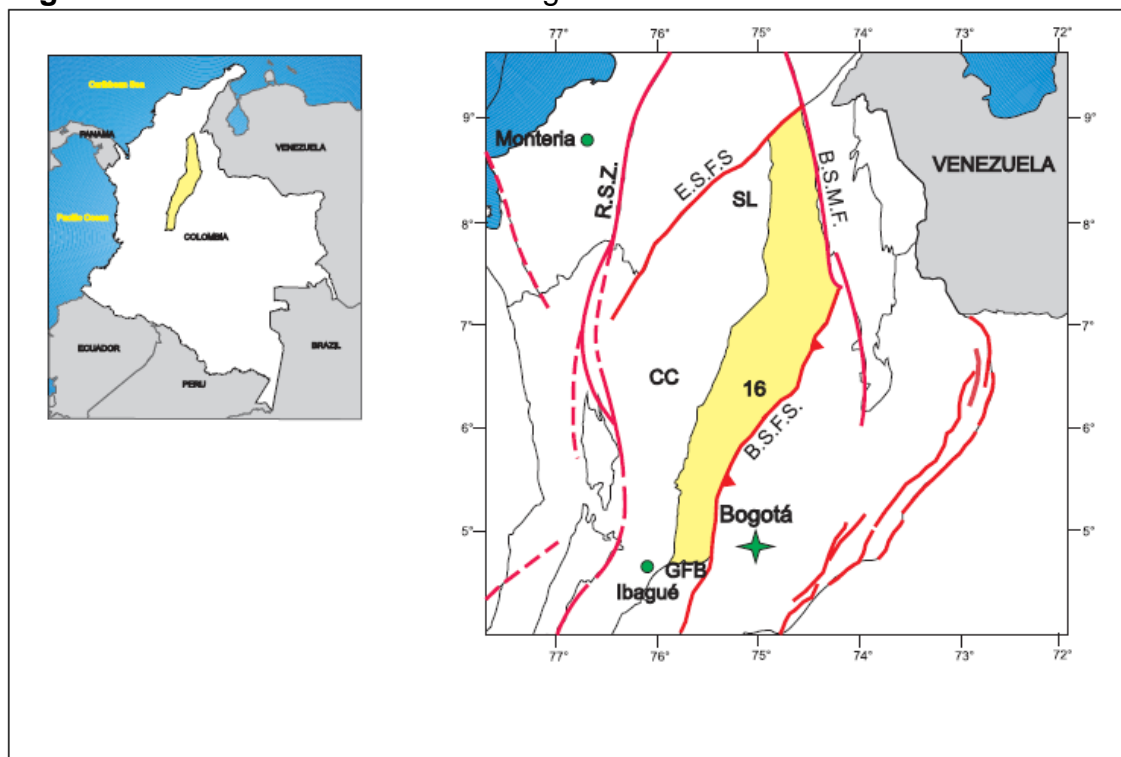
- **Migración.** Se documentó que la migración en la cuenca de los Llanos Orientales ocurrió en dos pulsos, el primero durante el Eoceno Superior al Oligoceno, y el segundo pulso comenzó en el Mioceno hasta el presente. Los hidrocarburos emigraron desde rocas Cretáceas.
- **Trampas.** La cuenca cuenta con los siguientes tipos de entrampamiento. En el sector del Piedemonte cuenta mayormente con cabalgamientos y pliegues, en el Casanare se hallan fallas antitéticas, en la zona de Arauca se tienen pliegues suaves y fallas de rumbo, en Vichada se identifican fallas normales, y en el Meta se localizan pliegues suaves, trampas estratigráficas y fallas de rumbo.

1.2 CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

1.2.1 Localización. *“Está localizada geomorfológicamente a lo largo de la porción central del valle cursado por el río Magdalena, entre las cordilleras Oriental y Central de Los Andes colombianos, cubriendo un área de 32.000 km². Comprende parte de los Departamentos de Boyacá, Santander, Cundinamarca y Antioquia, entre otros”*³. En la **Figura 5** se muestra la ubicación de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. En la cuenca del Valle Medio del Magdalena se encuentra el primer campo gigante descubierto en Colombia, La Cira–Infantas; además de este se han descubierto más de 41 campos.

³ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. PDF. Página 25 [citado septiembre 15, 2016].

Figura 5. Cuenca Valle Medio del Magdalena



Fuente: Barrero, Dario, et al. "Colombian Sedimentary Basins".PDF. Página 45. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Modificada por los autores.

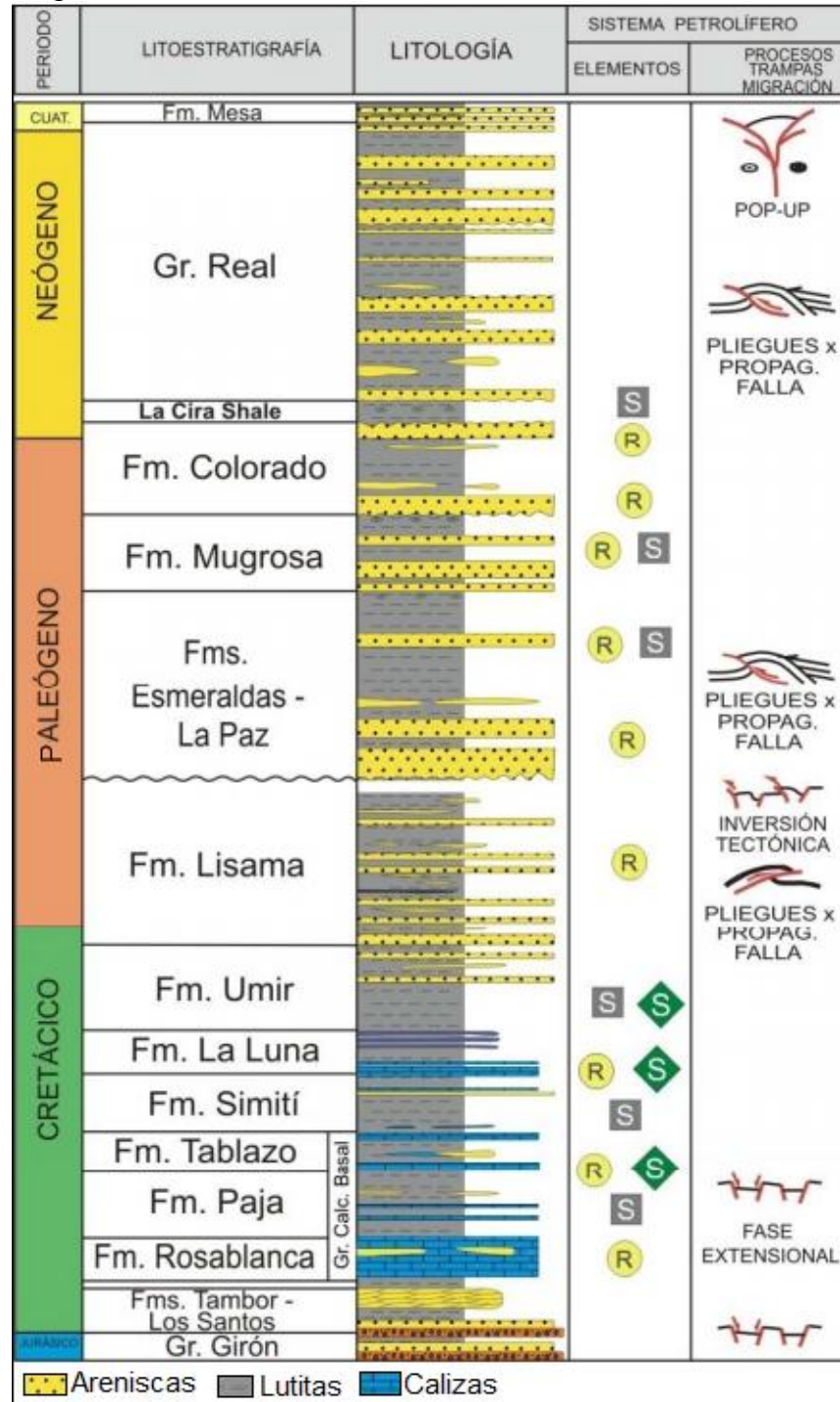
1.2.2 Campos de interés. A continuación, se presentan los campos donde se encontraron procesos de cañoneo, convirtiéndose así en campos de interés para el proyecto:

- Bonanza.
- Cantagallo.
- Casabe.
- Casabe Sur.
- Conde.
- Exploratorio.
- Gala.
- Galan.
- Garzas.
- Infantas.
- La Cira.
- Lisama.
- Llanito.
- Nutria.
- Sabana.
- San Roque.
- Santos.
- Suerte.
- Tesoro.
- Tisquirama.
- Toqui Toqui.
- Peñas Blancas.
- Yarigui Cantagallo.

1.2.3 Marco geológico. A continuación, se presentan las generalidades de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, su estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo.

1.2.3.1 Columna estratigráfica. A continuación, en la **Figura 6** se presenta la columna estratigráfica de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Esta cuenca cuenta con rocas formadas desde el periodo Paleozoico a Cuaternario con múltiples discordancias.

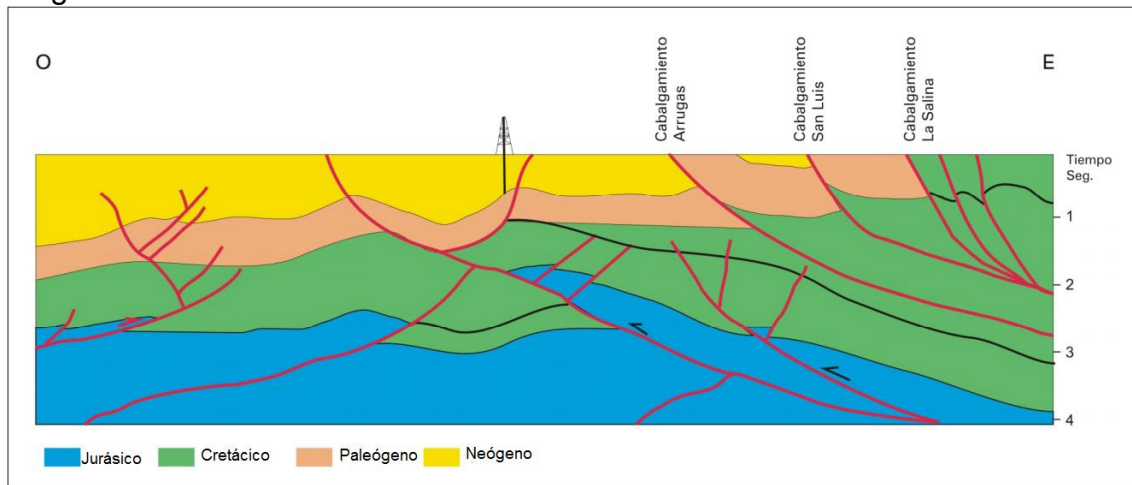
Figura 6. Columna estratigráfica de la Cuenca Valle Medio del Magdalena



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 39 [citado septiembre 16, 2016]. Modificada por los autores.

1.2.3.2 Geología estructural. En la cuenca se han logrado identificar dos sistemas de fallas principales, el primero en dirección NE-SW, pertenece a la falla Cocorná; y el otro sistema en dirección NW-SE, pertenece a la falla Velásquez. En la **Figura 7** se puede observar la sección transversal de la cuenca.

Figura 7. Sección transversal esquemática de la Cuenca Valle Medio del Magdalena



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 40 [citado septiembre 18, 2016].

1.2.3.3 Geología del petróleo. Sus principales parámetros geológicos relacionados con la generación de hidrocarburos son los siguientes.

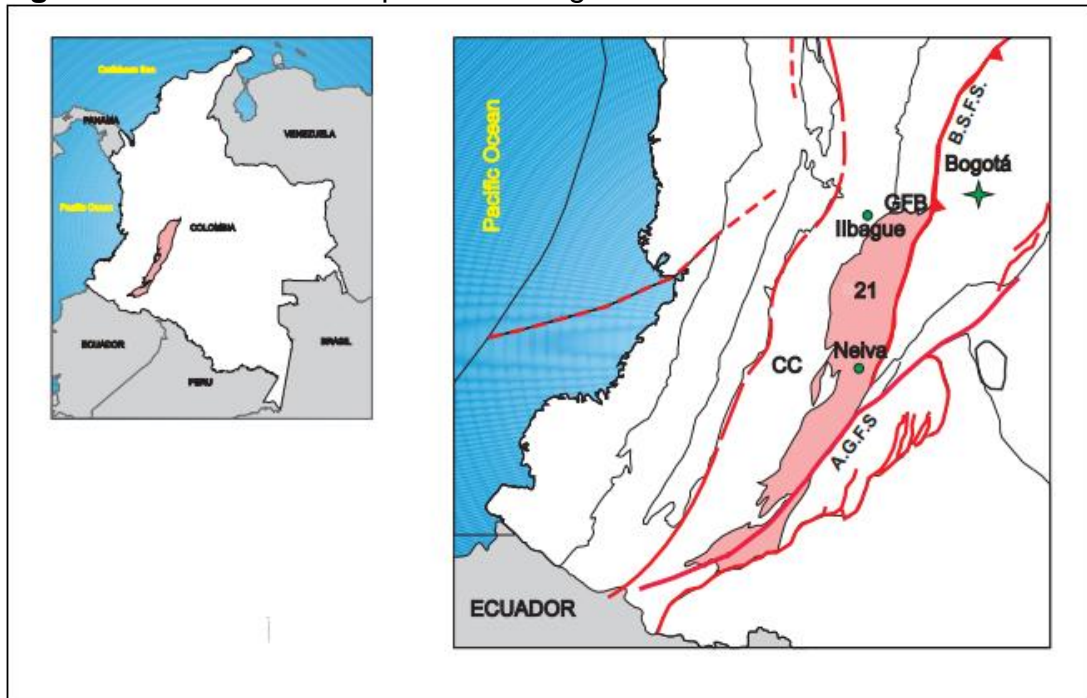
- **Roca generadora.** Corresponden a lutitas y calizas las cuales se encuentran en la formación La Luna. Esta presenta valores promedio de TOC entre 2 y 6%, y Kerogeno tipo II. Las formaciones Rosa blanca, Paja y Tablazo también se pueden considerar generadoras, pero con potencial limitado.
- **Roca reservorio.** El 97% de las reservas de petróleo provienen de areniscas del Paleógeno, de las formaciones Lisama, Esmeralda-La Paz, y Colorado-Mugrosa. Tienen porosidades que varían entre 15 a 20%, y permeabilidades entre 20 a 600 mD.
- **Roca sello.** La roca sello para las areniscas del Paleógeno son las formaciones Esmeralda y Colorado. La roca sello para calizas del Cretáceo son las formaciones Simití y Umir.

- **Migración.** Los hidrocarburos presentes han llegado desde la parte profunda de la cuenca por migración de buzamiento arriba, por medio de los estratos arenosos de las unidades terciarias.
- **Trampas.** El mecanismo principal de entrapamiento de la cuenca es la Falla Velásquez; además se tienen pliegues bajo superficies de cabalgamiento, estructuras dúplex, estructuras con cierres de falla y trampas estratigráficas.

1.3 CUENCA DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA

1.3.1 Localización. Comprende en la parte superior del curso del Rio Magdalena. Se extiende desde Pitalito en el sur del Departamento del Huila, hasta Honda en el norte del Departamento del Tolima. La cuenca tiene una extensión de 26.200 km², en los cuales se han descubierto más de 28 campos con petróleo y gas. Sus campos más representativos son Dina, Rio Ceibas y Yaguará. En la **Figura 8** se puede observar la ubicación de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena.

Figura 8. Cuenca Valle Superior del Magdalena



Fuente: Barrero, Dario, et al. "Colombian Sedimentary Basins".PDF. Página 50. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Modificada por los autores.

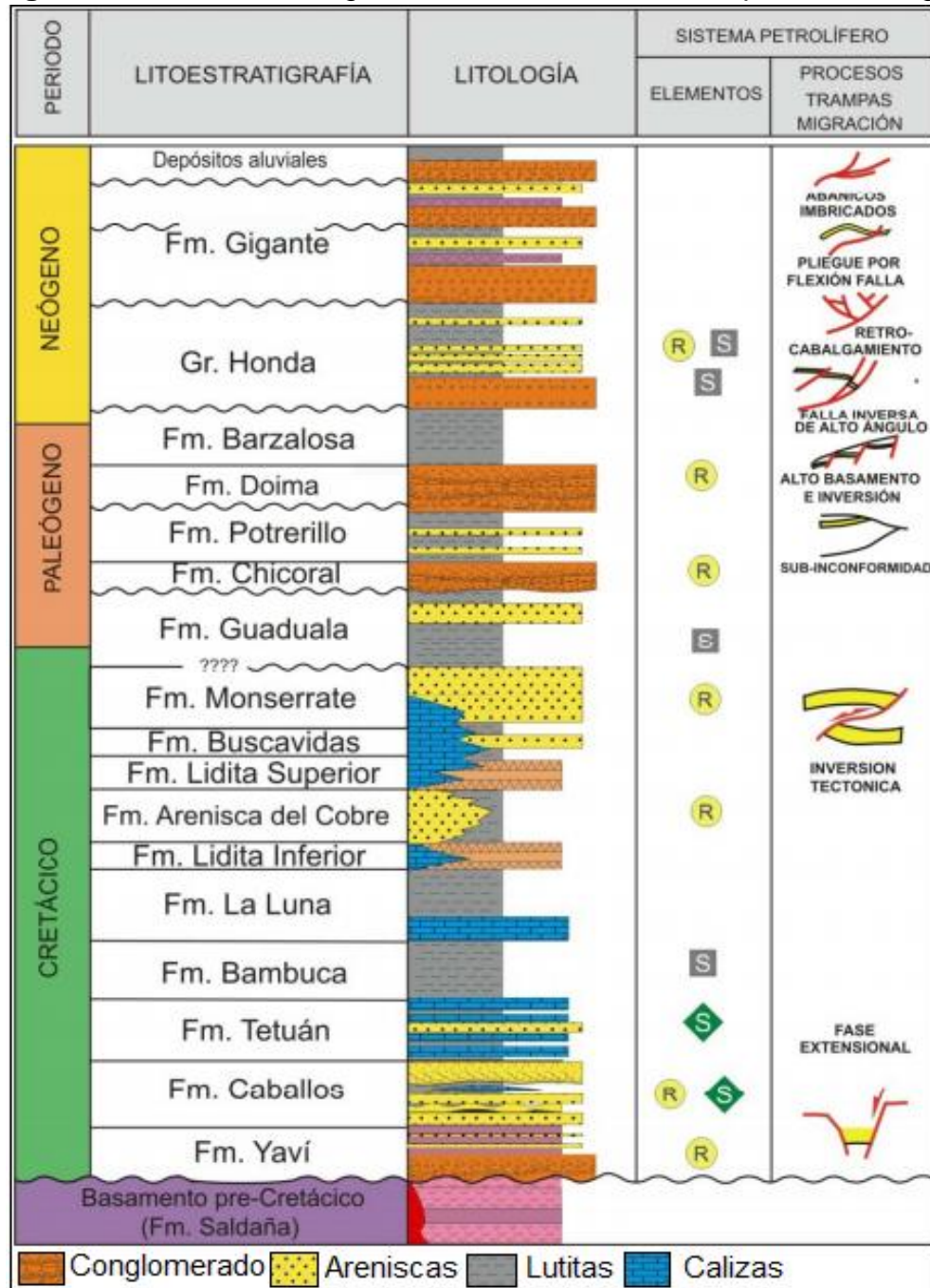
1.3.2 Campos de interés. A continuación, se presentan los campos donde se encontraron procesos de cañoneo, convirtiéndose así en campos de interés para el proyecto:

- Arrayan.
- Balcon.
- Brisas.
- Cacica.
- Dina.
- Dina Terciario.
- Loma Larga.
- Ortega.
- Pacande.
- Quimbaya.
- San Francisco.
- Tempranillo.
- Tenax.

1.3.3 Marco geológico. A continuación, se presentan las generalidades de la cuenca del Valle Superior del Magdalena, su estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo.

1.3.3.1 Columna estratigráfica. A continuación, en la **Figura 9** se presenta la columna estratigráfica de la cuenca del Valle Superior del Magdalena. Esta cuenca cuenta con 17 formaciones las cuales serán explicadas.

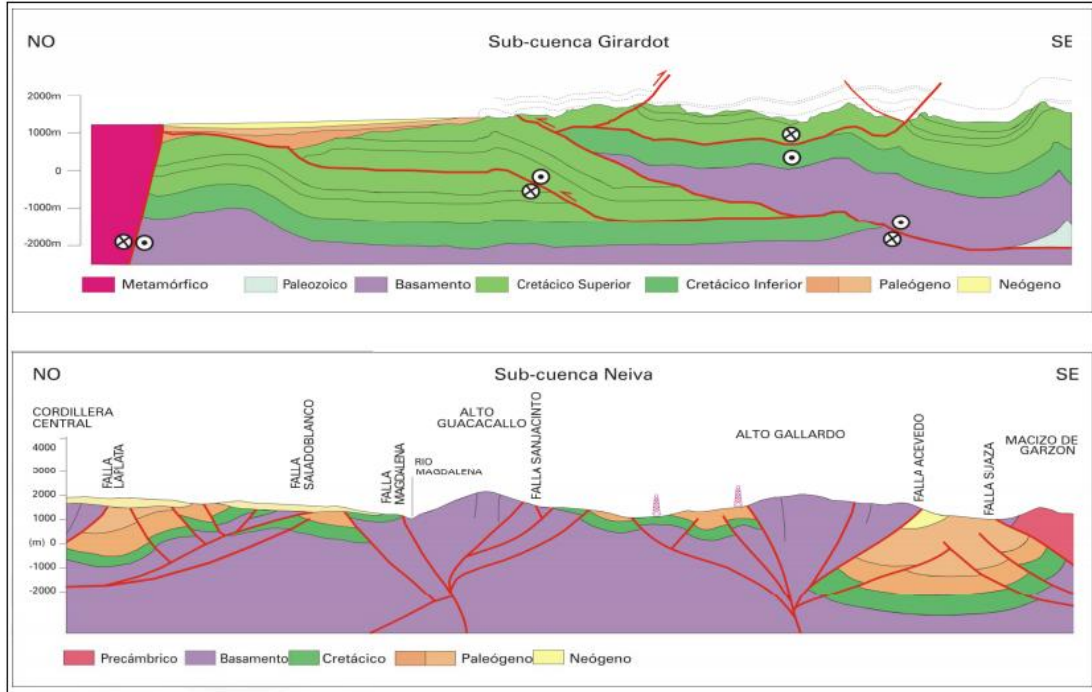
Figura 9. Columna estratigráfica de la Cuenca Valle Superior del Magdalena



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 47 [citado septiembre 19, 2016]. Modificada por los autores.

1.3.3.2 Geología estructural. Está influenciada sobre las estríbaciones occidentales de la cordillera oriental, con bloques de basamento levantados que cubren las secuencias sedimentarias del Cretácico y Terciario Inferior. En la **Figura 10** se muestran los cortes transversales de la cuenca del Valle Superior del Magdalena.

Figura 10. Sección transversal esquemática de la Cuenca Valle Superior del Magdalena



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 48 [citado septiembre 20, 2016]. Modificada por los autores.

1.3.3.3 Geología del petróleo. Sus principales parámetros geológicos relacionados con la generación de hidrocarburos son los siguientes.

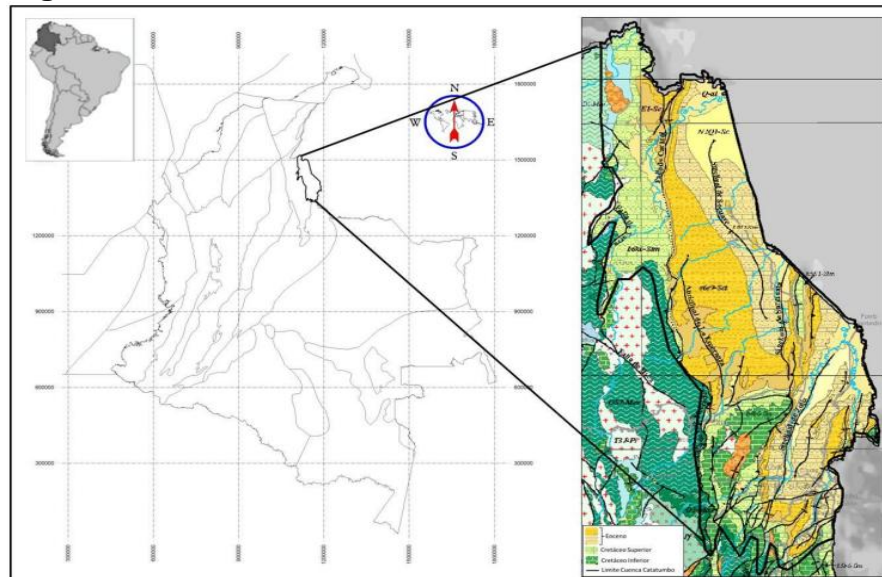
- **Roca generadora.** Corresponden a la Formación La Luna y la Formación Tetuán. El TOC varía entre 1 y 4%, y el kerogeno es tipo II.
- **Roca reservorio.** El principal reservorio es la Formación Caballos, pero también tiene otras formaciones almacenadoras como la Formación Honda y Monserrate. Su porosidad varía entre 10 a 25%, y los valores de permeabilidad son de 100 a 4 mD.

- **Roca sello.** Las lutitas y calizas finogranulares de las formaciones Tetuán, Bambuca y la Luna, son las rocas sello más importantes de la cuenca. La formación Guaduala y la formación Honda también son importantes sellos en la cuenca.
- **Migración.** En esta cuenca se han observado migraciones en dirección lateral. En áreas falladas como los sistemas de cabalgamiento y fallas de rumbo, sirven como canales para la migración vertical.
- **Trampas.** Las trampas encontradas en la cuenca son de tipo estructurales con pliegues asociados a fallas de flexión, anticlinales fallados, pliegues por retrocabalgamientos, y anticlinales asociados a transcurrencia.

1.4 CUENCA DEL CATATUMBO

1.4.1 Localización. Se sitúa en la parte Norte de Colombia, en el Departamento de Norte de Santander. Está limitada al oeste, por la Serranía de Perijá y el Macizo de Santander (Cordillera Oriental), y por los Andes de Mérida, al sureste. Esta cuenca tiene una extensión aproximada de 7700 km². Sus campos más importantes son Río de Oro, Tibú, Sardinata, Río Zulia y Petrolea. En la **Figura 11** se puede observar la ubicación de la Cuenca del Catatumbo.

Figura 11. Cuenca del Catatumbo



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. PDF. Página 31 [citado septiembre 20, 2016]. Modificada por los autores.

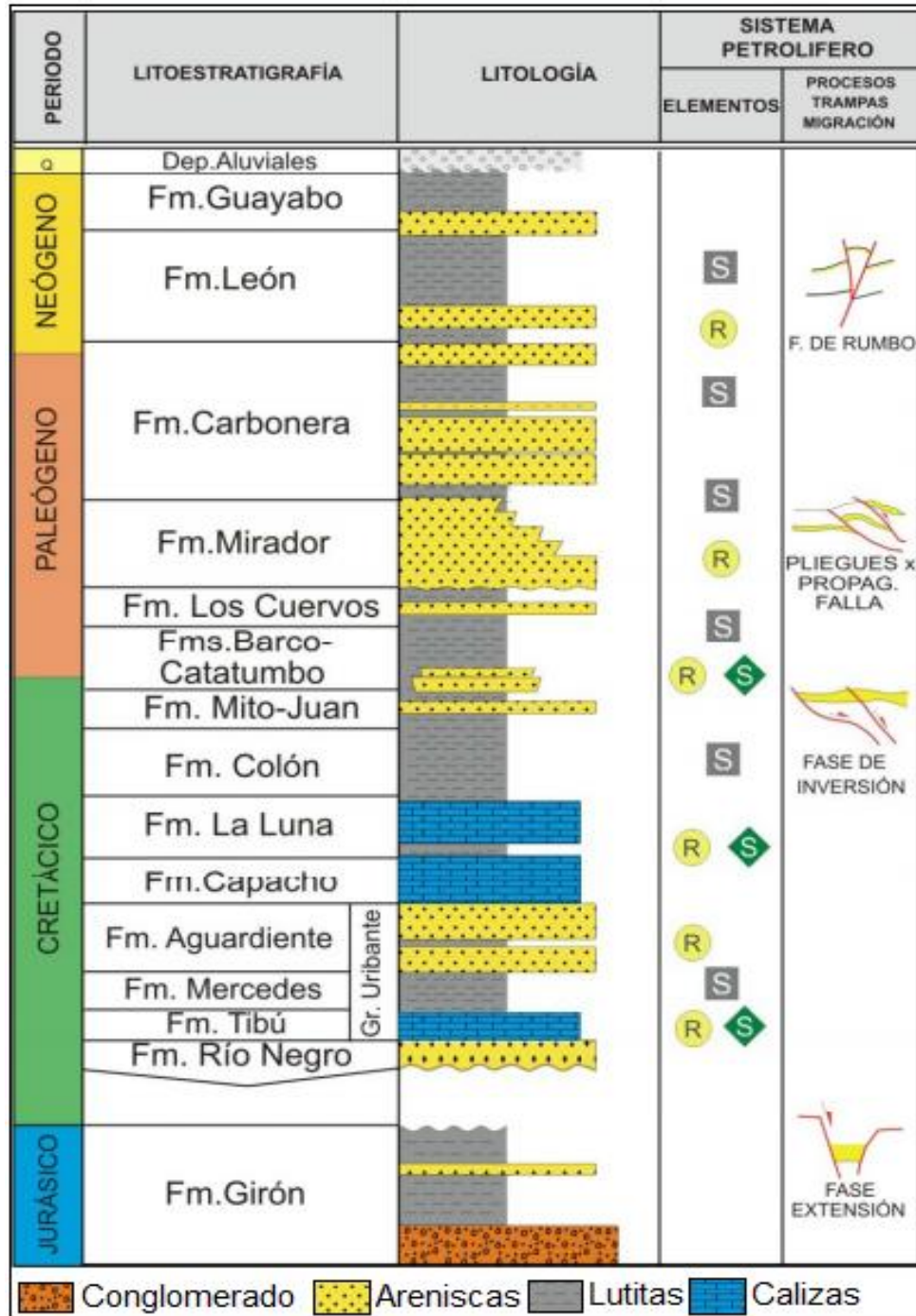
1.4.2 Campos de interés. A continuación, se presentan los campos donde se encontraron procesos de cañoneo, convirtiéndose así en campos de interés para el proyecto:

- Petrolea.
- Sardinata.
- Tibú.

1.4.3 Marco geológico. A continuación, se presentan las generalidades de la cuenca del Catatumbo, su estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo.

1.4.3.1 Columna estratigráfica. En la **Figura 12** se presenta la columna estratigráfica de la Cuenca del Catatumbo. Esta cuenca sobrepasa los 15.000 pies de espesor, y sus rocas tienen un rango de edad desde el Jurásico hasta el presente.

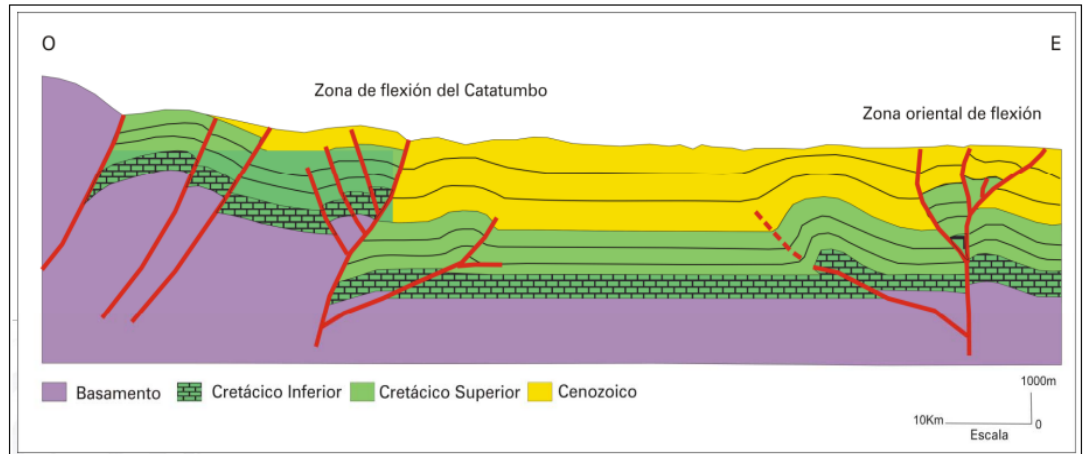
Figura 12. Columna estratigráfica de la Cuenca Catatumbo



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 5 [citado septiembre 20, 2016]. Modificada por los autores.

1.4.3.2 Geología estructural. La Cuenca es de tipo antepaís y es la continuación de la Cuenca Maracaibo en Venezuela. Se caracteriza por amplios pliegues asimétricos cortados por fallas inversas y longitudinales. En la **Figura 13** se puede observar el corte transversal de la Cuenca del Catatumbo.

Figura 13. Sección transversal esquemática de la Cuenca del Catatumbo



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Cuencas Minironda. PDF. Página 6 [citado septiembre 21, 2016]. Modificada por los autores.

1.4.3.3 Geología del petróleo. Sus principales parámetros geológicos relacionados con la generación de hidrocarburos son los siguientes.

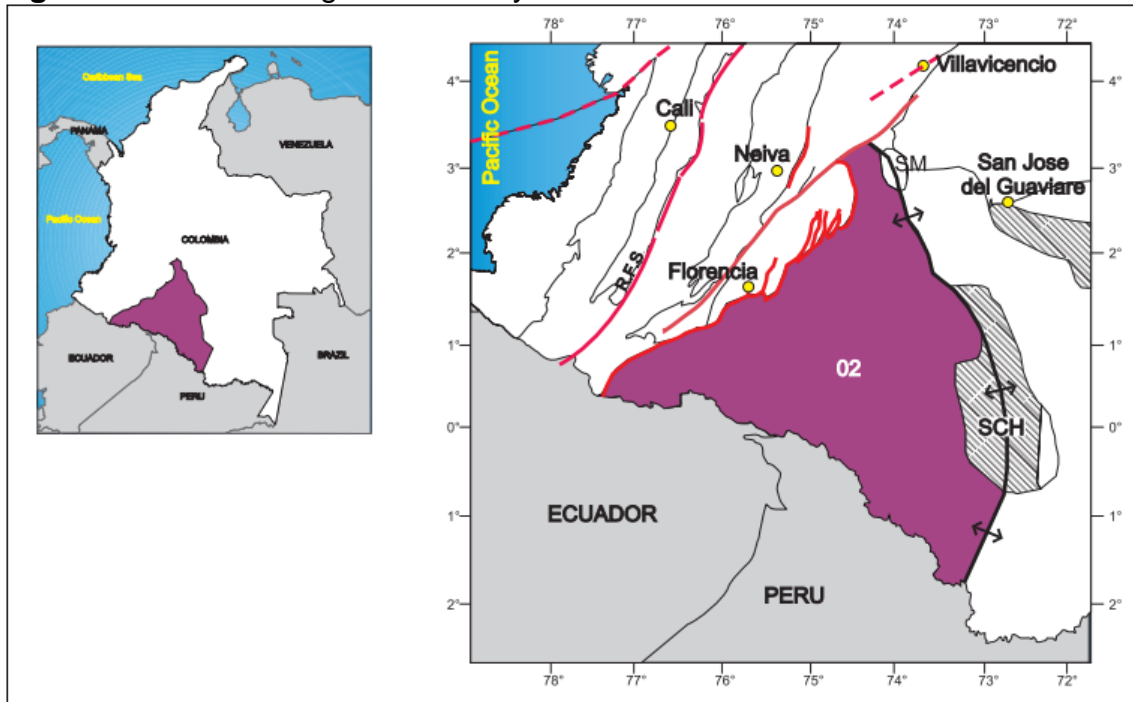
- **Roca generadora.** Corresponde a la formación la Luna. El TOC varía entre 1,5 y 9,6%, además el kerogeno es tipo I. Las formaciones Capacho, Tibú y Mercedes también son consideradas como generadoras.
- **Roca reservorio.** Los principales reservorios en esta cuenca son las formaciones Barco, Catatumbo, Carbonera y Mirador. Las porosidades varían entre 16 y 22%, y tienen una permeabilidad aproximada de 20 mD.
- **Roca sello.** Corresponde a la formación León; además de esta las lutitas marinas y no marinas de la formación Mito-Juan forman sellos laterales.
- **Migración.** La migración lateral a través de los cuerpos de arenitas finas, y la migración vertical a lo largo de las superficies de fallas, son las vías más efectivas para la migración de los hidrocarburos en la cuenca.

- **Trampas.** Tiene fallas como estructuras asociadas a zonas de inversión tectónica, fallas inversas en el extremo oeste de la cuenca y fallas de rumbo en el extremo este.

1.5 CUENCA CAGUÁN-PUTUMAYO

1.5.1 Localización. Se encuentra ubicada en la parte Sur de Colombia. Esta limitada al noroeste por la Cordillera Oriental, la estructura La Macarena al noreste y los límites internacionales de Ecuador y Perú al sur. Esta cuenca comprende un área aproximada de 110.304 km² y abarca los Departamentos de Meta, Caquetá y Putumayo. Sus campos más representativos son Orito, Acae-San Miguel y Lloro. En la **Figura 14** se puede observar la ubicación de la Cuenca Caguán-Putumayo. Según el objeto de estudio se presentará la región del Putumayo únicamente.

Figura 14. Cuenca Caguán-Putumayo



Fuente: Barrero, Dario, et al. "Colombian Sedimentary Basins".PDF. Página 32. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Modificada por los autores.

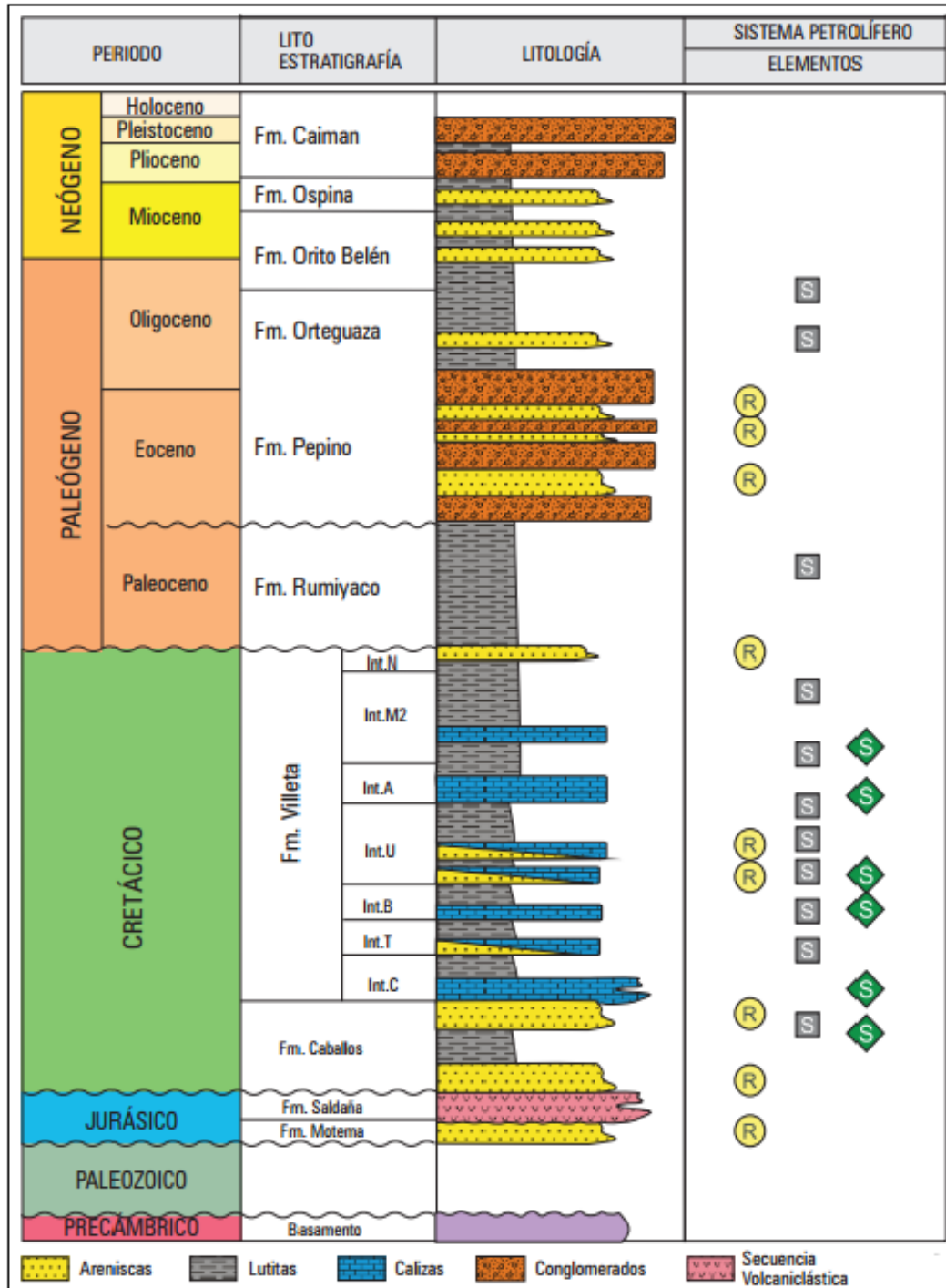
1.5.2 Campos de interés. A continuación, se presentan los campos donde se encontraron procesos de cañoneo, convirtiéndose así en campos de interés para el proyecto:

- Caribe.
- Churuyaco.
- Orito.
- Quiriyaca.
- San Antonio.
- Sucumbíos.

1.5.3 Marco geológico. A continuación, se presentan las generalidades de la cuenca Caguán-Putumayo, en la región del Putumayo, su estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo.

1.5.3.1 Columna estratigráfica. En la **Figura 15** se presenta la columna estratigráfica de la cuenca Caguán-Putumayo, en la región de Putumayo. El registro sedimentario de la cuenca inicia en el Precámbrico y acaba en el Plioceno-Pleistoceno.

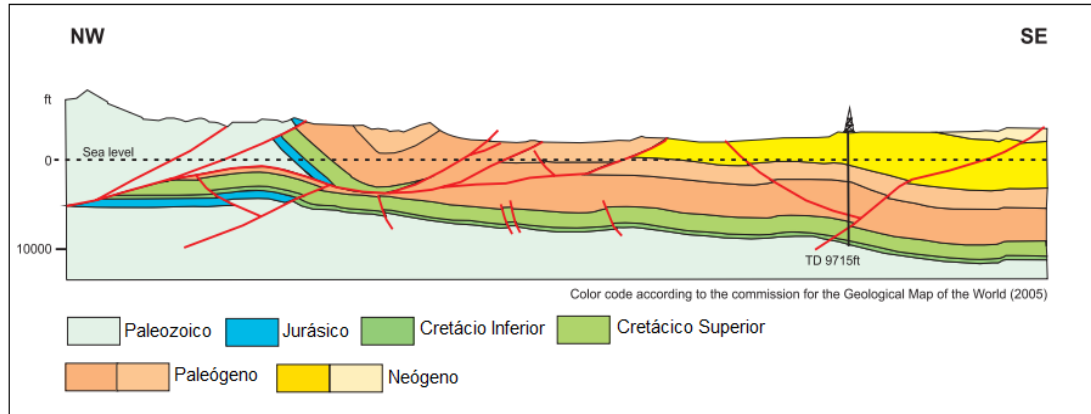
Figura 15. Columna estratigráfica de la Cuenca Putumayo



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Ronda Colombia 2010. PDF. Página 1 [citado septiembre 21, 2016]. Modificado por los autores.

1.5.3.2 Geología estructural. La cuenca es de tipo antepaís con respecto a la cadena montañosa Andina. Se caracteriza por fallas normales subverticales que crearon amplios espacios de acomodación para las secuencias sedimentarias del Cretácico. En la **Figura 16** se puede observar el corte transversal de la cuenca.

Figura 16. Sección transversal de la cuenca Putumayo



Fuente: Barrero, Dario, et al. “Colombian Sedimentary Basins”.PDF. Página 32. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Modificada por los autores.

1.5.3.3 Geología del petróleo. Sus principales parámetros geológicos relacionados con la generación de hidrocarburos son los siguientes, en la región del Putumayo.

- **Roca generadora.** Para esta cuenca corresponde al Grupo Villeta y la Formación Caballos. Tiene un TOC mayor a 1%, e incluye kerogeno como bitumen.
- **Roca reservorio.** El reservorio principal son las areniscas de la formación Caballos. Cuenta con una porosidad que varía entre 10 a 16%, y una permeabilidad aproximada de 50 mD.
- **Roca sello.** Corresponden a las lutitas de la formación Villeta. Las formaciones Rumiayaco y Orteguaza son sellos potenciales.
- **Migración.** La migración del hidrocarburo se dio de Oeste a Este a lo largo de las areniscas de la formación Caballos. Se dio una migración vertical por medio de fracturas y fallas.

- **Trampas.** En la cuenca las trampas principales son fallas inversas con alto ángulo, anticlinales relacionados con fallas inversas y trampas asociadas con cabalgamientos al Oeste de la cuenca.

2. MARCO TEÓRICO

Durante la etapa de completamiento inicial, también conocida como etapa de terminación del pozo, se busca cumplir con objetivos asociados a entregar el pozo en las condiciones necesarias para iniciar etapa de producción o inyección de fluidos; sin embargo, todos convergen en la adaptación del pozo para permitir la producción o inyección más óptima en función de costos, seguridad y operatividad.

“Básicamente, una terminación consiste en establecer en forma controlada y segura la comunicación entre el yacimiento y la superficie, generalmente a través de canales de flujo generados por medio de disparos con cargas explosivas”⁴. El procedimiento anteriormente mencionado hace referencia a una técnica conocida como cañoneo que permite generar conectividad entre el yacimiento y el pozo, permitiendo el inicio de la producción del pozo o inyección del mismo, pero para estimular el yacimiento.

CONECTIVIDAD

La conectividad es una condición que se ocasiona al pozo y al yacimiento para permitir la producción o inyección a través del pozo. Anteriormente se mencionó al cañoneo, el cual es un método para generar conectividad, sin embargo, existen otros y cada uno de ellos se podrían clasificar en dos grupos (conectividad primaria y conectividad secundaria) con base al objetivo en el que cada técnica se enfoca. A continuación, se describe cada una de estos tipos de conectividad:

2.1 CONECTIVIDAD PRIMARIA

La técnica que constituye la conectividad primaria es el cañoneo, su objetivo es atravesar las barreras existentes entre el pozo y el yacimiento para lograr llegar a la formación virgen. Estas barreras que se deben atravesar varían según el tipo de completamiento que se le haya hecho al pozo⁵:

El tipo de completamiento dado por una conectividad de tipo primaria son:

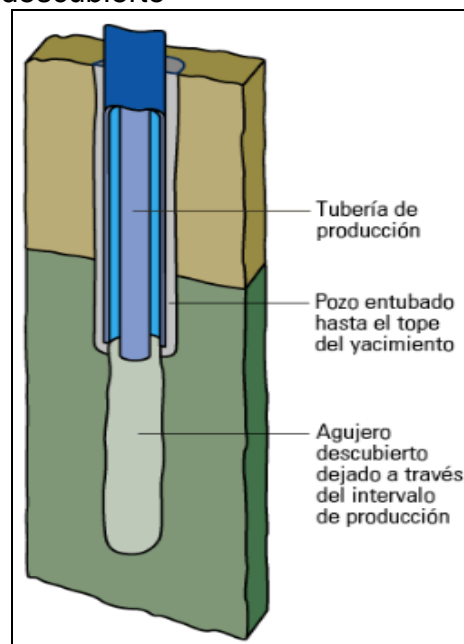
⁴ MÉNDEZ CASTRO, Armando. Aspectos de producción [diapositivas]. Instituto Mexicano del Petróleo, 2013. 38 diapositivas, color.

⁵ REYES VIAMONTE, Sebastián Ramiro y ROSETE VEGA, Miguel Ángel. Análisis de Productividad en Pozos de Aceite y Gas Disuelto en Formaciones Carbonatadas para Diferentes Terminaciones. Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero, México, DF.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2010. 82 p.

- **Terminación en agujero descubierto.** En ésta terminación el esquema en fondo se basa en la ubicación de la tubería de revestimiento inmediatamente antes del intervalo de interés⁶, el cual será perforado posteriormente para ponerlo a producir por sí solo. Es así como la barrera entre el yacimiento y el pozo es la cara de la formación que está directamente expuesta a él o la zona lavada de lodo. Por otra parte, al interior del pozo se puede instalar tubería de producción sin influir en la barrera anteriormente mencionada. Debido a que la formación está totalmente expuesta se pueden producir eventos tales como la disminución de la productividad de la formación por invasión del lodo, derrumbes, entre otras. Éstas situaciones hacen que sea una terminación limitada desde planeación, la cual va orientada a la producción de una sola zona con suficiente resistencia para que no ocurran derrumbes o a tomar medidas como la instalación de tubería ranurada, acompañada con o sin grava con el fin de controlar la producción de arena.

A través de la **Figura 17** se puede observar la terminación en agujero descubierto y en la **Figura 18** que muestra la zona lavada a atravesar.

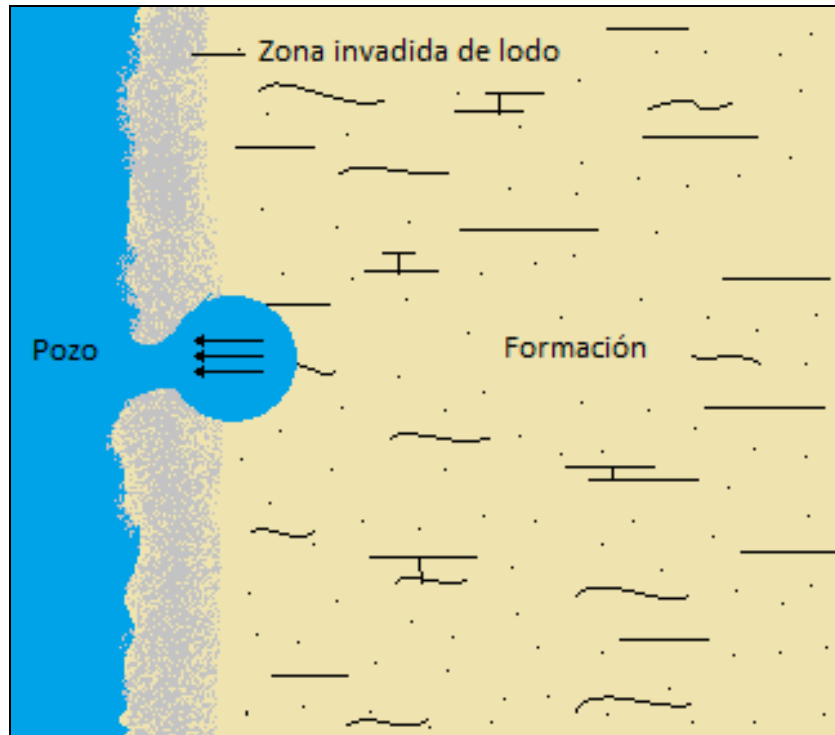
Figura 17. Terminación en agujero descubierto



Fuente: SCHLUMBERGER. Terminación en agujero descubierto, Oilfield Glossary [Glosario de campos petrolíferos]

⁶ Es la formación prospecto de ser productora de petróleo.

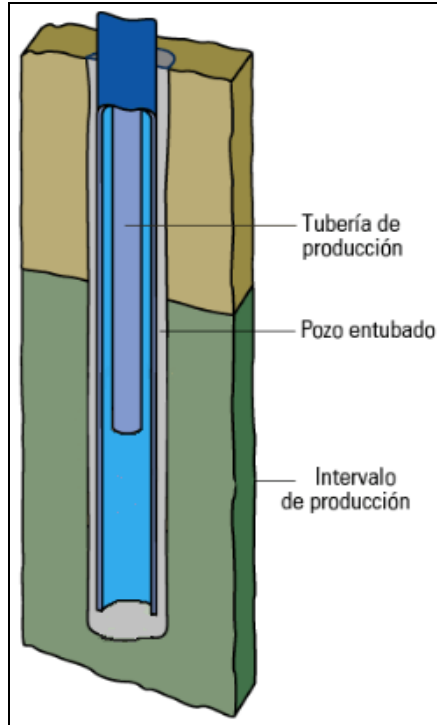
Figura 18. Zonas que se atraviesan en un completamiento de hueco abierto



- **Terminación con agujero revestido.** Como se puede inducir por su nombre, ésta terminación cuenta con un esquema en el que se incluye el posicionamiento de la tubería de revestimiento frente a la formación de interés. La barrera a atravesar será la tubería de revestimiento y el cemento que se ubica entre el diámetro externo del revestimiento y la formación. Al igual que en la terminación en agujero descubierto, tiene la misma posibilidad en cuanto a instalar tubería de producción sin que esto influya en la barrera. Por medio de la instalación de tubería de producción y empaques que permiten aislar zonas, ésta terminación admite la producción de múltiples zonas.

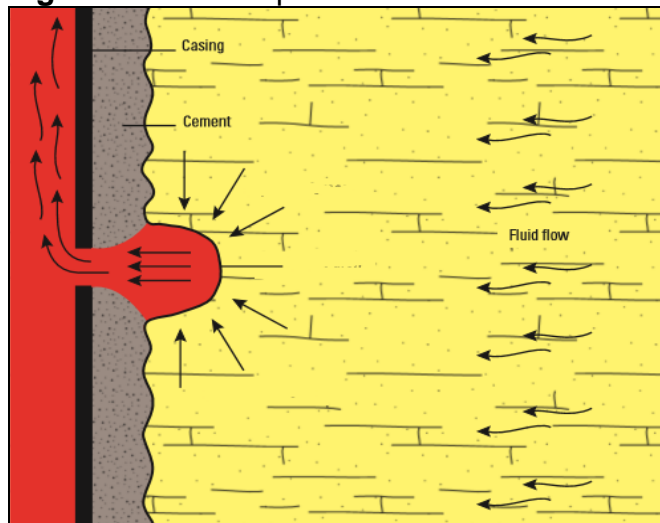
A través de la **Figura 19** se observa la terminación en agujero revestido y la **Figura 20** las zonas que debe atravesar el cañoneo.

Figura 19. Terminación en agujero revestido



Fuente: SCHLUMBERGER. Terminación en agujero descubierto, Oilfield Glossary [Glosario de campos petrolíferos]. Modificada por los autores

Figura 20. Zonas que atraviesa la conectividad primaria



Fuente: SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog. [Catálogo de servicios de perforación]. (2008). p. 84. Modificado por los autores.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo final de éste tipo de conectividad es lograr la comunicación entre la formación y el pozo por medio de una penetración producida por la perforación o cañoneo. Se entiende penetración como la longitud de la perforación causada por la carga, se puede medir mediante el procedimiento estándar que indica el API⁷ y es afectada por parámetros que disminuyen la eficiencia del cañoneo⁸ (parámetros de cañoneo, parámetros del yacimiento, parámetros de las condiciones del pozo), estos se observan en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Factores que afectan el desempeño de la perforación

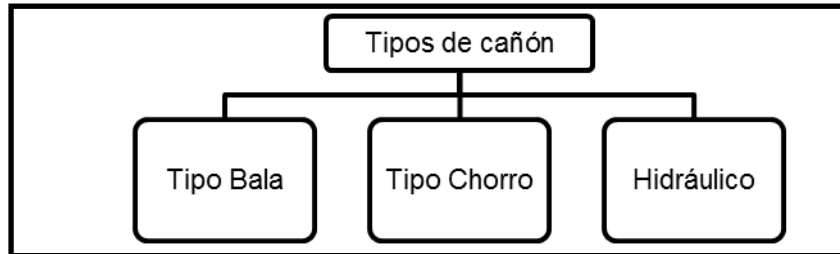
| Parámetros del yacimiento | Parámetros del cañoneo | Parámetros del pozo |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia de la roca. • Estrés de la roca • Tamaño de partículas y distribución. • Densidad de la roca. • Saturación de fluidos. • Temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Configuración de la carga • Diámetro del cañón. | <ul style="list-style-type: none"> • Dureza del revestimiento • Espesor del revestimiento • Presión en el pozo • Zona de daño |

2.1.1 Tipos de cañones. Históricamente se han hecho avances con respecto al tipo de cañón que se usa en las perforaciones con el fin de hacerlo más efectivo. Actualmente, como consecuencia de ésta evolución, se cuenta con el cañón tipo chorro el cual es el más usado en las aplicaciones de la industria del petróleo; sin embargo, en la **Figura 21** se puede contemplar la clasificación más usual.

⁷ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Evaluation of Well Perforators. API RP43. [s.l.]. [s.n]. 1971. 16 p.

⁸ BARRETO, Juan, et al. Cañoneo de pozos. República Bolivariana de Venezuela. Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”. 2015. 22 p.

Figura 21. Tipos de cañón

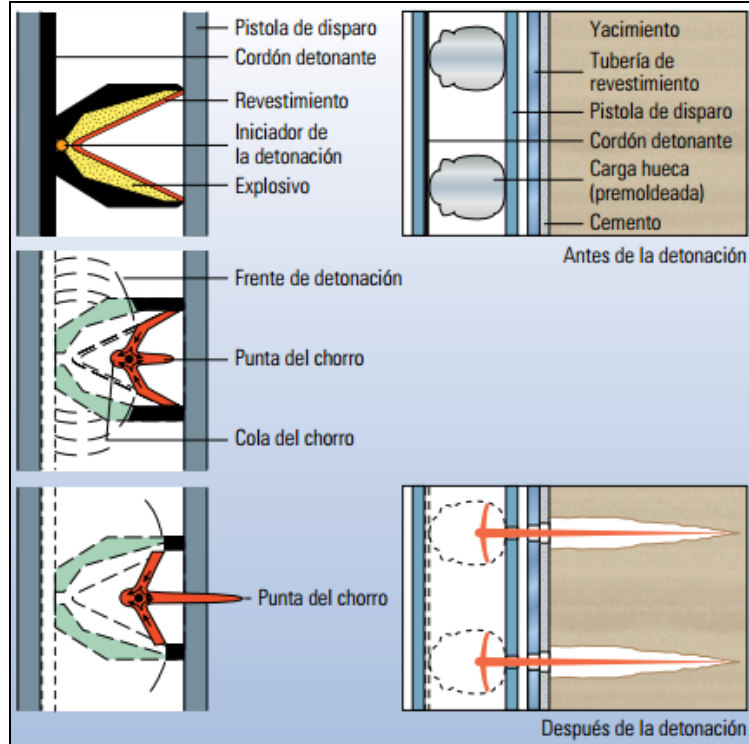


A continuación, se describe cada uno de los tipos de cañoneo, de acuerdo con la clasificación dada en la **Figura 21**.

- **Tipo bala.** Su origen se remonta al año 1926. Esta técnica consiste en el disparo de una bala de acero ubicada en un barril pequeño en el pozo, para penetrar revestimiento, cemento y la formación. Fue usada en abundancia, pero conforme la tecnología de cañones fue avanzando, su popularidad descendió. Esto se debe a que no proporciona la misma capacidad de penetración ante grandes espesores de revestimiento; sin embargo, aún se aplica para el cañoneo de formaciones suaves, quebradizas o cuando son necesarios generar orificios consistentes y de forma regular en el revestimiento.
- **Tipo chorro/jet (carga hueca).** Las prácticas que abarcan este tipo de cañón son producto de aplicaciones militares de la Segunda Guerra Mundial. A partir de ese momento la industria del petróleo vio su potencial para superar el cañoneo tipo bala. Ésta técnica involucra el uso de explosivos de alta potencia, lo que significa cantidades enormes de energía concentrada en un volumen muy pequeño, que a su vez se traduce a grandes profundidades de penetración. Estos cañones se clasifican en 3: recuperables, desechables y parcialmente desechables. Actualmente el tipo de cañón recuperable es el más usado.
- **Hidráulico.** Éste método fue desarrollado hacia los años 50's. Se basa en el manejo de las presiones de un fluido, a veces acompañado con arena, con el fin de generar agujeros y túneles que atraviesen las zonas anteriormente mencionadas. La eficacia de su conectividad no era la mejor pues los túneles generados son poco profundos y es un sistema que tarda mucho.

En la **Figura 22** se puede observar la detonación de cargas huecas, sus partes y el efecto que tiene en la formación

Figura 22. Funcionamiento y partes de un cañón



Fuente: SCHLUMBERGER. Detonación para inducir el flujo de fluidos. Tony Smithson. Oilfield Review. Vol 24, no.1.

La detonación del cañón inicia al ser activado el cordón detonante por una onda de explosión, éste a su vez va unido a cada una de las cargas explosivas en donde se detonan las primarias y así la carcasa de la carga se expande mientras que el revestimiento avanza hacia el interior como un chorro impactando con la barrera que encuentre y penetrando hasta la formación debido a su velocidad y presión⁹.

Generalmente se usan dos tipos de detonante, cada uno fue creado para ser activado de una forma específica. El detonante eléctrico, como dice su nombre, se activa eléctricamente y es usado en cañones que permiten tener éste tipo de comunicación, es por ello que su aplicación es con Wireline; y el detonante por percusión, se activa mecánicamente por la caída libre de una barra que acciona el pin del cañón debido a su impacto. La barra cae a través del Tubing para que caiga sobre el disco de corte, lo rompe y cae sobre el tope superior de los cañones donde golpea el detonador y dispara el cañón.

⁹ SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog [Catálogo de servicios de perforación]. (2008). 8 p.

A partir del funcionamiento y lo anteriormente mencionado, se hace evidente que los explosivos son muy importantes debido a que permite generar la perforación como consecuencia de las altas presiones, producto de reacciones de óxido-reducción ¹⁰. El explosivo es seleccionado principalmente por la temperatura a la que pueda operar, a continuación, se presenta en la **Tabla 1** las especificaciones de temperatura para 3 explosivos.

Tabla 1. Guía de temperatura para explosivos

| Tipo de explosivo | Temperatura | | | |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| | 1 hr | 100 hr | 200 hr | 400 hr |
| RDX | 340°F [171°C] | 240°F [115°C] | 225°F [107°C] | 210°F [99°C] |
| HMX | 400°F [204°C] | 300°F [149°C] | 285°F [141°C] | 270°F [131°C] |
| HNS | 500°F [260°C] | 460°F [238°C] | 440°F [227°C] | 420°F [216°C] |

Fuente: SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog [Catálogo de servicios de perforación]. (2008). p. 7. Modificada por los autores.

2.1.2 Métodos de cañoneo. Dependiendo de cuál sea la técnica de cañoneo seleccionada se opera a ciertas condiciones de presiones que se van a trabajar (Sobre balance extremo, sobre balance, bajo balance y bajo balance optimizado) las condiciones de estas presiones se explican a fondo en el **Cuadro 2** y **Cuadro 3**. Para la condición de sobre balance se usan técnicas como Casing Gun (en el cual el cañón es bajado a través del revestidor), Wireline (cañón de baja a fondo con guaya eléctrica), Slick Line (guaya fina), entre otras; y para la condición bajo balance se usa Through Tubing (el cañón se baja a través de tubería de producción) o TCP (Tubing Conveyed Perforating, cañones transportados por tubería), entre otros.

Cuadro 2. Condiciones de sobre balance y sobre balance extremo

| Sobre balance | Sobre balance extremo |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Ésta condición se da cuando la presión hidrostática supera la de formación. - Proporciona una mayor penetración. - Genera una zona de compactación. | <ul style="list-style-type: none"> - Es cuando la presión hidrostática es mucho mayor a la presión de la formación. - Se crea con el fin de generar mayor penetración en la formación. |

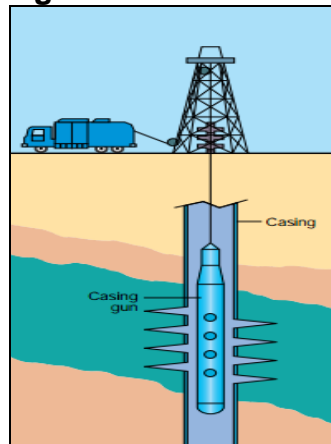
¹⁰ PUERTA COLORADO, Carlos Alberto. Clasificación y Características de los Explosivos. Trabajo escrito. Bogotá D.C.: Escuela de Ingenieros Militares ESING. Facultad de Ingeniería. 2016. 32 p.

Cuadro 3. Condiciones de bajo balance y bajo balance optimizado

| Bajo Balance | Bajo Balance optimizado |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Ésta condición se da cuando la presión hidrostática es menor a la de formación. - Debido a que se tiene un diferencial de presión negativo se genera una limpieza inmediata al cañoneo, generando una ausencia de debris en los túneles. | <ul style="list-style-type: none"> - Es cuando la presión hidrostática es mucho menor a la presión de la formación. - En esta condición se aplica la perforación PURE (Perforating System For Clean Perforations) (*), en la cual se maximiza en bajo balance para mejorar o eliminar en daño del cañoneo¹¹. |

- **Cañón bajado a través del revestidor (Casing Gun).** Se conocen algunos tipos de Casing Gun como: Port Plug guns, High-Efficiency Gun Systems, PURE gun systems, and HSD guns (**). El diámetro interno del casing limita el tamaño del cañón, esto permite usar mayor rendimiento de penetración profunda o cargas de hueco grande para una densidad de tiro óptima y fases de perforación¹². Una de las ventajas es que proporciona control sobre el tamaño de las perforaciones. En la **Figura 23** se observa la representación de la técnica.

Figura 23. Técnica Casing Gun



Fuente: COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia.1992.

(*) Sistema de perforación para limpieza de las perforaciones.

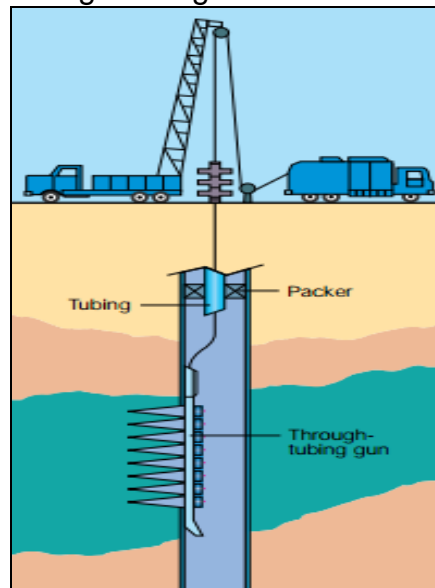
(**) Estas son marcas propias de la compañía de servicios SCHLUMBERGER.

¹¹ SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog [Catálogo de servicios de perforación]. (2008). 62 p.

¹² *Ibíd.*, 101 p.

- **Cañón bajado por cable eléctrico (Wireline).** A éste cable también se le conoce como guaya o cabria. Es el medio de transporte para llevar el cañón de superficie a fondo, pero se hace a través del revestimiento. Además, está diseñado para permitir una comunicación eléctrica constante entre la herramienta y superficie, haciendo que se tenga control de la profundidad en tiempo real. Existe una tecnología similar, pero con menor diámetro del alambre de metal llamada Slickline.¹³
- **Cañón bajado a través de tubería de producción (Through Tubing).** Se realiza cuando se ha finalizado el completamiento, se crea un diferencial de presión negativo y posteriormente se baja el cañón con equipo de guaya. Este método de cañoneo (Ver **Figura 24**) permite obtener una buena limpieza de las perforaciones debido a su condición de presión. Sin embargo, ellos no son selectivos, es por ello que cuando se requiere probar otro intervalo es necesario controlar el pozo pues las perforaciones quedan expuestas a los fluidos de control, lo que puede causar daño.¹⁴

Figura 24. Técnica de cañoneo through tubing.



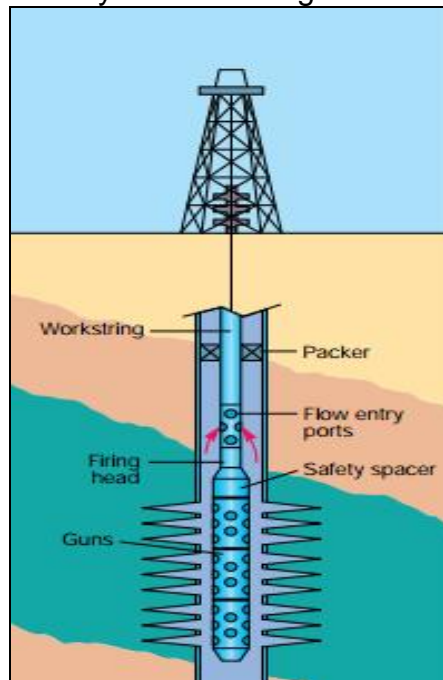
Fuente: COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia. 1992.

¹³ Ibíd., 101 p.

¹⁴ Ibíd., 101 p.

- **Cañón con TCP (Tubing Conveyed Perforating).** Esta técnica (Ver **Figura 25**) involucra la corrida de un cañón casing estándar con tubing o tubería de perforación. Las operaciones de TCP son más eficientes pues brindan perforación de múltiples intervalos, es decir que si se requiere con ayuda de una empacadura se logra perforar en una corrida gran extensión de intervalos. Sin embargo, otras técnicas como el Wireline proporciona mayor velocidad de perforación; éste factor es importante tenerlo en cuenta cuando se analiza la operación a llevar a cabo en pozos con altas temperaturas, ya que su velocidad hace que el tiempo de exposición de los explosivos sea menor. Por otra parte, brinda grandes beneficios en cuanto a la seguridad operacional debido a que tiene tubería en el pozo al igual que tiene instalado el cabezal del pozo. Mediante este sistema, el cañón tiene dos maneras de ser disparado por diferencial de presión o por percusión¹⁵.

Figura 25. Cañoneo Tubing Conveyed Perforating



Fuente: COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia. 1992.

¹⁵ MENDOZA PASTO, Bertha Sol Ángel. “Análisis mecánico y de riesgos para la implementación de la técnica de estimulación fracturamiento con gas a alta energía (HEGF) en pozos colombianos”, Colombia. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingenierías físico-químicas, 2012. 29 p.

2.2 CONECTIVIDAD SECUNDARIA

Su objetivo es directamente la formación, pues busca generar una estimulación. En este orden de ideas las técnicas de fracturamiento, acidificación, entre otras hacen parte de este grupo y se realizan posteriores o conjuntamente a una técnica de conectividad primaria.

Mediante éste tipo conectividad se busca generar mayor permeabilidad entre zonas del yacimiento aumentando cantidad de túneles por los cuales el fluido pueda moverse o cambiando las propiedades del yacimiento. Se hace necesaria su aplicación cuando la producción de petróleo o inyección de agua u otros fluidos, han perdido eficiencia y cuando su inversión justifica el margen de rentabilidad para una compañía operadora. Algunas de las técnicas correspondientes a conectividad secundaria o inducida se describen a continuación.

2.2.1 Fracturamiento hidráulico. (Hydraulic Fracturing) El objetivo de ésta operación es fracturar la formación por medio del bombeo de un fluido a alta presión, posteriormente se debe garantizar simultáneamente la apertura de las fracturas y el paso de los fluidos del yacimiento hacia el pozo.

Es una técnica que se lleva a cabo al perforar yacimientos no convencionales, los cuales “son unos tipos de yacimientos donde los hidrocarburos se encuentran en condiciones que no permiten su libre movimiento por estar atrapados en rocas poco permeables”¹⁶. Ésta operación se lleva a cabo mediante dos etapas:

- **Primera etapa o etapa de colchón.** Se bombea un fluido de fracturamiento a través de los disparos de la tubería de revestimiento con una tasa y una presión suficientes para romper la formación y crear una fractura.
- **Segunda etapa o etapa de lechada de apuntalante.** se transporta el apuntalante a través de los disparos hacia la fractura abierta. Las partículas de los apuntalantes son seleccionadas según su tamaño¹⁷, esfericidad, y la litología.¹⁸

Posterior a estas etapas, como consecuencia de las presiones ejercidas por la formación, la fractura se cierra sobre el apuntalante el cual se mantiene en su

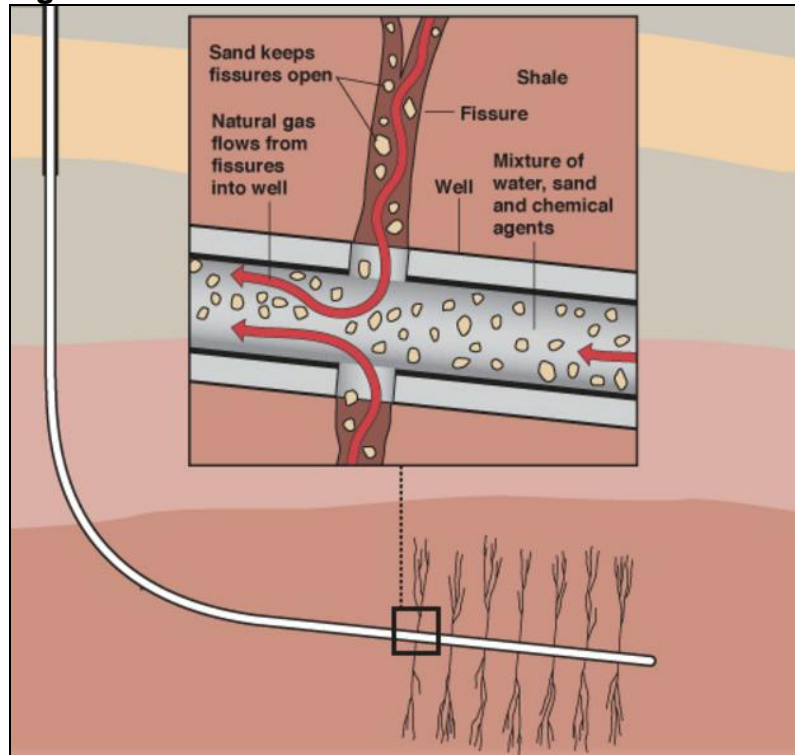
¹⁶ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Estimulación Hidráulica en Yacimientos No Convencionales. [videograbación]. 3 min, 45 s, sonido, color.

¹⁷ SCHLUMBERGER. Fracturamiento con calanes de flujo abiertos: Una vía rápida para la producción. Oilfield Review, 2011.

¹⁸ SCHLUMBERGER. Definición del concepto de fracturamiento hidráulico: Elementos del fracturamiento hidráulico. Oilfield Review, 2013. Vol 25, no.2.

lugar durante el reflujó del fluido de fracturamiento y la producción de hidrocarburos. En la **Figura 26** se observa el efecto del fracturamiento hidráulico en la formación.

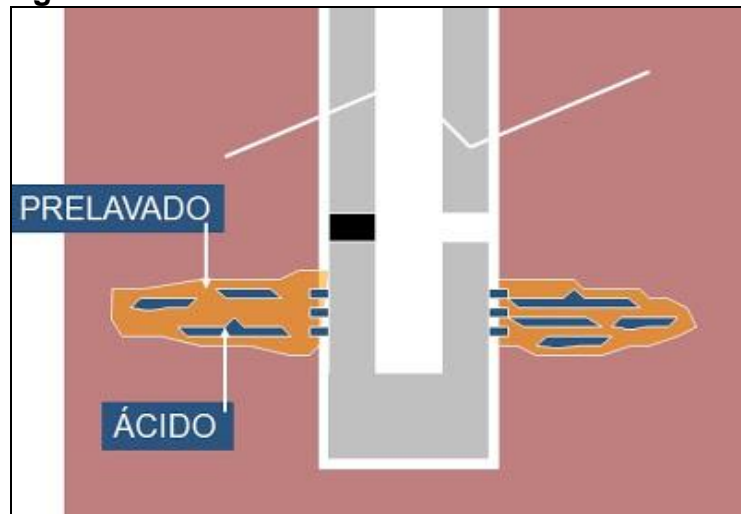
Figura 26. Efecto del Fracturamiento Hidráulico



Fuente: Hydraulic fracturing (fracturamiento hidráulico). [Citado 19 de febrero de 2017]. Disponible desde Internet en: https://www.earthworksaction.org/issues/detail/hydraulic_fracturing_101#.WkPK-_mGPIU. Modificada por los autores.

2.2.2 Fractura ácida. Mediante esta técnica se busca modificar propiedades físicas de la formación como la permeabilidad. La estimulación se realiza mediante la inyección con una presión positiva de un ácido, generalmente ácido clorhídrico (HCL), pues permite que la matriz se disuelva y se creen más túneles. La consideración más importante para que la técnica sea eficiente es lograr que no se pierda el ácido sin control, así que debe ser alto el caudal de inyección y baja la permeabilidad de la formación. Este factor se ve directamente afectado por la temperatura del pozo, temperaturas de baja a media se debe controlar aún más este factor, y cuando hay altas temperaturas el ácido se consume rápidamente haciendo necesario el uso de ácidos retardados¹⁹. La **Figura 27** ilustra la técnica de fracturamiento ácido.

Figura 27. Fractura Ácida



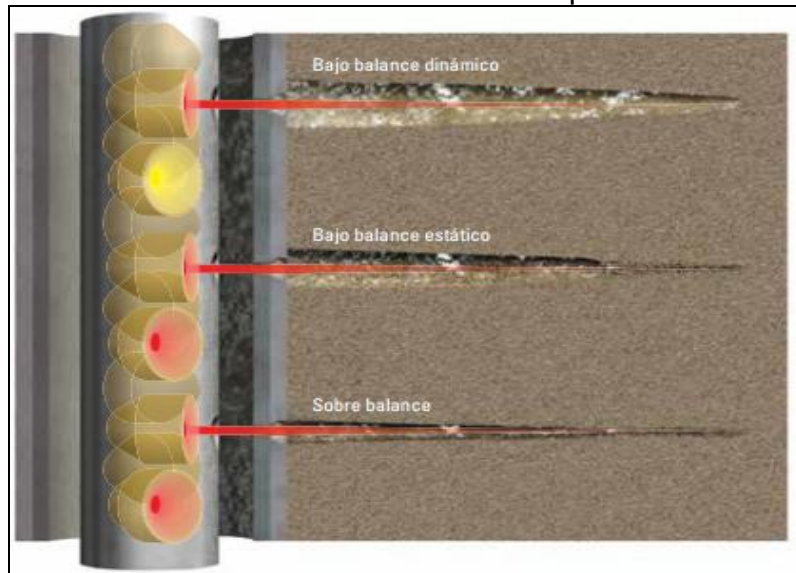
Fuente: PETROBLOGGER. Fracturamiento Ácido. [en línea].
<<http://www.ingenieriadepetroleo.com/fracturamiento-acido.html>>
[citado el 27 de septiembre de 2016].

¹⁹ PETROBLOGGER. Acidificación de Pozos. [en línea]. <<http://www.ingenieriadepetroleo.com/acidificacion-de-pozos.html>> [citado el 21 de septiembre de 2016]

2.3 OTRAS TÉCNICAS DE CONECTIVIDAD

2.3.1 PURE. Es una estrategia clave para los sistemas de disparos bajados con tubería de producción (TCP). Éste sistema es más efectivo que los métodos convencionales ya que debido a su operación de disparos en condiciones de bajo balance dinámico, permite que las perforaciones queden más limpias, incrementando la productividad e inyectabilidad en los pozos. Adicionalmente, reduce la presión dinámica del pozo y reduce la onda de choque en el pozo. En la **Figura 28** se puede observar una comparación entre la eficiencia de la creación de túneles dependiendo de las condiciones²⁰.

Figura 28. Comparación gráfica de los túneles de los disparos obtenidos con diferentes técnicas de disparo



Fuente: SCHLUMBERGER, Una singular técnica basada en sistemas de disparos bajados con la tubería de producción (TCP), incrementa la producción de pozos en un 50%. Caso de estudio. [en línea]. <http://69.18.148.120/~media/Files/perforating/case_studies/pure_western_siberia_cs_esp.pdf>. [citado el 21 de septiembre de 2016].

²⁰ RODRIGUEZ, Johan y RODRIGUEZ, Christian. Análisis Técnico-Económico del uso de las diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por Petroproducción. Tesis de grado Ingeniero en petróleo. Guayaquil, Ecuador.: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, 2007. 91 p.

2.3.2 TCP Propelente. Ésta tecnología tuvo sus inicios en la industria petrolera en 1970; desde entonces ha mejorado en gran medida. La técnica de aplica como sustituyente de fracturamiento hidráulico y tratamiento de ácido.²¹

El propelente, perclorato de potasio, es un material muy estable y seguro (oxidante explosivo). Las condiciones que deben existir para inflamarse son: confinamiento, presión y temperatura; éstas deben coexistir al mismo tiempo. Debido a que la camisa propelente está expuesta directamente en el agujero, se debe tener cuidado con el manejo del ensamble para no impactar la camisa y generar fracturas²².

La cantidad de propelente a usar se determina según la formación a perforar, (consolidada o no consolidada) debido a la facilidad que tiene por expandirse; sin embargo, éste también se determina por la longitud que se desea abarcar con el disparo.

Algunas limitaciones del TCP propelente son²³:

- ✓ La máxima temperatura para el uso del propelente es 350 °F.
- ✓ Requiere una mínima de presión de confinamiento de 500 psi.
- ✓ Requiere por lo menos que se tenga en superficie 100 ft de aire o gas.
- ✓ Requiere utilizar disparos de 4 disparos por pie y nunca a 0° fase.
- ✓ Tiene que estar centralizado.
- ✓ Si hay tapones debe estar por lo menos a 50 ft de separación.

2.3.3 Extreme Overbalance Pressure (EOP). Éste tipo de perforación busca disminuir los daños de perforación. Funciona como una técnica de estimulación en la zona cercana al pozo y prepara el pozo para la aplicación de otros métodos de estimulación generando fracturas.

El principio de funcionamiento de ésta técnica es empujar un gas a alta presión hacia los huecos del cañón. Una de las ventajas que tiene es que minimiza el daño y crea micro-fracturas, traducido en un skin negativo y alta conductividad. Su aplicación ideal es en pozos de inyección pues en ellos se mantienen abiertas las micro-fracturas e incluso por su proceso de inyección se expanden.²⁴

²¹ PARADA CISNEROS, Reyna Maribel. "Técnicas de disparos para optimizar la producción en la condición de operación bajo balance" México. Universidad Nacional Autónoma de México; Facultad de Ingeniería, 2013.

²³ *Ibíd.*, p. 112.

²⁴ PIEDRAHITA RODRÍGUEZ, Jaime Alberto, et al. Cañoneos extremos incrementan la producción y capacidad de inyección de agua en la GEC. Bogotá D.C. Ecopetrol. 2013.

2.4 HERRAMIENTAS PARA LA ELECCIÓN DE MÉTODOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

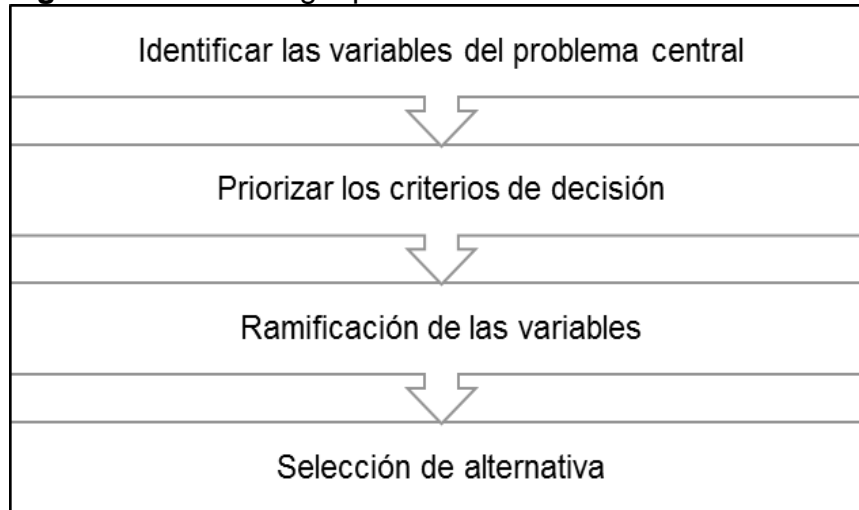
La toma de decisiones es una actividad propia de la naturaleza del ser humano. Es por esto que a través de la historia numerosos autores han planteado metodologías que ayudan a la reducción de la incertidumbre que conlleva este proceso.

A continuación, se enuncian las metodologías que servirán como soporte para el desarrollo del proyecto:

- Diagrama de Pareto: El diagrama de Pareto es una herramienta gráfica de barras que permite visualizar los factores de un problema que requieren mayor atención, esto se logra debido a que permite reconocer el orden adecuado para resolverlos con base a su importancia.
- Método multi-criterio de selección de alternativas: maneja situaciones en las cuales dos o más factores tienen conflicto y mínimo dos soluciones. Este método se clasifica en dos ramas, toma de decisión multi-objetivo (MODM) y toma de decisión multi-atributo (MADM)
- Árbol de decisiones: Esta alternativa permite tener en cuenta en su diagnóstico numerosas perspectivas, evaluando las posibles soluciones. Es muy útil pues es una herramienta bastante simple, que brinda la visualización gráfica de la toma de decisiones o los caminos que se deben recorrer o “cumplir” para llegar a la selección de diversos factores.

Dadas las características de los métodos anteriormente mencionados, se ha determinado que el método que más se ajusta para realizar el análisis y planteamiento de la matriz de selección de conectividad es el árbol de decisiones, ya que este método de selección permite a través de diferentes escenarios o cuestionamientos dar una respuesta a un problema en específico con múltiples variables, dependiendo de las especificaciones que ingrese una persona. A continuación, en la **Figura 29** se presenta la metodología para llevar a cabo un árbol de decisiones. En la **Figura 46** (pág 93) se puede observar un ejemplo de un árbol de decisión para la selección de un método de cañoneo.

Figura 29. Metodología para la realizar un árbol de decisiones

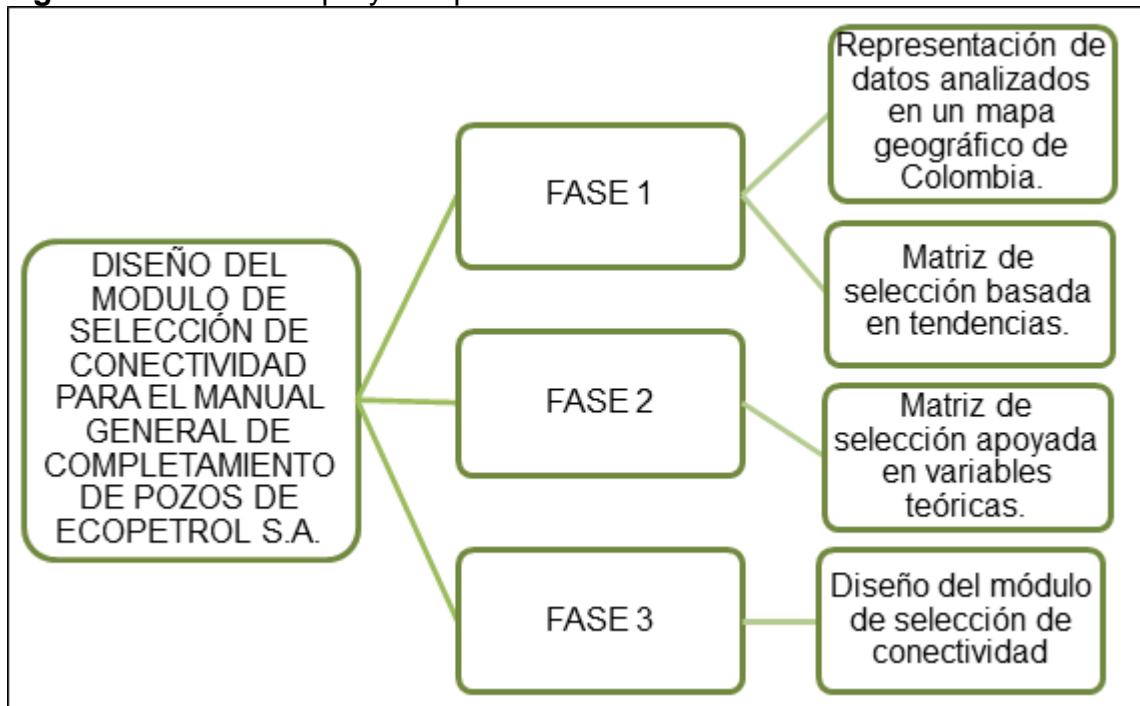


Fuente: VERGARA LARA, Gabriel. La técnica del árbol para la toma de decisiones [diapositivas]. Valle: Tuluá, 2008. 19 diapositivas.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta el diseño y metodología que se utilizó para realizar el proyecto. Su desarrollo, se divide en tres fases, las cuales se presentan en la **Figura 30**, y se explican posteriormente.

Figura 30. Diseño del proyecto por fases



Fase 1: Implica el análisis de datos de procesos de conectividad primaria (cañoneo) realizados por Ecopetrol S.A. en toda Colombia, y representar estos datos en un mapa geográfico de Colombia mostrando los pozos y el método de cañoneo que se utilizó, además de realizar una matriz de selección de métodos de cañoneo basada en tendencias²⁵, en la cual se tienen en cuenta los procesos realizados dentro del periodo 2005 a 2015. Esta fase da cubrimiento al primer y segundo objetivo específico del proyecto, los cuales corresponden a:

- Analizar información de los eventos de conectividad o cañoneo en los campos de Ecopetrol S.A. en el periodo comprendido entre enero de 2005 a diciembre de 2015.
- Representar en un mapa geográfico de Colombia los datos de conectividad identificados en los pozos de Ecopetrol S.A.

²⁵ Tendencia: frecuencia de uso de un método que muestra la preferencia operacional del mismo.

Fase 2: Esta fase abarca una matriz de selección de métodos de cañoneo apoyada en variables teóricas. Esta fase contiene el tercer y cuarto objetivo del proyecto los cuales son:

- Determinar las variables teóricas para la identificación de procesos de conectividad.
- Generar una matriz teórica con variables operativas que permita facilitar la toma de decisiones en la selección de procesos de conectividad para las operaciones de Ecopetrol S.A.

Fase 3: Esta fase hace referencia al diseño del módulo de selección de conectividad en el cual se recopilan las fases anteriores para ser programadas en un módulo de una aplicación web. Esta fase, corresponde al desarrollo del quinto objetivo del proyecto, el cual es:

- Estructurar el modelo de gestión de información sistematizada para el módulo de selección de conectividad para el manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias), éste proyecto de investigación es de carácter científico aplicada, debido a que tanto el objetivo como las actividades a realizar para alcanzarlo se ajustan a la definición que brinda esta entidad para éste tipo de proyecto. A continuación, se enuncia la definición, seguido de un paralelo del presente proyecto.

“...trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos; sin embargo, esta dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico, independientemente del área de conocimiento. La investigación aplicada se emprende para determinar los posibles usos de los resultados de la investigación básica, o para determinar nuevos métodos o formas de alcanzar objetivos específicos predeterminados.”²⁶

²⁶ COLCIENCIAS. Tipología de proyectos de carácter científico, tecnológico e innovación. Versión 4. 2016. Disponible desde Internet en: http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/Anexo3-tipologia-proyectos-version4_1.pdf

De forma paralela a la definición se manifiesta que éste proyecto tiene como objetivo final la producción de un nuevo material, como lo es el módulo de selección de conectividad, para mejorar los tiempos en el proceso de selección, todo esto con base a conocimientos existentes.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y muestra en este proyecto se realiza para las dos primeras fases, las cuales se seleccionaron de la siguiente manera:

3.2.1 Fase 1. Para esta fase se selecciona la población y muestra de los datos correspondientes a la elaboración del mapa y la matriz de tendencias.

Población (N): En esta etapa se evaluaron eventos de conectividad primaria (cañoneo)²⁷ en todos los campos operados por Ecopetrol S.A. en Colombia durante el periodo de 2005 a 2015, en el cual se evidencio una cantidad de 19.062 eventos de cañoneo en las cuencas de interés del proyecto, las cuales se presentaron y describieron en el capítulo 1 de este mismo documento. Estos eventos incluyen todas las áreas donde se puedan realizar un cañoneo como los son el completamiento, el reacondicionamiento de pozos, la perforación, etc.

Muestra (n): La muestra de estudio se selecciona de manera estratificada, este tipo es cuando se divide según las variables de selección de estudio que irán filtrando la población. La variable decisiva para seleccionar los datos de estudio, es el evento en que se realizó el cañoneo. Para este proyecto solo se analizaron los datos provenientes de eventos de completamiento (OCM) y perforación (ODR), los cuales dan una muestra de 1.566 pozos a analizar. En la **Tabla 2** se puede observar la sección final de la muestra de estudio y en la **Gráfica 1** se muestra la distribución de la población y la muestra.

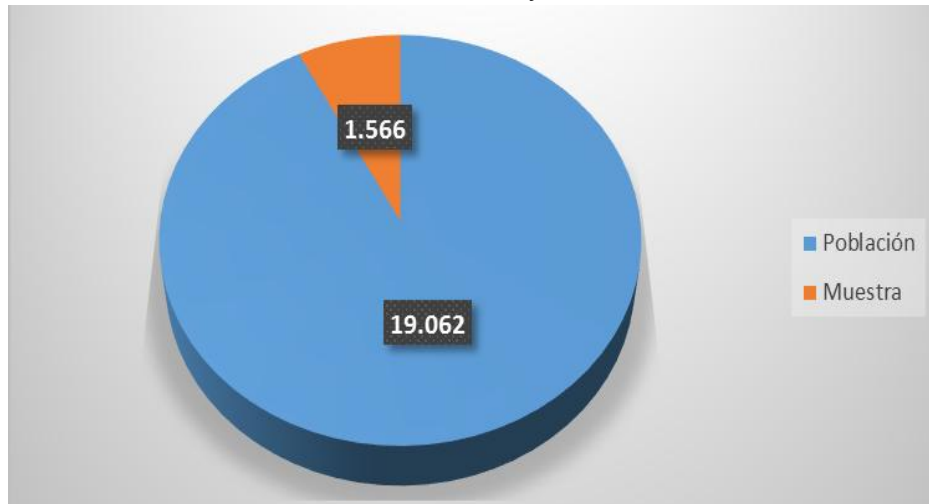
Tabla 2. Sección final de la muestra

| | Cuenca | Project | Departamento | Nombre Común del Pozo | Operador |
|------|--------|----------|--------------|-----------------------|----------------|
| 1562 | VMM | LA CIRA | SANTANDER | LA CIRA 2936 | ECOPETROL S.A. |
| 1563 | VMM | LA CIRA | SANTANDER | LA CIRA 3060 | ECOPETROL S.A. |
| 1564 | VMM | INFANTAS | SANTANDER | INFANTAS 3620 | ECOPETROL S.A. |
| 1565 | VMM | INFANTAS | SANTANDER | INFANTAS 2347 | ECOPETROL S.A. |
| 1566 | VMM | INFANTAS | SANTANDER | INFANTAS 3637 | ECOPETROL S.A. |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®.
[Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

²⁷ Ecopetrol S.A. define evento de conectividad primaria (cañoneo) como el proceso en el cual se crea la conectividad entre el pozo y el yacimiento, por primera vez.

Gráfica 1. Relación entre Población y Muestra



Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

3.2.2 Fase 2. En esta sección se plasma los criterios de selección de la población y muestra para la formulación de la matriz teórica, mediante la consulta de diversas fuentes bibliográficas.

Población (N): Para esta fase, la población corresponde a los documentos, ya sean documentos de investigación (papers), artículos, manuales y tesis en presentaciones físicas y electrónicas cuyos temas están asociados a la etapa de cañoneo (perforating) de un pozo hidrocarburífero, los cuales se investigaron para poder tener bases y fundamentos para la selección de las variables y poder filtrar los documentos más relevantes que serán esenciales para la creación de la matriz.

Muestra (n): Para esta etapa se seleccionaron aquellos documentos que se consideraron de suma importancia para la formulación de la matriz y de los cuales se extrajo la información y las variables para la creación de esta.

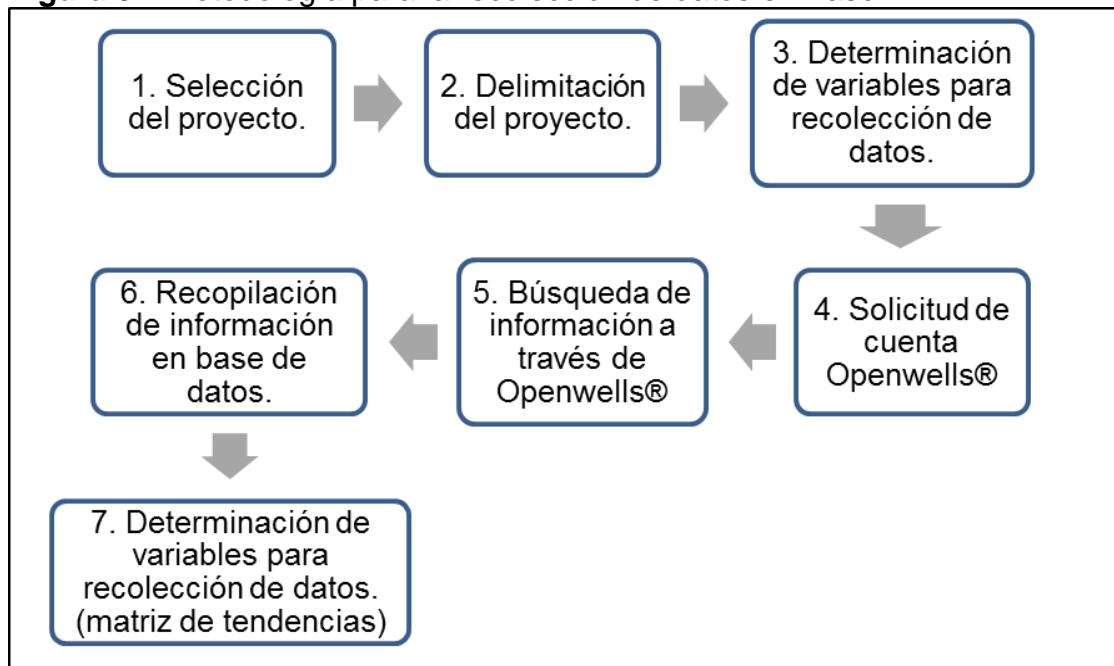
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Los criterios para la construcción de las técnicas de recolección de datos son los recursos con los que se cuenta y las posibilidades de acceso a la información. De esta forma se establece que las principales técnicas de recolección de datos son el análisis documental y la observación experimental y no experimental. La primera metodología se basa en la obtención de datos de fuentes secundarias (libros, documentos, etc.) para así desarrollar el proyecto con suficientes bases

teóricas. La observación no experimental es aplicada en el proyecto en cuanto a que se hace necesaria la consulta de bases de datos como OpenWells® como instrumento guía y, por último, la observación experimental pues los autores deben realizar un proceso de compatibilidad de variables teóricas para lograr el funcionamiento en la matriz de selección.

3.3.1 Fase 1. Para ésta sección la metodología que se llevó a cabo para la recolección de datos y los instrumentos utilizados se presentan a continuación en la **Figura 31**, seguido de su descripción.

Figura 31. Metodología para la recolección de datos en Fase 1



Descripción paso a paso:

1. Se realizaron reuniones con el Director del proyecto otorgado por Ecopetrol S.A. en la cuales se seleccionó el proyecto a desarrollar.
2. Se delimitó el proyecto de estudio en el periodo 2005 a 2015, para pozos operados por Ecopetrol S.A. en toda Colombia, y se seleccionaron eventos de OCM y ODR.
3. Se determinaron variables, las cuales harían parte de la recolección de datos, entre esas se encuentran:
 - El nombre del campo.

- La vicepresidencia a la que corresponde
 - El departamento donde se encuentra ubicado.
 - El municipio.
 - El nombre legal del pozo.
 - Sus coordenadas.
 - La formación cañoneada.
 - Sus fechas de operación.
 - El método de cañoneo utilizado por pozo entre otras, las cuales ayudan al análisis posterior.
4. Se solicitó a la empresa de manera escrita el permiso para consulta de una cuenta de Openwells® y así poder hacer de forma adecuada la recolección de información.
 5. Con la cuenta ya autorizada para consulta, se procede a buscar la información correspondiente a través del programa DataAnalyzer® y Openwells®, esto se realiza varias veces para poder corroborar los datos.
 6. Se toma la información correspondiente de los programas y se guarda en una hoja de cálculo de Excel, para después ser analizada. En la **Tabla 3** se puede observar la parte inicial de la información obtenida desde el pozo uno (1) hasta el pozo siete (7) de los programas, y en la **Tabla 4** se observa la información desde el pozo 947 hasta el 953. En las imágenes se ilustran una sección de todas las variables debido a su extensión (Cuenca, Campo(Project), Departamento, Nombre común del Pozo, Operador y el Método de cañoneo.)

Tabla 3. Información de Pozos sección inicial

| 1 | Cuenca | Project | Departamento | Nombre Común del Pozo | Operador | Método de Cañoneo |
|---|-------------------|----------|--------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| 2 | Catatumbo | PETROLEA | NORTE DE SANTANDER | PETROLEA 232 | ECOPETROL S.A. | CASING GUN |
| 3 | Catatumbo | PETROLEA | NORTE DE SANTANDER | PETROLEA 230 | ECOPETROL S.A. | CASING GUN |
| 4 | Catatumbo | TIBU | NORTE DE SANTANDER | TIBU 516 | ECOPETROL S.A. | ABRASIJET |
| 5 | Catatumbo | TIBU | NORTE DE SANTANDER | TIBU 522 | ECOPETROL S.A. | CASING GUN |
| 6 | Llanos Orientales | CASTILLA | META | CASTILLA INYECCION 6 | ECOPETROL S.A. | CASING GUN |
| 7 | Llanos Orientales | CASTILLA | META | CASTILLA 149 | ECOPETROL S.A. | CASING GUN |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

Tabla 4. Información de Pozos sección intermedia

| 1 | Cuenca | Project | Departamento | Nombre Común del Pozo | Operador | Método de Cañoneo |
|-----|--------|--------------------|--------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| 947 | VMM | SANTOS | SANTANDER | SANTOS 112 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 948 | VMM | YARIGUI-CANTAGALLO | BOLIVAR | YARIGUI 125 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 949 | VMM | SUERTE | SANTANDER | SUERTE 49 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 950 | VMM | YARIGUI-CANTAGALLO | BOLIVAR | YARIGUI 124 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 951 | VMM | YARIGUI-CANTAGALLO | BOLIVAR | YARIGUI 129 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 952 | VMM | YARIGUI-CANTAGALLO | BOLIVAR | YARIGUI 126 | ECOPETROL S.A. | TCP |
| 953 | VMM | SANTOS | SANTANDER | SANTOS 119 | ECOPETROL S.A. | TCP |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

En esta recolección de datos se identificó que Ecopetrol S.A. maneja las siguientes clasificaciones y subclasificaciones para los métodos de cañoneo:

- Abrasive Jet (método de cañoneo abrasivo que utiliza un flujo de alto volumen cargado con componentes abrasivos como arena. Puede ser usado en Casing Gun y Through Tubing).
- Casing Gun (operaciones de cañoneo realizadas a través del revestimiento con diferentes tipos de líneas o guayas).²⁸
- Expendable (configuración especial de cañones utilizados en métodos de cañoneo Through Tubing, además de servir para penetraciones profundas, y recañoneos).²⁹
- High shot (configuración de cañones con alta densidad de disparo que permite cañonear grandes intervalos en menor tiempo, y tener gran precisión de zonas a cañonear).³⁰
- Perforate (hace referencia al cañoneo convencional).
- Slickline gun o Slick gun (línea delgada con la cual se transporta el cañón de superficie a fondo, activando el cañón a través de pulsos. Se puede usar en Casing Gun y Through Tubing).³¹

²⁸ SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog [Catálogo de servicios de perforación]. 2008. 101 p.

²⁹ *Ibíd.*, p. 151.

³⁰ *Ibíd.*, p. 163.

³¹ SCHLUMBERGER. Entrega de la detonación. Oilfield Review, 2012.

- Scall gun o Scallop gun (configuración especial del cañón, con un perfil hueco dentro del cañón y cercano a la carga explosiva).³²
- TCP (técnica que involucra la corrida de un cañón unido a la tubería de producción).³³
- Through Tubing (operación de cañoneo realizada a través de la tubería de producción lo que facilita el control de presiones).³⁴
- Wireline (línea eléctrica con la cual se transporta el cañón de superficie a fondo, mientras transmite señales. Se puede usar en Casing Gun y Through Tubing).

Estos métodos de clasificación son utilizados en las clasificaciones generales identificadas en la teoría que son; Casing Gun (cañoneo a través de revestimiento), Through Tubing (cañoneo a través de tubería de producción) y TCP (cañoneo bajado con la tubería de producción). La matriz de selección teórica se apoya únicamente en los métodos de cañoneo establecidos por la teoría, y debido a que Ecopetrol S.A. maneja unas subclasificaciones que se encuentran inmersas en estos métodos de cañoneo establecidos, se realiza de forma complementaria la matriz de tendencias con todos los métodos de cañoneo establecidos por Ecopetrol S.A.

7. Para realizar la recolección de datos para la elaboración de la matriz de tendencias se seleccionaron las variables que se consideran relevantes al momento de mostrar la ubicación, el nombre del campo donde se está realizando el cañoneo, el método que se utilizó en el campo correspondiente, y si se desea llegar más a fondo el nombre de los pozos y sus métodos correspondientes de cañoneo. Estas variables son:
 - Cuenca.
 - Campo.
 - Métodos de cañoneo por campo.
 - Nombre común del pozo.
 - Método por pozo.

En la **Tabla 5**, se observa una muestra de las variables que se tienen en cuenta para la recolección de datos para la matriz. La variable “Métodos de cañoneo por

³²SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. Scallop Gun [Online]. Tomado de: http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/s/scallop_gun.aspx

³³ SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog [Catálogo de servicios de perforación]. 2008. 101 p.

³⁴ *Ibíd.*, p. 101.

campo” no se ilustra en la Tabla 5 debido a que esta se obtiene del análisis posterior de los datos, ya que se realiza un porcentaje de la frecuencia en que se utilizó cada método en el campo correspondiente.

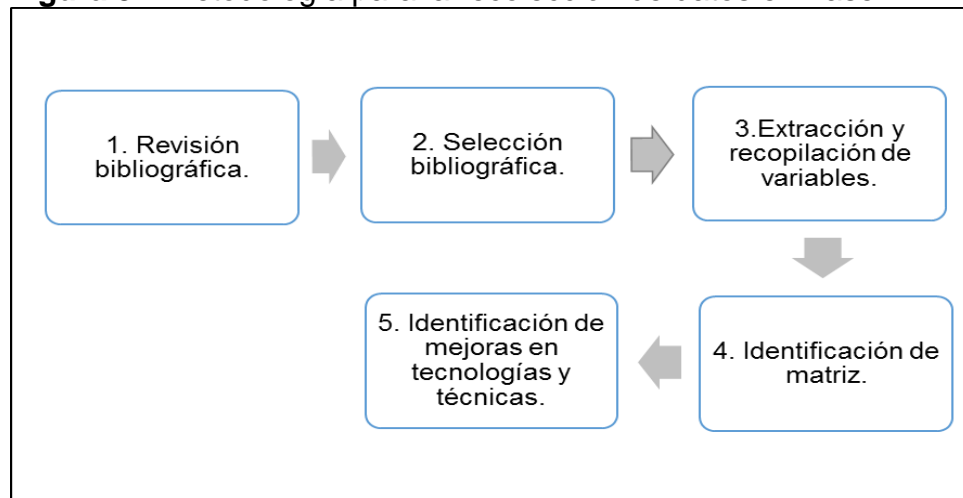
Tabla 5. Información de Variables para la Matriz de tendencias por pozos

| Cuenca | Campo | Método de Cañon | Nombre Común del Pozo |
|-------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| Llanos Orientales | EXPLORATORIO | CASING GUN | AKACIAS 1 |
| Llanos Orientales | EXPLORATORIO | TCP | AKACIAS 1 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | CASING GUN | AKACIAS 10 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | WIRELINE | AKACIAS 11 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | CASING GUN | AKACIAS 17 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | TCP | AKACIAS 18 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | WIRELINE | AKACIAS 19 |
| Llanos Orientales | AKACIAS | CASING GUN | AKACIAS 20 |
| Llanos Orientales | APIAY | OTHERS | APIAY 31 |
| Llanos Orientales | APIAY | PERFORATE | APIAY 32 |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

3.3.2 Fase 2. En esta fase la recolección de datos correspondió estrictamente a recopilación de información bibliográfica de los métodos de cañoneo para definir los parámetros teóricos a tener en cuenta en la selección del método. En la **Figura 32** se ilustra la metodología que se siguió y posterior a esta se da la descripción de los pasos.

Figura 32. Metodología para la recolección de datos en Fase 2



Descripción paso a paso:

1. Se realizó una revisión bibliográfica correspondiente a los métodos de cañoneo para establecer las variables por las cuales se va a regir la matriz de selección. En el **Cuadro 4** se presenta algunos de los documentos consultados más importantes para la realización de la matriz:

Cuadro 4. Fuentes bibliográficas de mayor aporte para la formulación de la matriz

| Título original del documento investigado | Traducción del documento investigado | Tipo de documento | Año | Descripción de información tomada para el proyecto |
|---|---|-------------------|------|--|
| Well Completion Desing | Diseño del completamiento de un pozo | Libro digital | 2009 | Variable: Condición a la que se encuentra el pozo (con tubería de producción o revestimiento) |
| Perforating Services Catalog | Catálogo de servicios de cañoneo | Catálogo digital | 2008 | Variables: Longitud de zona a cañonear, densidad de disparo, ángulo de pozo, velocidad de operación, profundidad del pozo. |
| Metodología para la selección, diseño y ejecución del cañoneo y/o recañoneo de pozos de bajo potencial, aplicación al Campo Colorado. | Metodología para la selección, diseño y ejecución del cañoneo y/o recañoneo de pozos de bajo potencial, aplicación al Campo Colorado. | Tesis | 2009 | Variables: Condición de presión, cañoneo de zonas múltiples. |

2. Se realizó una selección bibliográfica para descartar aquellos que, aunque correspondían al tema de cañoneo, no brindaban o brindaban información sin mucho detalle acerca de las variables del tema central del proyecto.
3. Se extrajeron y recopilaron las variables predominantes para la formulación de la matriz teórica. Estas variables se muestran en el **Cuadro 4**.
4. Se identificó y planeó el diseño del tipo de matriz de decisión que puede cumplir las necesidades del proyecto.
5. Mediante consulta teórica de manuales, artículos científicos se lleva a cabo la identificación de mejoras en las tecnologías y técnicas que estén siendo aplicadas en los métodos de cañoneo para así dar un valor agregado al momento de la selección. En el **Cuadro 5** se pueden observar algunas de las mejoras en tecnologías y técnicas.

Cuadro 5. Fuente bibliográfica para la selección de mejoras en las tecnologías y técnicas

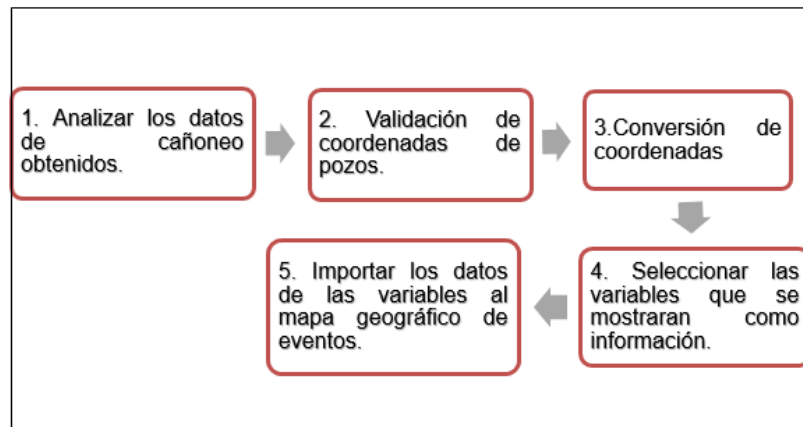
| Título original del documento investigado | Traducción del documento investigado | Tipo de documento | Año de publicación | Descripción de información tomada para el proyecto |
|---|--------------------------------------|-------------------|--------------------|---|
| Perforating Services Catalog | Catálogo de servicios de cañoneo | Catálogo digital | 2008 | Mejoras en tecnologías y técnicas: Pure, TCP propelente, Presión sobre balance extrema. |

3.4 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En esta sección se mencionan y explican las metodologías que se emplearan para llevar a cabo el análisis apropiado de los datos, las cuales abarcan herramientas estadísticas, administración de bases de datos entre otras, según corresponda la fase.

3.4.1 Fase 1. La metodología para la ejecución de esta fase se muestra en la **Figura 33**, y sus pasos son descritos posterior a esta. La representación del mapa de ocurrencias y de la matriz de tendencias se hace directamente en el software por lo que esta fase va de la mano con la fase 3 del proyecto en la que se realiza el diseño del módulo.

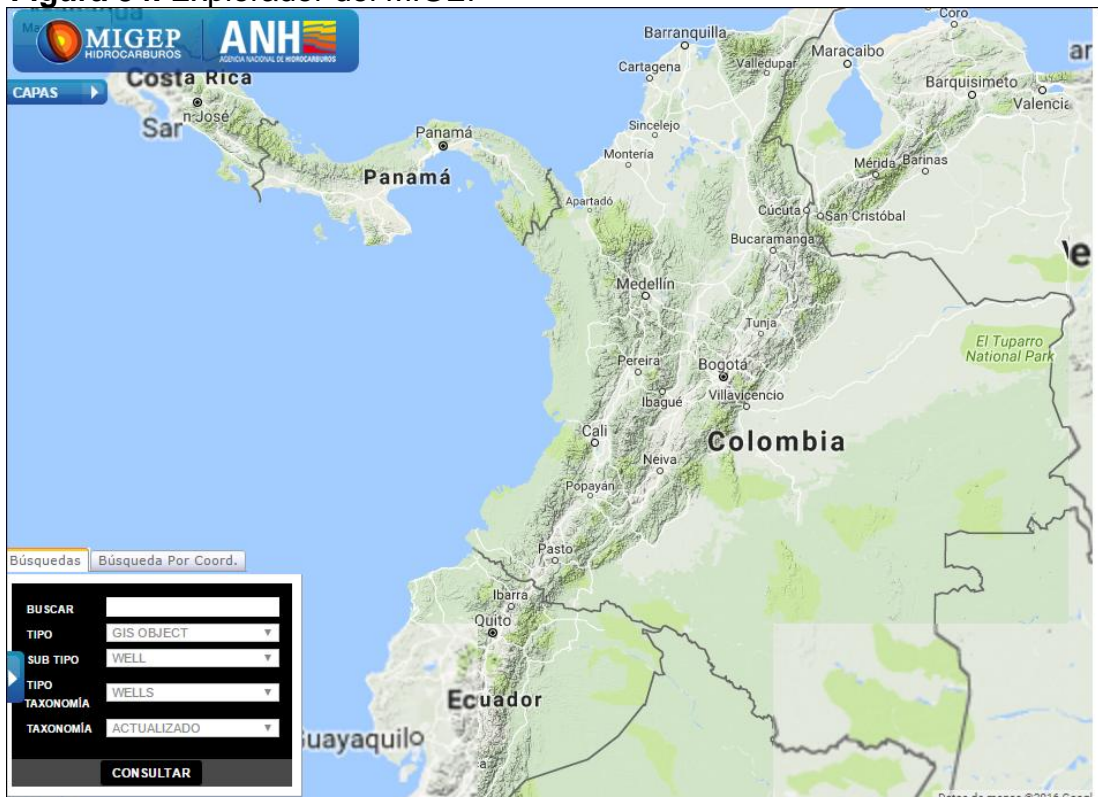
Figura 33. Metodología para el procesamiento y análisis de datos en Fase 1



Descripción paso a paso:

1. La información de la etapa de recolección de datos en la Fase 1 es obtenida de DataAnalyzer® y Openwells®. Se analizó a través de filtros, definiendo “cañoneo” como el evento principal, sus longitudes de cañoneo, sus fechas de operación, entre otras. Para posteriormente poder realizar un control de calidad de la misma. En la consulta de datos se encontraron eventos donde no se contaba con el registro de la variable “método de cañoneo”, por lo tanto, a esos casos se les asignó como “no reporta”.
2. Las coordenadas obtenidas de DataAnalyzer® y Openwells® se validaron a través del aplicativo MIGEP (Modelo Integrado de Gestión de Exploración y Producción de Hidrocarburos) de la ANH. En la **Figura 34** se puede observar el MIGEP ingresando como usuario invitado.

Figura 34. Explorador del MIGEP



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS.MIGEP. [Citado 18 de octubre de 2016]. Disponible desde Internet en:
<http://migep.anh.gov.co:3021/InicioGeoVisor.aspx>

Se extrajo la lista de pozos operados por Ecopetrol S.A. a través de la opción de consulta, buscando a Ecopetrol S.A. como la empresa operadora, lo cual arrojó la

lista de pozos que tiene el aplicativo. En la **Figura 35** se puede observar la opción de consulta junto con la lista de pozos.

Figura 35. Lista de Pozos del aplicativo MIGEP

| BUSCAR <input type="text" value="ECOPETROL"/> TIPO <input type="text" value="GIS OBJECT"/> SUB TIPO <input type="text" value="WELL"/> TIPO <input type="text" value="WELLS"/> TAXONOMÍA <input type="text" value="OPERADOR"/> TAXONOMÍA <input type="text" value="OPERADOR"/> <input type="button" value="CONSULTAR"/> | | SELECCIÓN | ID | TIPO | NOMBRE | INFORMACIÓN |
|--|-------|-----------|----------------|------|--------|-------------|
| | 18532 | WELL | AKACIAS-19 | | | |
| | 72945 | WELL | AKACIAS-20 | | | |
| | 87879 | WELL | AKACIAS-20 ST1 | | | |
| | 18530 | WELL | AKACIAS-9 | | | |
| | 935 | WELL | ALAMOS-1 | | | |
| | 4253 | WELL | ALBORADA-1 | | | |

Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS.MIGEP. [Citado 18 de octubre de 2016]. Disponible desde Internet en:
<http://migep.anh.gov.co:3021/InicioGeoVisor.aspx>

Se accedió a la información disponible por pozo y se compararon con las coordenadas obtenidas por DataAnalyzer® y Openwells®, esto se realizó para cada pozo de interés del proyecto para validar las coordenadas antes de ser ingresadas al aplicativo MGCP del proyecto.

Adicionalmente se hizo uso del aplicativo GeoVisor proporcionado por la ANH para la búsqueda de las coordenadas de pozos que no registraban esta información desde la base de datos OpenWells® para así poder ser validados. En la **Figura 36** se observa la plataforma de consulta del aplicativo Geovisor.

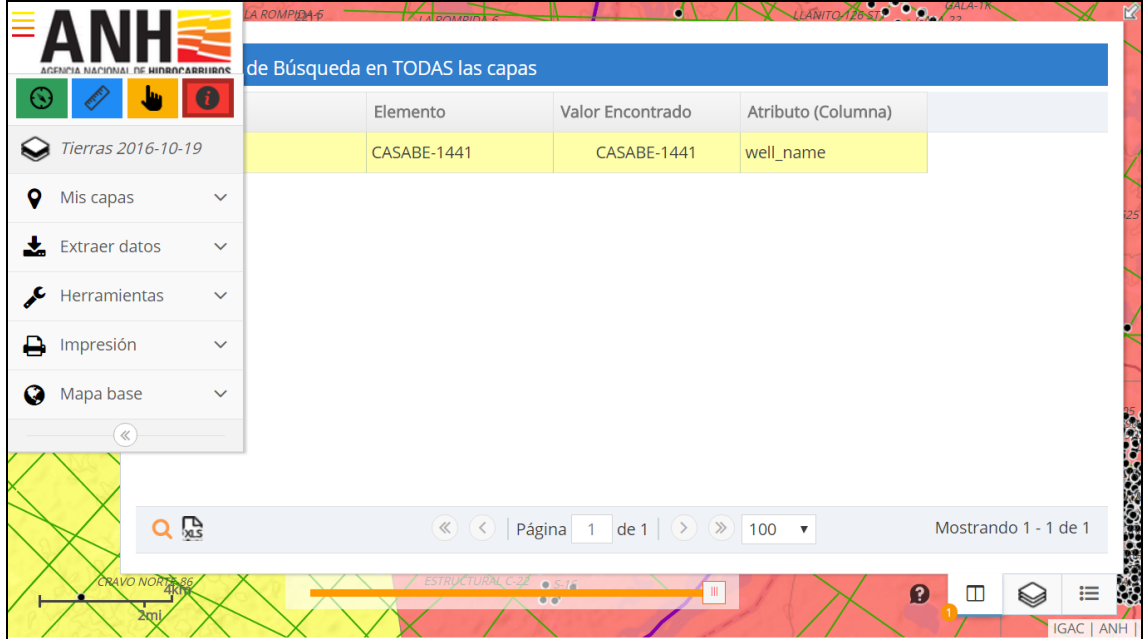
Figura 36. Explorador Geovisor ANH



Fuente: GeoVisor ANG v2.0. [Citado 1 de noviembre de 2016]. Disponible desde Internet en: <https://geovisor.anh.gov.co/>.

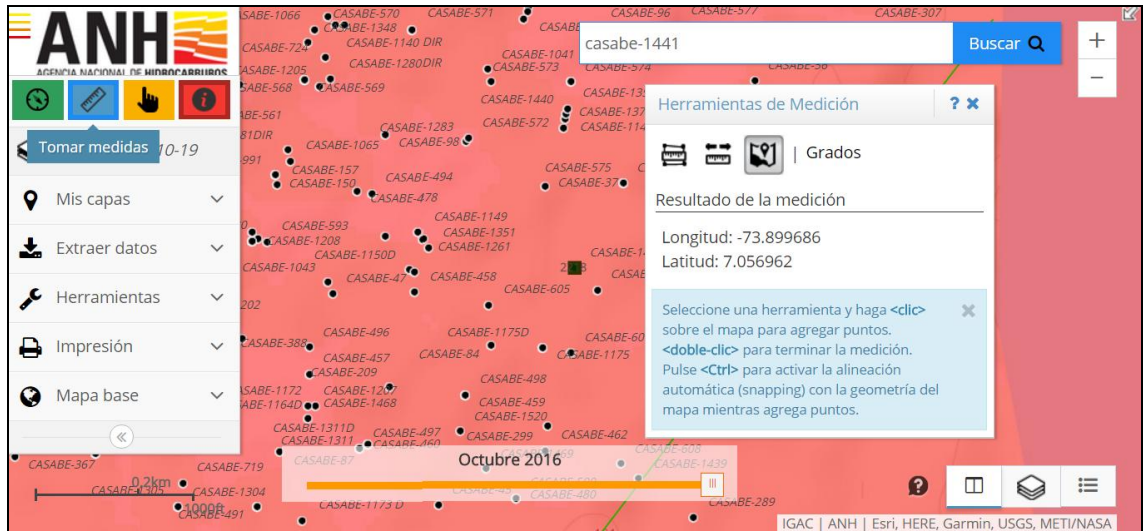
Mediante la barra de búsqueda se inserta el nombre del pozo de interés (en algunos casos no se encontraba directamente, así que era necesario ubicarlo manualmente en el mapa usando la ubicación de los pozos vecinos como herramienta de ayuda). Posteriormente se seleccionaba de la barra de herramientas de la izquierda el ícono azul, que a su vez desplegaba otro cuadro para herramientas de medición dando acceso a la “medición de grados” (coordenadas) para lo cual era necesario ubicar el mouse encima del cuadro del pozo de interés. El procedimiento de búsqueda para el pozo Casabe 1441 se puede visualizar en la **Figura 37** y **Figura 38**.

Figura 37. Ubicación del pozo Casabe XY en el GeoVisor de la ANH



Fuente: GeoVisor ANG v2.0. [Citado 1 de noviembre de 2016]. Disponible desde Internet en: <https://geovisor.anh.gov.co/>. Modificada por los autores.

Figura 38. Medición de las coordenadas del pozo Casabe 1441 en el GeoVisor de la ANH



Fuente: GeoVisor ANG v2.0. [Citado 1 de noviembre de 2016]. Disponible desde Internet en: <https://geovisor.anh.gov.co/>. Modificada por los autores.

3. Se realizó la conversión de coordenadas de magna sirga a WGS84 para poder ser ingresadas al aplicativo del MGCP. La conversión de las coordenadas se realizó a través de la información de pozos adquirida por el MIGEP el cual

proporcionaba las coordenadas en WGS84. Las coordenadas de los pozos que no se encontraron en el MIGEP fueron convertidas utilizando la aplicación web de “SUMAPA.COM” seleccionando el sistema de coordenada de origen y el sistema de coordenada de destino como se puede observar en la **Figura 39**.

Figura 39. Convertidor de coordenadas SUMAPA

Sistemas de Coordenadas de Origen y Destino: [\(Ayuda\)](#)

| Sistema Origen | Sistema Destino |
|--|---|
| Seleccione la Región: Colombia | Seleccione la Región: Colombia |
| -- Coordenadas Geográficas (datum) <input type="radio"/> Bogota 1975 (4218) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS (4686) <input type="radio"/> WGS 84 (4326) | -- Coordenadas Geográficas (datum) <input type="radio"/> Bogota 1975 (4218) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS (4686) <input checked="" type="radio"/> WGS 84 (4326) |
| -- Coordenadas Planas o Proyectadas (datum/proyección) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia Bogota zone (21897) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia East (21899) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia East Central zone (21898) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia West zone (21896) <input type="radio"/> Bogota 1975 / UTM zone 18N (21818) <input checked="" type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone (3116) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia East Central zone (3117) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia East zone (3118) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia Far West zone (3114) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone (3115) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 17N (32617) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 18N (32618) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 18S (32718) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 19N (32619) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 19S (32719) | -- Coordenadas Planas o Proyectadas (datum/proyección) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia Bogota zone (21897) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia East (21899) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia East Central zone (21898) <input type="radio"/> Bogota 1975 / Colombia West zone (21896) <input type="radio"/> Bogota 1975 / UTM zone 18N (21818) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone (3116) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia East Central zone (3117) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia East zone (3118) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia Far West zone (3114) <input type="radio"/> MAGNA-SIRGAS / Colombia West zone (3115) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 17N (32617) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 18N (32618) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 18S (32718) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 19N (32619) <input type="radio"/> WGS 84 / UTM zone 19S (32719) |

Fuente: SUMAPA.COM. Convertir coordenadas. [Citado 18 de octubre de 2016].
 Disponible desde Internet en: <http://www.sumapa.com/geocalc/geocalc.cfm>.

En la **Tabla 6** se puede observar una muestra de los pozos con sus coordenadas correspondientes en WGS84.

Tabla 6. Coordenadas por pozos

| Campo | Nombre Común del Pozo | Longitud | Latitud |
|--------------|-----------------------|------------|-----------|
| EXPLORATORIO | AKACIAS 1 | -73,682700 | 3,9580400 |
| EXPLORATORIO | AKACIAS 1 | -73,682700 | 3,9580400 |
| AKACIAS | AKACIAS 10 | -73,720000 | 3,9521300 |
| AKACIAS | AKACIAS 11 | -73,720123 | 3,9517400 |
| AKACIAS | AKACIAS 17 | -73,738000 | 3,9368900 |
| AKACIAS | AKACIAS 18 | -73,680700 | 3,9794400 |
| AKACIAS | AKACIAS 19 | -73,680800 | 3,9791900 |

Fuente: Ecopetrol S.A. y ANH. obtenido a través de DataAnalyzer®, Openwells® y MIGEP. Modificado por autores.

4. Las variables de información que se seleccionaron para que aparezcan en el mapa geográfico de eventos son las siguientes:
 - Nombre común del pozo.
 - Método de cañoneo.
 - Fecha de inicio.
 - Fecha de finalización.
 - Siglas del evento.

5. Para poder importar los datos al aplicativo web del MGCP, se organizaron en un archivo de Excel el cual debe contener las siguientes columnas para la correcta carga de la información en el MGCP:
 - Fecha de Inicio.
 - Fecha de Finalización.
 - Método de Cañoneo.
 - Nombre Común del Pozo.
 - Municipio.
 - Longitud.
 - Latitud.
 - Campo.
 - Vicepresidencia.
 - Longitud del Campo.
 - Latitud del Campo.
 - Cuenca.

En la **Tabla 7** se observa una muestra de algunas de las variables establecida anteriormente del archivo de Excel que se utiliza para importar los datos³⁵.

³⁵ Importar datos: ingresar los datos al aplicativo MGCP a través de archivos de Excel.

Tabla 7. Muestra de variables para importar datos

| Fecha de inicio | Fecha de Finalización | Método de Cañoneo | Nombre Común del Pozo | Municipio | Longitud | Latitud |
|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|
| 23/10/2010 | 23/10/2010 | CASING GUN | AKACIAS 1 | ACACIAS | -73,682700 | 3,9580400 |
| 24/11/2010 | 24/11/2010 | TCP | AKACIAS 1 | ACACIAS | -73,682700 | 3,9580400 |
| 10/08/2013 | 12/08/2013 | CASING GUN | AKACIAS 10 | ACACIAS | -73,720000 | 3,9521300 |
| 11/10/2013 | 12/10/2013 | WIRELINE | AKACIAS 11 | ACACIAS | -73,720123 | 3,9517400 |
| 31/12/2013 | 31/12/2013 | CASING GUN | AKACIAS 17 | ACACIAS | -73,738000 | 3,9368900 |
| 22/03/2013 | 22/03/2013 | TCP | AKACIAS 18 | ACACIAS | -73,680700 | 3,9794400 |
| 13/05/2013 | 13/05/2013 | WIRELINE | AKACIAS 19 | ACACIAS | -73,680800 | 3,9791900 |

Fuente: Ecopetrol S.A. y ANH. obtenido a través de DataAnalyzer®, Openwells® y MIGEP. Modificada por los autores.

Luego se procede a importar los datos a través del aplicativo “Carga de Tabla de Datos” del MGCP. En la **Figura 40** se puede observar el aplicativo para la carga de datos. Una vez importado los datos al MGCP, estos se representan en el mapa geográfico de eventos como se ilustra en la **Figura 41**.

Figura 40. Carga de Tabla de Datos

Carga de Tabla de Datos Conectividad

Por favor cargue una tabla de excel con las siguientes características:

- No debe contener celdas combinadas
- En la primera fila se ubican los nombres de las columnas
- Los datos deben estar en la primer hoja

Las columnas que debe llevar son las siguientes:

- Fecha de Inicio
- Fecha de Finalización
- Método de Cañoneo
- Nombre Común del Pozo
- Municipio
- Longitud
- Latitud
- Campo
- Vicepresidencia
- Longitud del Campo
- Latitud del Campo
- Cuenca

Archivo de Excel:

Ningún archivo seleccionado

Fuente: Información del MGCP. Modificada por los autores.

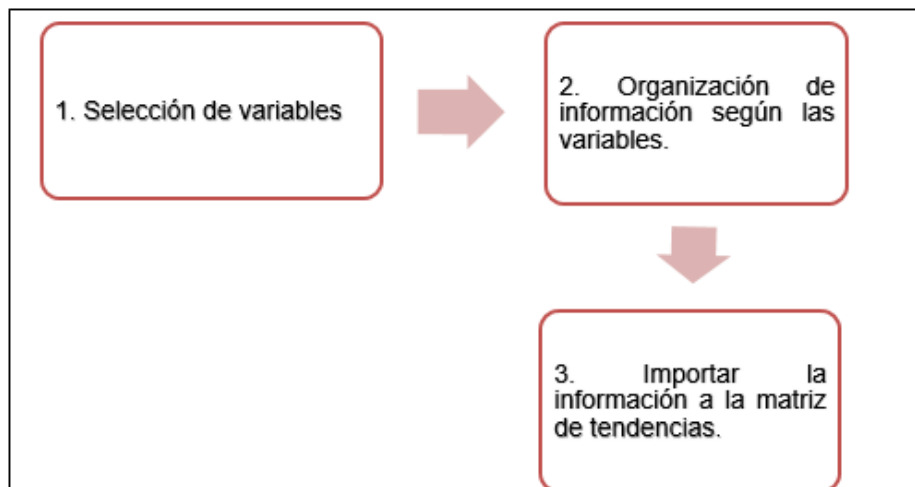
Figura 41. Mapa geográfico preliminar de eventos



Fuente: Información obtenida de MGCP. Modificada por los autores.

3.4.1.1 Matriz de tendencias: Como complemento al mapa de ocurrencias se proporcionará una matriz de tendencias con el fin de mostrar los métodos que se utilizan en un campo predeterminado durante el periodo de estudio y que se consideran recomendados a partir de la experiencia de procesos anteriores. La **Figura 42** representa la metodología empleada en ésta sección.

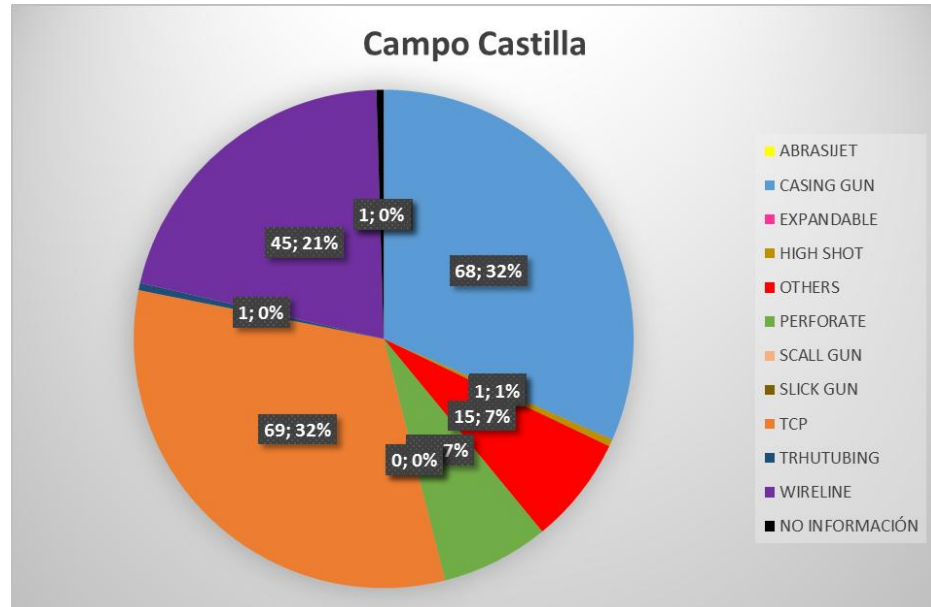
Figura 42. Metodología para el procesamiento y análisis de datos para la matriz de tendencias



1. Se eligen las variables que ya se han enunciado anteriormente en la sección de técnicas e instrumentos para la recolección de datos de la fase 1. La

directriz que se requiere obtener se asocia a un porcentaje del uso de cada sistema o método de cañoneo en un campo predeterminado, de ésta forma se sugiere por tendencia el método más utilizado históricamente. En la **Gráfica 2** se observa el análisis de la frecuencia de los métodos utilizados para el campo Castilla.

Gráfica 2. Frecuencia de métodos de cañoneo utilizados en Campo Castilla



Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

- Se organizan las variables según la cobertura de la información para que así pueda realizar filtrado desde una variable de gran escala como lo sería “Cuenca” hasta llegar al punto de la selección del método. En la **Tabla 8** se puede ver como la variable “Nombre común del pozo” proporciona un nivel de filtrado para mostrar de manera más específica el método de cañoneo utilizado en un pozo predeterminado. En la **Figura 43** se puede observar el planteamiento de la matriz para después ser programada.

Tabla 8. Representación de métodos de cañoneo por pozos

| Nombre Común del Pozo | Método de Cañoneo |
|-----------------------|-------------------|
| AKACIAS 1 | CASING GUN |
| AKACIAS 1 | TCP |
| AKACIAS 10 | CASING GUN |
| AKACIAS 11 | WIRELINE |
| AKACIAS 17 | CASING GUN |
| AKACIAS 18 | TCP |
| AKACIAS 19 | WIRELINE |
| AKACIAS 20 | CASING GUN |
| APIAY 31 | OTHERS |
| APIAY 32 | PERFORATE |
| APIAY 33H | WIRELINE |
| APIAY 34 | TCP |
| APIAY 36 | CASING GUN |
| APIAY 42 | PERFORATE |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016].
Modificada por los autores.

Figura 43. Planteamiento de la matriz de tendencias



- La **Figura 44** muestra el aplicativo “Carga de Tabla de Datos” del MGCP en el cual se procede a importar los datos.

Figura 44. Carga de tabla de datos de la matriz de tendencias

Carga de Tabla de Datos Conectividad

Por favor cargue una tabla de excel con las siguientes características:

- No debe contener celdas combinadas
- En la primera fila se ubican los nombres de las columnas
- Los datos deben estar en la primer hoja

Las columnas que debe llevar son las siguientes:

- Cuenca
- Campo
- Nombre Común del Pozo
- Método de Cañoneo

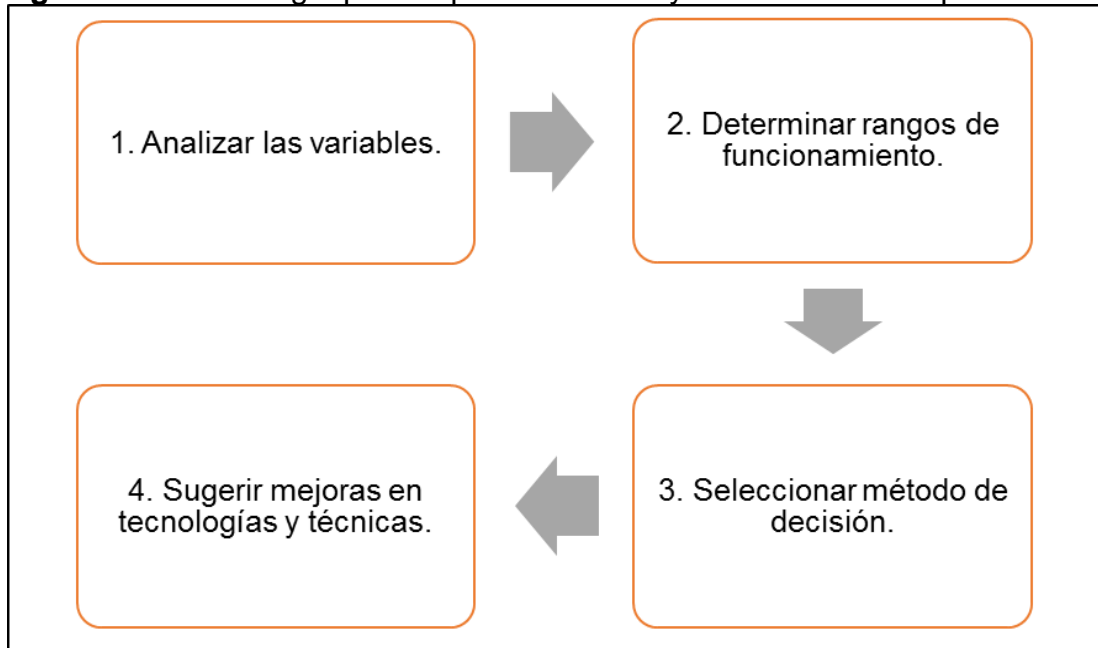
Archivo de Excel:

Ningún archivo seleccionado

Fuente: Información del MGCP. Modificada por los autores.

3.4.2 Fase 2. Esta fase se desarrolla con una metodología similar a las anteriores, pero con sus correspondientes ítems explicados anteriormente en la descripción. La metodología para el procesamiento y análisis de datos se muestra en la **Figura 45**.

Figura 45. Metodología para el procesamiento y análisis de datos para Fase 2



Descripción paso a paso:

1. Se realiza un análisis revisando la bibliografía y verificando que variables aparecen como un denominador en todos los textos, estas se seleccionan y se verifican a través de expertos en actividades de cañoneo para así determinar la importancia de dichas variables y poder realizar su selección, así como determinar los métodos aplicables a cada una de las variables. Las siguientes son las variables utilizadas para determinar el método de cañoneo y en el **Cuadro 9** se observa para que métodos aplican cada una de las variables.

Variables de selección:

- Condición de presión.
- Longitud de cañoneo.
- Ángulo de pozo.
- Velocidad de Operación.
- Profundidad de la zona de interés.
- Zonas múltiples a cañonear.
- Densidad de disparo.
- Condiciones a las que se encuentra el pozo (si se encuentra con tubería de producción o con revestimiento).

Métodos de selección otorgados:

- Casing Gun Wireline (cañoneo a través de revestimiento bajado con línea eléctrica).
- TCP (cañoneo bajado con la tubería de producción).
- Through Tubing Wireline (cañoneo a través de tubería de producción bajado con línea eléctrica).

Sugerencias otorgadas:

- Técnica Pure.
- Operaciones con cargas que disminuyan derbis.
- Operaciones con sobre balance extremo.
- Técnica High Shot Density.
- Transporte con Coiled tubing.

Cuadro 6. Aplicabilidad de las variables según el método de cañoneo

| Parámetro de operación Método de cañoneo | Condición de presión | Longitud de cañoneo | Ángulo de pozo | Velocidad de operación | Profundidad de la zona de interés | Zonas múltiples a cañonear | Densidad de disparo | Condiciones a las que se encuentra el pozo (con tubería de producción o revestimiento) |
|--|----------------------|---------------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|--|
| Casing Gun Wireline (cañoneo a través de revestimiento bajado con línea eléctrica) | X | | X | X | X | | | X |
| TCP (cañoneo bajado con la tubería de producción) | X | X | X | | X | X | X | X |
| Through Tubing Wireline (cañoneo a través de tubería de producción bajado con línea eléctrica) | X | X | X | X | X | | | X |

Fuente: Información recopilada de los autores y documentos mostrados en el Cuadro 5. Modificado por los autores.

Como se mencionó anteriormente la matriz de selección teórica se apoya en los métodos de cañoneo establecidos por la teoría pertinente a cañoneo, debido a que Ecopetrol S.A. maneja unas subclasificaciones que se encuentran inmersas en estos métodos de cañoneo establecidos.

2. Se determinan los rangos de funcionamiento de cada variable que establece el método de cañoneo a utilizar. Estos rangos de funcionamiento son tomados de la literatura previamente consultada. En el **Cuadro 7** se pueden observar los rangos para cada variable según el método de cañoneo.

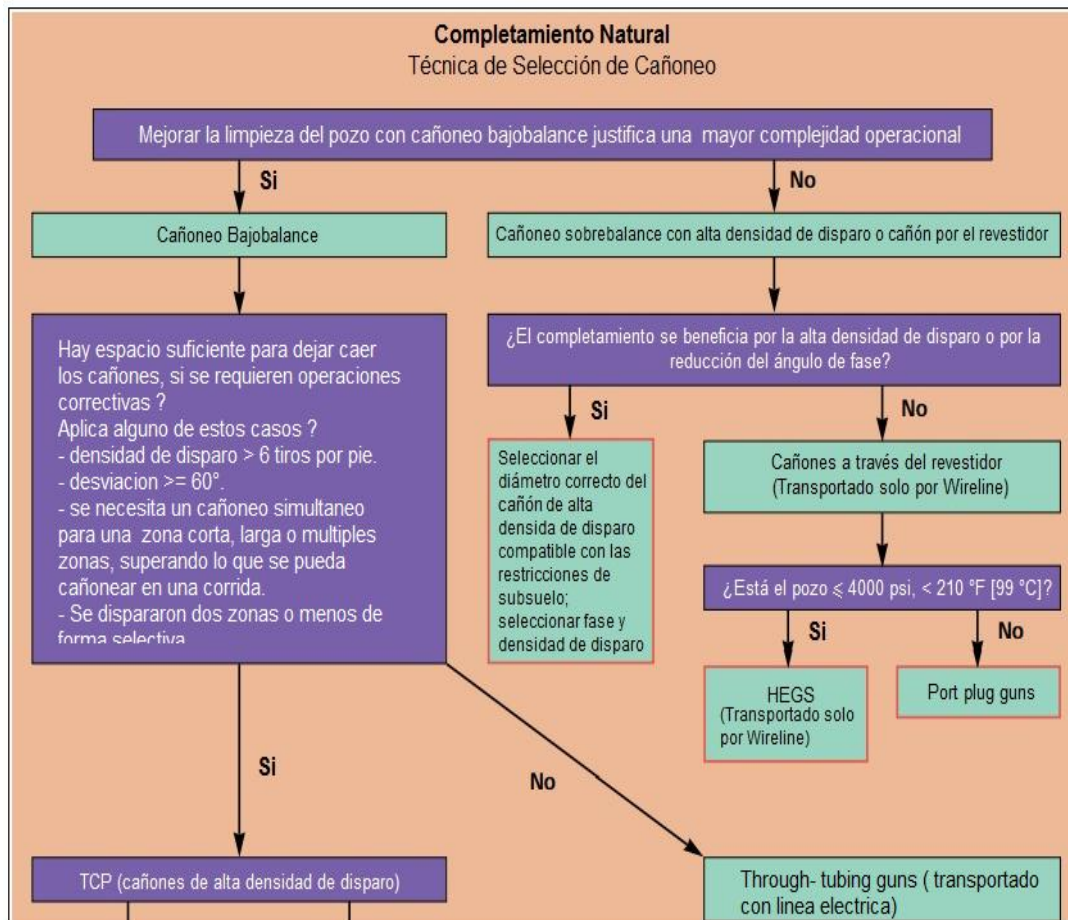
Cuadro 7. Rangos de operación de cada variable según el método de cañoneo

| Parámetro de operación Método de cañoneo | Condición de presión | Longitud de cañoneo | Ángulo de pozo | Velocidad de operación | Profundidad de la zona de interés | Zonas múltiples a cañonear | Densidad de disparo | Condiciones a las que se encuentra el pozo |
|--|---|---|---|---|-----------------------------------|--|--|---|
| Casing Gun Wireline (cañoneo a través de revestimiento bajado con línea eléctrica) | Recomendado en operaciones de sobre balance cuando la Ph>Pyacimiento. | La longitud depende del cañón que se baje pero normalmente no alcanza grandes longitudes. | Óptimo en pozos verticales o con muy poca desviación. | Su preparación para la operación es rápida debido a que no necesita el bajado de tubería de producción. | Recomendado para zonas <8000 ft. | No aplica para zonas múltiples. | Maneja densidades de disparo no tan altas. | Como su nombre lo indica se realiza cuando se tiene el revestimiento. |
| TCP (cañoneo bajado con la tubería de producción) | Recomendado en operaciones de sobre balance cuando la Ph<Pyacimiento. | De los tres métodos es el que mas longitud de cañoneo alcanza. | Recomendado para pozos altamente desviados, con un Ángulo>60°. | El tiempo de adecuamiento para poder realizar este método es alto. | Recomendado para zonas >8000 ft. | Eficiente con el cañoneo de zonas múltiples. | Cuenta con una densidad de disparo>6 TTP | Necesaria la tubería de producción para poder realizar el cañoneo. |
| Through Tubing Wireline (cañoneo a través de tubería de producción bajado con línea eléctrica) | Permite operaciones de sobre balance y bajo balance. | La longitud depende del cañón que se baje pero normalmente no alcanza grandes longitudes. | Óptimo en pozos verticales o con muy poca desviación, pero con el uso de Coiled tubing puede trabajar en pozos altamente desviados. | El tiempo de adecuamiento para poder realizar este método es medio. | Recomendado para zonas <8000 ft. | No aplica para zonas múltiples. | Densidad de disparo < 6TTP | Requiere de tubería de producción. |

Fuente: Información recopilada de los autores y documentos mostrados en el Cuadro 5. Modificado por los autores.

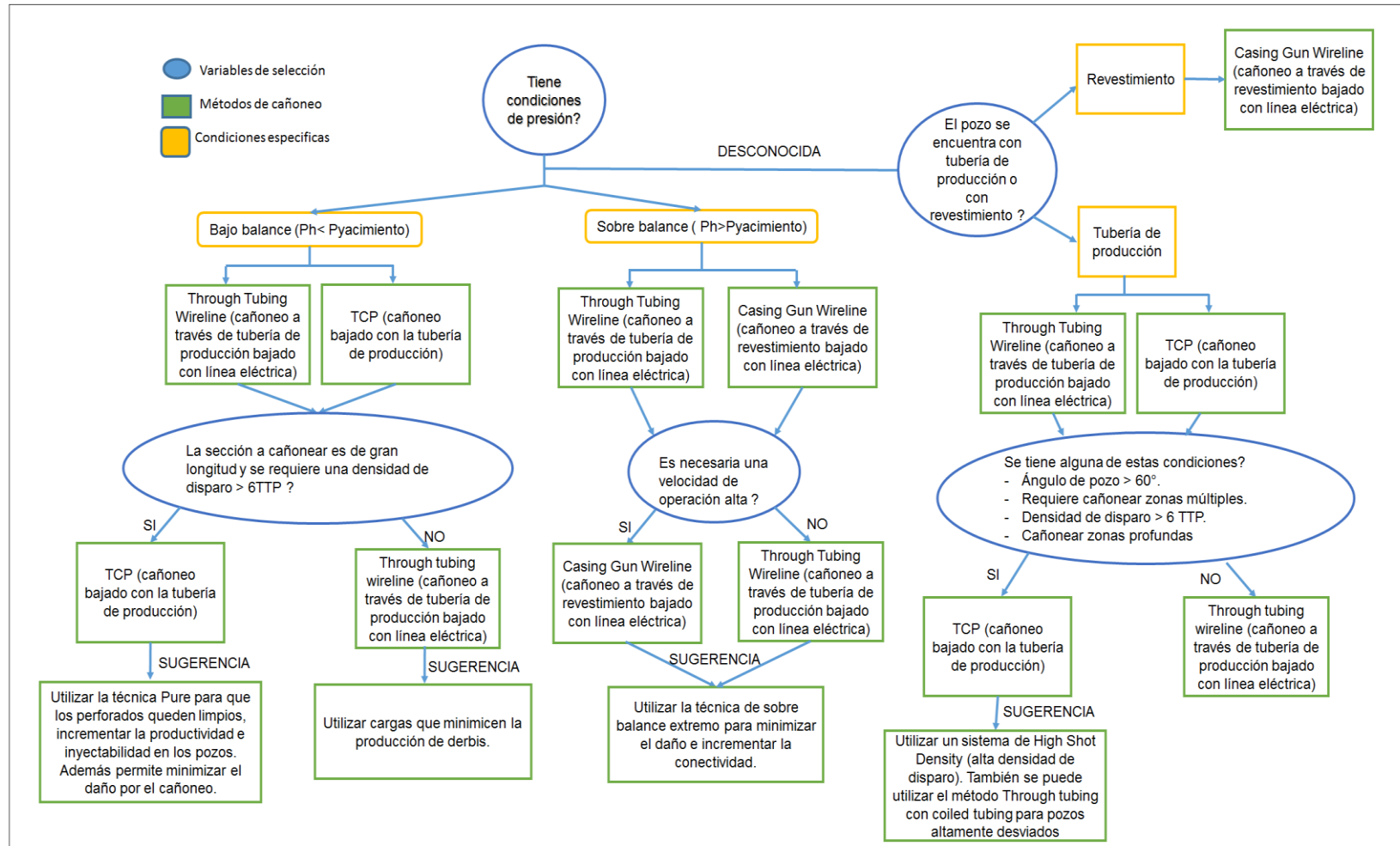
3. Se selecciona el método de decisión que ira en función de las variables seleccionadas para dar respuesta al método de selección de cañoneo, en este caso la herramienta será un árbol de decisiones, la cual es una herramienta comúnmente utilizada para seleccionar formas de operación o métodos de trabajo. En la **Figura 46** se ilustra una representación del árbol de decisión para seleccionar un método de cañoneo. Con base a esta herramienta se plantea el funcionamiento de la matriz de selección del método de cañoneo con sus correspondientes variables tal y como se observa en la **Figura 47**.

Figura 46. Representación de árbol de decisión



Fuente: COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Rivier. Aberdeen, Escocia. 1992.

Figura 47. Árbol de decisión para el funcionamiento de matriz de selección teórica

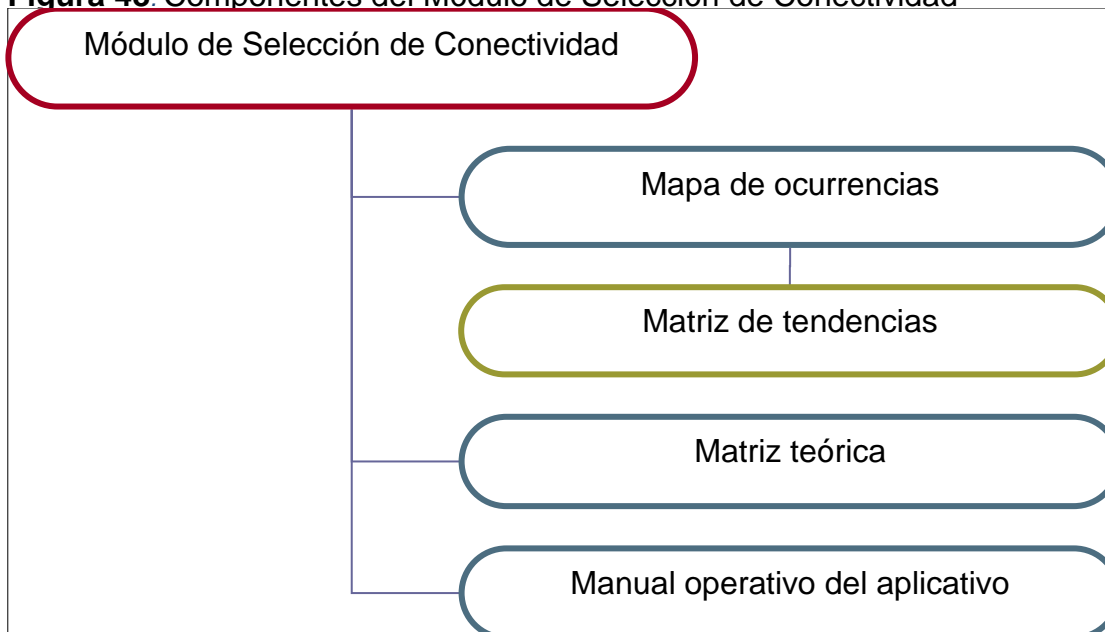


El árbol de decisión para la matriz de selección teórica es la herramienta que se usara para elegir el método que más se ajuste a las consideraciones establecidas por los ingenieros de completamiento. Esta herramienta basa su funcionamiento arrojando una serie de cuestionamientos al usuario, actuando como filtros para la selección del método de cañoneo que más se ajusta a las necesidades del usuario.

4. Se sugieren mejoras en tecnologías y técnicas para que, al momento de tener la selección del método de cañoneo a utilizar, el ingeniero de planeación de completamiento pueda observar como valor agregado, que tecnologías pueden proveerle un mejor resultado al momento de realizar la operación de acuerdo con las condiciones establecidas. Estas recomendaciones de mejoras en tecnologías aparecen en la sección de sugerencias después de otorgar el método de selección a utilizar. Estas tecnologías se encuentran explicadas en el capítulo 2 en la sección Otras técnicas de conectividad.

3.4.3 Fase 3. Esta fase abarca lo correspondiente a las técnicas de procesamiento y análisis de datos con respecto al diseño del módulo de selección de conectividad, el cual se conforma de 3 secciones, como se puede observar en la **Figura 48.**

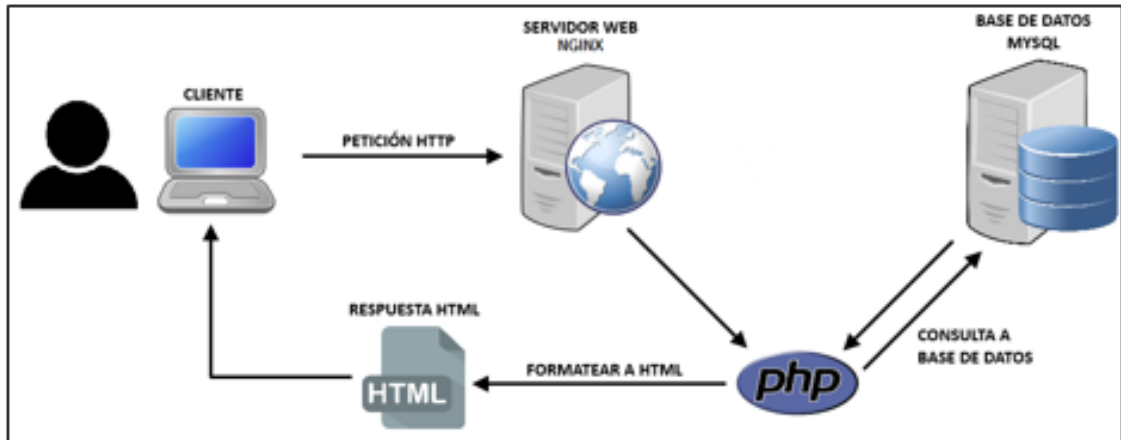
Figura 48. Componentes del Módulo de Selección de Conectividad



Como modelo de gestión de información sistematizada se planea un Software con base a una aplicación web, que permitirá visualizar en la página web con dominio

<www.mgcp.com.co> el módulo de selección de conectividad del MGCP de Ecopetrol S.A. El procesamiento de datos del módulo de selección se puede observar en la **Figura 49**.

Figura 49. Arquitectura de comunicación Cliente-Servidor



Fuente: Raspberry Pi como servidor web. Disponible desde internet en: <http://diymakers.es/raspberry-pi-como-servidor-web/>.

El usuario hace uso del navegador (cliente) en el cual ingresa la página o dirección http lo que se traduce en una petición, ésta llega al servidor que tiene MGCP. El servidor internamente hace un procesamiento (seleccionando la parte del código a usar) y genera una respuesta como un archivo html, la cual tiene las instrucciones de “Cómo se debe mostrar la página web”.

Para el diseño del código se realiza mediante ATOM (editor de texto en donde se escriben los códigos) y Laravel (framework de PHP que proporciona componentes (como bibliotecas, plantillas, etc.) para generar un ambiente de trabajo más ordenado para el desarrollo de aplicaciones

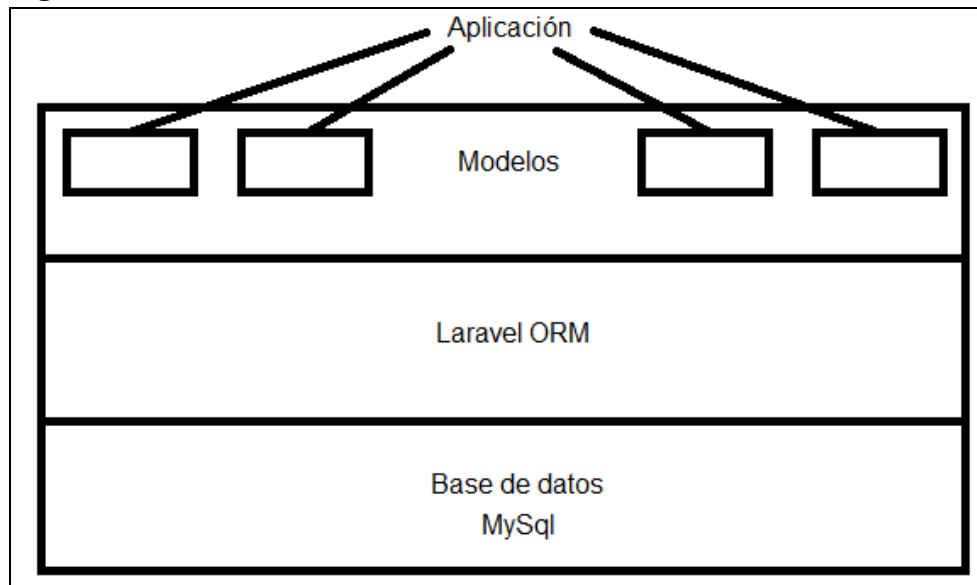
Una de las herramientas que brinda es el ORM (mapeo objeto-relacional) de Laravel conocido comercialmente como Eloquent. Entiendase ORM como “componente de software que me permite trabajar con los datos, como si ellos fueran parte de una base de datos orientada a objetos”³⁶

Eloquent es el que se conecta con la base de datos, utilizando el ORM lo que se hace es definir unos modelos (los cuales representan elementos o definiciones de

³⁶ Arquitectura de Sistemas Informáticos. Qué es un ORM (Object-relational mapping). 31 de octubre de 2007. Disponible en internet en: <http://metodologiasdesistemas.blogspot.com.co/2007/10/que-es-un-orm-object-relational-mapping.html>

términos) y la aplicación interactúa con los modelos, los cuales a su vez mediante el ORM de Laravel actualiza y modifica la base de datos, que en nuestro caso es "MySQL". Sin embargo, al ORM también se le puede conectar otra base de datos diferente como Postgre SQL o incluso tiene una opción para guardar información en archivos. Esta comunicación se puede ver jerárquicamente en la **Figura 50**.

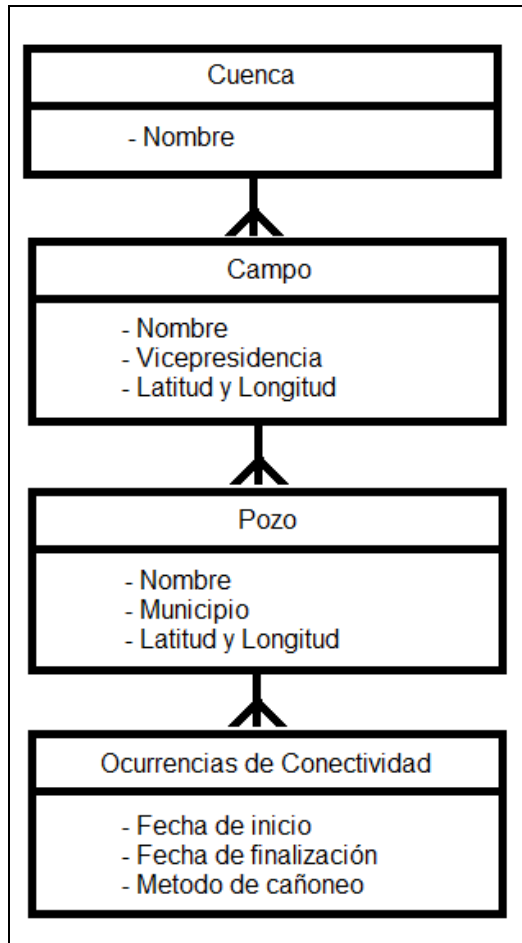
Figura 50. Interacción con la base de datos



3.4.3.1 Mapa de ocurrencias. A partir de la información obtenida desde OpenWells®, la cual ha sido previamente organizada y validada se busca generar un mapa de ocurrencias usando la API de Google Maps.

De la **Figura 50** se entiende como "modelos" la representación un elemento en la base de datos y dentro de la base de datos se guarda como una tabla. Para poder observar la relación entre ellos se referencia la **Figura 51**, seguida de una explicación.

Figura 51. Modelos de la estructura de la base de datos



En la anterior figura cada cuadro representa un modelo, en este orden de ideas en la base de datos hay un modelo para “Cuenca” y cada cuenca tiene asociado un nombre, además cada cuenca tiene asociado uno o más campos. Para realizar esta relación es necesario generar un sistema de normalización de datos asignando un identificador por cuenca “id”, lo cual se realiza como se observa en la **Tabla 9**.

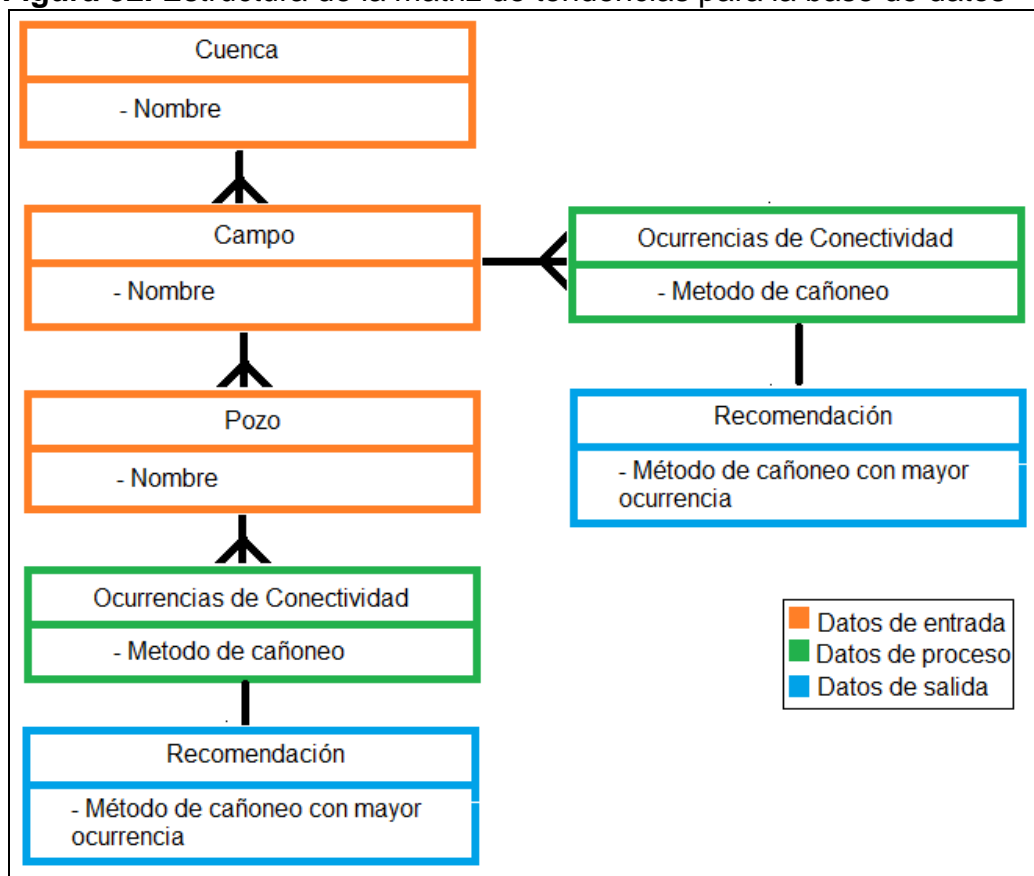
Tabla 9. Normalización de datos de las cuencas

| <input type="checkbox"/> | ID | Created_at | Updated_at | Name |
|--------------------------|----|---------------------|---------------------|------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | 1 | 2016-07-13 04:22:00 | 2016-08-03 04:41:37 | Putumayo |
| <input type="checkbox"/> | 2 | 2016-07-13 04:22:01 | 2016-08-03 04:41:43 | Llanos Orientales |
| <input type="checkbox"/> | 3 | 2016-07-13 04:22:13 | 2016-08-03 04:41:52 | Valle Inferior del Magdalena |
| <input type="checkbox"/> | 4 | 2016-07-13 04:22:13 | 2016-08-03 04:41:07 | Valle Medio del Magdalena |
| <input type="checkbox"/> | 5 | 2016-07-13 04:22:32 | 2016-08-03 04:41:50 | Catatumbo |

De la misma forma, un campo puede tener muchos pozos (cada uno tiene asociada información de nombre, municipio, latitud y longitud). Las ocurrencias de conectividad tienen una relación de uno a muchos respecto a pozos, pues puede existir más de una ocurrencia de cañoneo en un mismo pozo a lo largo del tiempo. Los datos que se visualizarán en el mapa geográfico se diferenciarán por colores según el método (“abravisejet, casing gun, expandable, high shot, perforate, scall gun, slick gun, tcp, through-tubing, wireline, others, no reporta”) y adicionalmente como fuente informativa para el usuario al seleccionar cada dato se desprenderá un cuadro de diálogo ampliando el conocimiento del caso puntual.

Como herramienta adicional se contará con una matriz de tendencias, con el fin de presentar un análisis estadístico de los métodos de cañoneo y conectividad que se aplican según el campo o el pozo del cual el usuario desee obtener la información. La interacción de la estructura de la matriz con la base de datos se puede observar en la **Figura 52**.

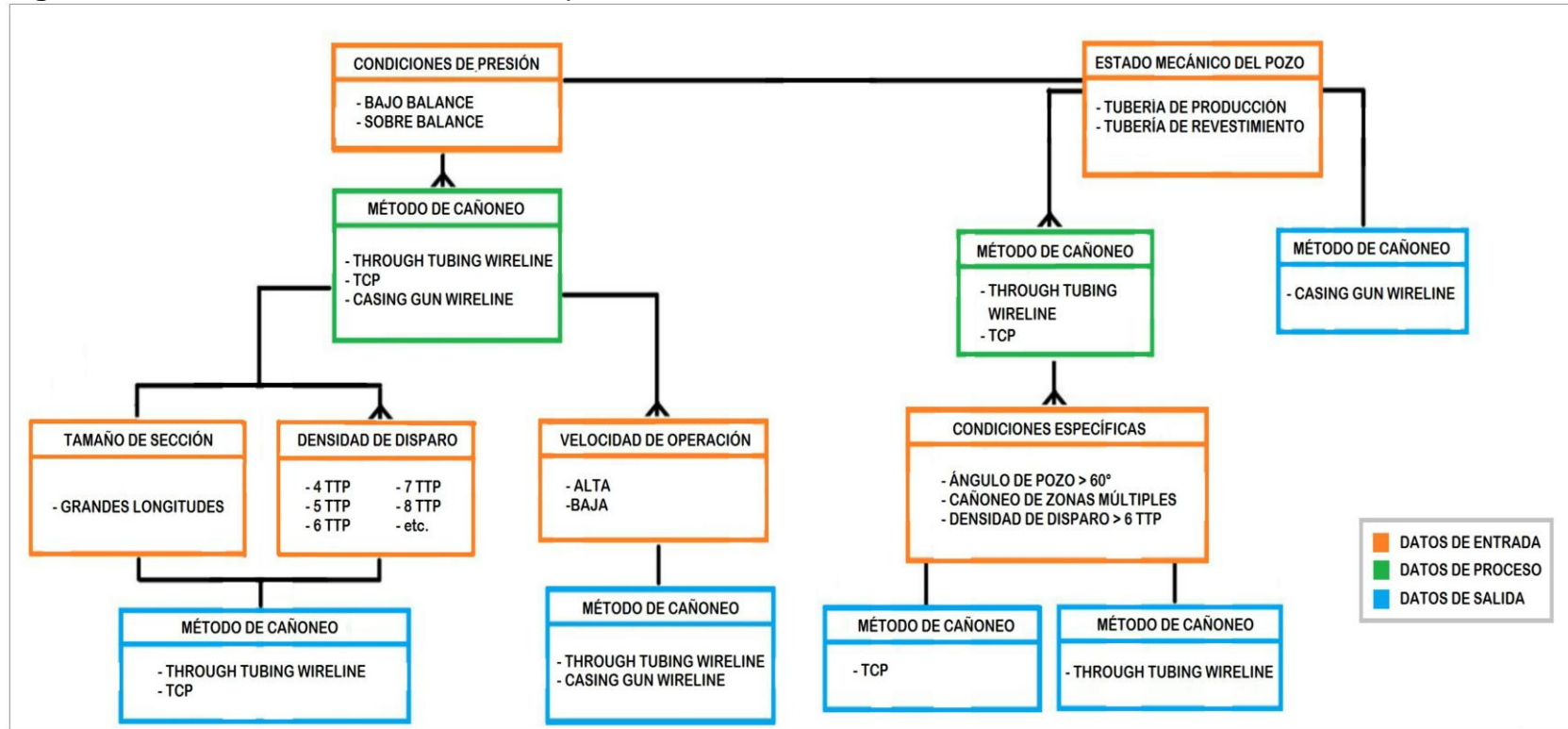
Figura 52. Estructura de la matriz de tendencias para la base de datos



En general el funcionamiento de esta sección es solicitar al usuario una información de entrada que servirán para filtrar por columnas en la misma base de datos utilizada para la generación del mapa por pozos, y así dar como resultado la recomendación de un método de cañoneo seleccionado por tener el mayor porcentaje de ocurrencia en el tiempo de estudio. A manera informativa se le brindará al usuario un cuadro de diálogo en el que se observen las estadísticas generadas por el filtro de las variables de entrada, las cuales son base para la selección de la recomendación.

3.4.3.2 Matriz teórica. El funcionamiento de la matriz teórica para el usuario consistirá en introducir unos datos de entrada, los cuales darán como resultado la selección del método de conectividad o cañoneo consistente a la técnica de procesamiento especificada en la sección 3.4.2. correspondiente a un árbol de decisión. A continuación, en la **Figura 53** se observa la estructura para la interacción con la base de datos y el requerimiento a los usuarios.

Figura 53. Estructura de la matriz teórica para la base de datos



3.4.3.3 Manual operativo del aplicativo. Mediante éste manual se busca explicar de forma didáctica (mediante un video) el uso del módulo de selección de conectividad con el fin de brindarle al usuario una herramienta de ayuda la cual permitirá el ingreso adecuado de la información para obtener un proceso de búsqueda efectivo. El ingeniero podrá consultarlo al seleccionar la opción del video manual operativo en el MGCP.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del proyecto haciendo referencia al módulo ya programado y explicado en el capítulo anterior. Se presentarán los resultados según las fases en las que se divide el proyecto las cuales cuentan con los análisis de los datos obtenidos, su proyección en el mapa geográfico de Colombia, la matriz de tendencias obtenida a través de los datos mencionados anteriormente, la matriz de selección y el manual operativo del aplicativo para poder usar correctamente el módulo.

4.1 FASE 1

Como se ha especificado anteriormente en el proyecto, esta fase implica el análisis de datos de procesos de conectividad primaria (cañoneo) realizados por Ecopetrol S.A. en toda Colombia, y representar estos datos en un mapa geográfico de Colombia mostrando los pozos y el método de cañoneo que se utilizó, además de realizar una matriz de selección de métodos de cañoneo basada en tendencias.

4.1.1 Análisis de conectividad y cañoneo en campos operados por Ecopetrol S.A. En este análisis de datos se obtuvo información de 60 campos operados por Ecopetrol S.A. a los cuales se les realizó el correspondiente análisis con respecto al método que se utilizó en los diferentes pozos de cada campo. A continuación, se presenta en la **Tabla 10** el método de cañoneo que se utilizó en cada campo y en cuantos pozos se utilizó el método correspondiente.

Tabla 10. Uso de los métodos de cañoneo por campo

| Método de cañoneo Campo | ABRASIJET | CASING GUN | EXPANDABLE | HIGH SHOT | OTHERS | PERFORATE | SCALL GUN | SLICK GUN | TCP | TRHUTUBING | WIRELINE | NO INFORMACIÓN |
|----------------------------|-----------|------------|------------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----|------------|----------|----------------|
| AKACIAS | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| APIAY | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| APIAY ESTE | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| CAÑO SUR ESTE | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CASTILLA | 0 | 68 | 0 | 1 | 15 | 15 | 0 | 0 | 69 | 1 | 45 | 1 |
| CASTILLA NORTE | 0 | 51 | 2 | 1 | 7 | 12 | 1 | 0 | 42 | 0 | 17 | 1 |
| CHICHIMENE | 1 | 109 | 0 | 1 | 1 | 27 | 6 | 0 | 31 | 0 | 39 | 0 |
| CUPIAGUA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| EXPLORATORIO | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| GAVAN | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| GUATIQUEIA | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 |
| LIBERTAD NORTE | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| MEREY | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PACHAQUIARO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SURIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 |
| SURIA SUR | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 |
| CARIBE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| CHURUYACO | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ORITO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| QUIRIYACA | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| SAN ANTORIO | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| SUCUMBIOS | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BONANZA | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 1 | 1 | 0 |
| CANTAGALLO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| CASABE | 0 | 91 | 0 | 0 | 7 | 3 | 0 | 0 | 3 | 0 | 32 | 0 |
| CASABE SUR | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 |
| CONDE | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| GALA | 0 | 25 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| GALAN | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GARZAS | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| INFANTAS | 0 | 54 | 0 | 0 | 42 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |

Tabla 10. (Continuación)

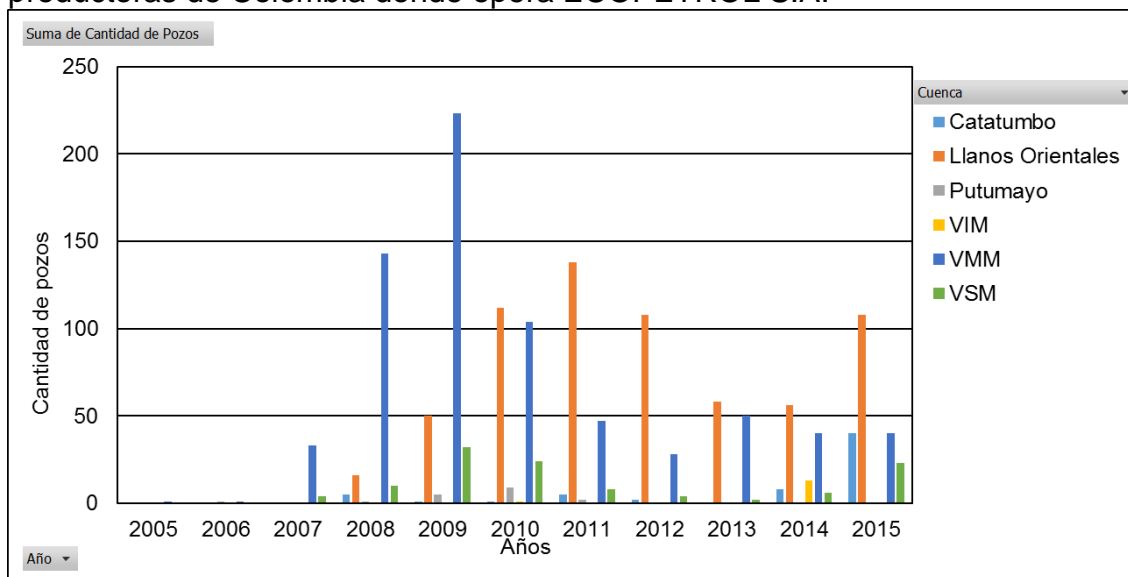
| Campo | Método de cañoneo | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------------|------------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----|------------|----------|----------------|
| | ABRASIJET | CASING GUN | EXPANDABLE | HIGH SHOT | OTHERS | PERFORATE | SCALL GUN | SLICK GUN | TCP | TRHUTUBING | WIRELINE | NO INFORMACIÓN |
| LA CIRA | 0 | 110 | 0 | 1 | 84 | 1 | 17 | 1 | 0 | 1 | 6 | 11 |
| LISAMA | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| LLANITO | 0 | 7 | 0 | 0 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NUTRIA | 0 | 10 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SABANA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| SAN ROQUE | 0 | 19 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SANTOS | 0 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 13 | 1 | 0 |
| SUERTE | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 7 | 0 | 0 |
| TESORO | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TISQUIRAMA | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| TOQUI TOQUI | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| PEÑAS BLANCAS | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| YARIGUI CANTAGALLO | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 14 | 0 | 5 | 0 |
| ARRAYAN | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| BALCON | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BRISAS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| CACICA | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DINA | 0 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| DINA TERCARIO | 2 | 39 | 0 | 0 | 1 | 16 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| LOMA LARGA | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ORTEGA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PACANDE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| QUIMBAYA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAN FRANCISCO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TEMPRANILLO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| TENAX | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PETROLEA | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SARDINATA | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TIBU | 3 | 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| TOTAL | 6 | 791 | 4 | 4 | 171 | 117 | 30 | 1 | 210 | 28 | 184 | 20 |

Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

En la **Tabla 10** se puede observar que el método de conectividad más utilizado en toda Colombia es el Casing Gun con 791 pozos, le sigue el TCP con 210 pozos, el Wireline con 184 pozos, Others con 171 pozos, Perforate con 117 pozos, Scall Gun con 30 pozos, Through tubing con 28 pozos, Abrasive jet con seis pozos, Expandable y High Shot con cuatro pozos, Slick Gun con un pozo, además de esto se tienen 20 pozos donde no se tiene el registro de conectividad.

A continuación, se presenta en la **Gráfica 3** la información de pozos cañoneados por cuenca sedimentaria entre los años 2005 hasta el 2015. En general se observó que en la cuenca del Valle Medio del Magdalena se realizó la mayor cantidad de operaciones de Cañoneo en los pozos operados por ECOPEPETROL S.A, y que estos eventos se realizaron de forma más frecuente en el año 2009. Le sigue en operaciones de cañoneo la cuenca de los Llanos Orientales, con una frecuencia de operación en el año 2011.

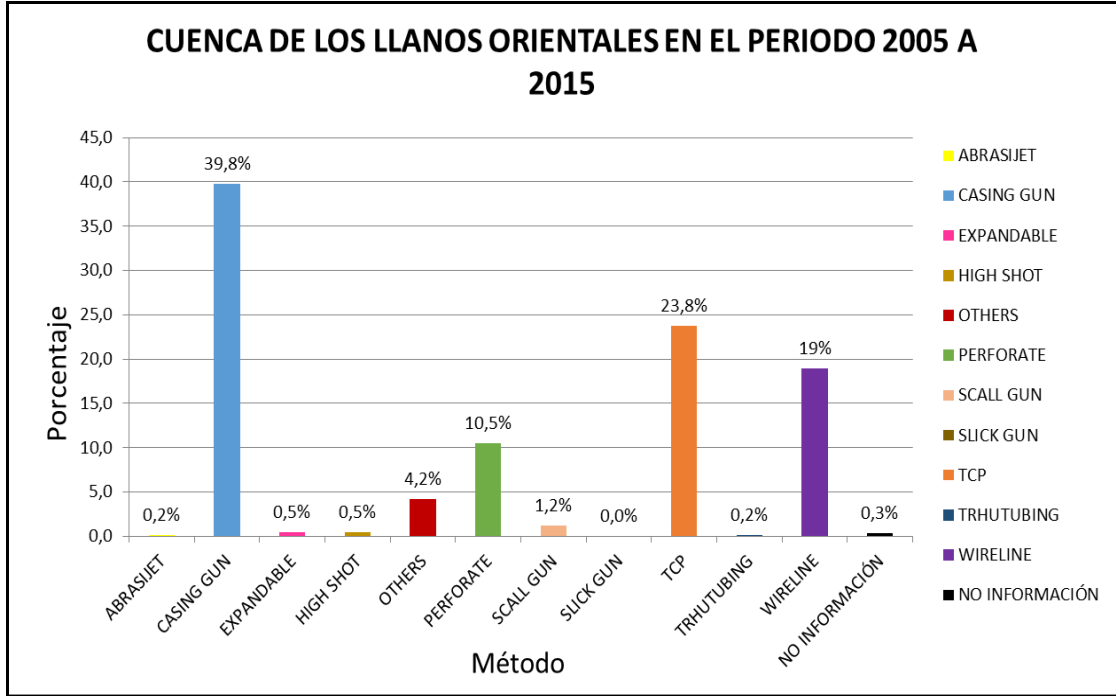
Gráfica 3. Pozos Cañoneados por Año entre 2005-2015, en Cuencas productoras de Colombia donde opera ECOPEPETROL S.A.



Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

4.1.1.1 Métodos de cañoneo para la Cuenca de los Llanos Orientales. En el periodo de 2005 a 2015 se identificaron 648 pozos con operación de cañoneo. A continuación, se representa en la **Gráfica 4** el porcentaje de ocurrencia según el método de cañoneo para la cuenca de los Llanos orientales.

Gráfica 4. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en LLAO



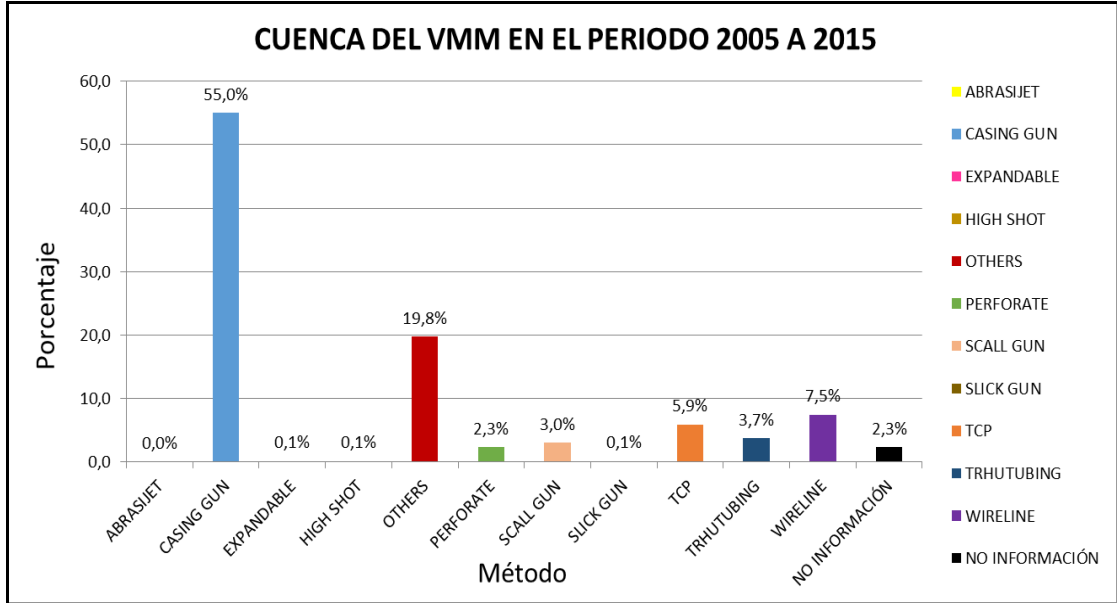
Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

En esta cuenca se realizaron operaciones de cañoneo con Casing Gun en un porcentaje del 39,8 % que representan 258 pozos de 648, en 154 pozos se utilizó TCP representando un porcentaje de 23,8%, se utilizó Wireline en un 19% que son 123 pozos , Perforate en un 10,5% representando 68 pozos , Others 4,2% lo cual son 27 pozos , Scall gun en un 1,2% (ocho pozos), Expandable y High Shot en un 0,5% (tres pozos), Abrasijet y Through tubing con 0,2% representa un pozo , no hay registro de información en dos pozos los que representa un 0,3% , y no se tienen pozos en los que se utilice Slick gun.

4.1.1.2 Métodos de cañoneo para la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

En el periodo de 2005 a 2015 se identificaron 724 pozos con operación de cañoneo. A continuación, se representa en la **Gráfica 5** el porcentaje de ocurrencia según el método de cañoneo para la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

Gráfica 5. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en VMM

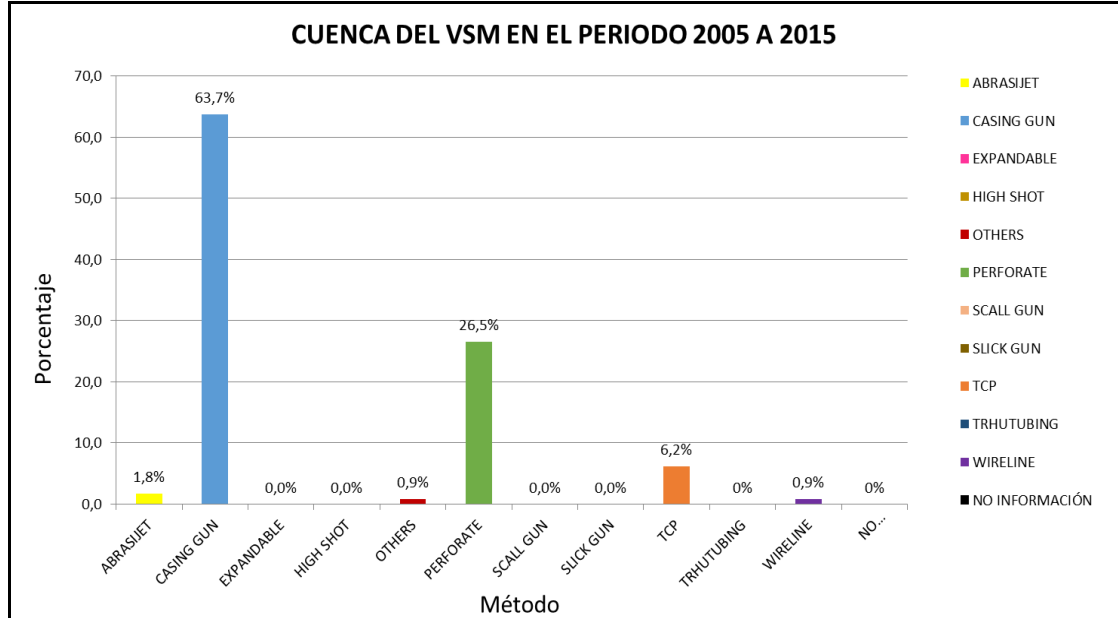


Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

En esta cuenca se realizaron operaciones de cañoneo con Casing Gun en un porcentaje del 55% que representan 398 pozos de 724, en 143 pozos se tiene registrado Others representando un porcentaje de 19,8%, se utilizó Wireline en un 7,5% representando 54 pozos , TCP en un 5,9% que son 43 pozos, Through tubing 3,7% que representan 27 pozos, Scall gun 3% (22 pozos), Perforate en un 2,3% (17 pozos), no hay registro de información en 17 pozos los que representa un 2,3%, Expandable ,High Shot y Slick gun en un 0,1% lo que representa un pozo, y no se tienen pozos en los que se utilice Abrasijet.

4.1.1.3 Métodos de cañoneo para la Cuenca del Valle Superior del Magdalena. En el periodo de 2005 a 2015 se identificaron 113 pozos con operación de cañoneo. A continuación, se representa en la **Gráfica 6** el porcentaje de ocurrencia según el método de cañoneo para la cuenca del Valle Superior del Magdalena.

Gráfica 6. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en VSM

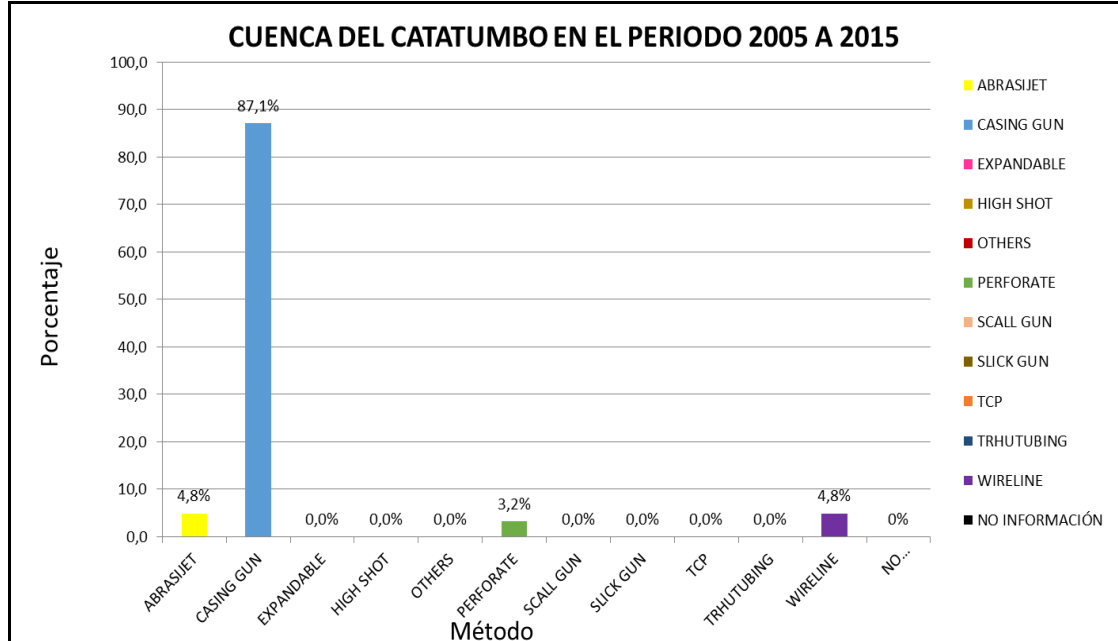


Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

Se observa que se realizaron operaciones de cañoneo con Casing Gun en un porcentaje del 63,7% que representan 72 pozos de 113, en 30 pozos se utilizó Perforate representando un porcentaje de 26,5%, se utilizó TCP en un 6,2% (siete pozos), Abrasijet en un 1,8% (dos pozos), Others y Wireline se usaron en un 0,9% representando un pozo, y no se tienen pozos en los cuales que se utilice Scall gun, Expandable, High Shot, Through tubing y Slick gun.

4.1.1.4 Métodos de cañoneo para la Cuenca del Catatumbo. En el periodo de 2005 a 2015 se identificaron 62 pozos con operación de cañoneo. A continuación, se representa en la **Gráfica 7** el porcentaje de ocurrencia según el método de cañoneo para la cuenca del Catatumbo.

Gráfica 7. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en CAT

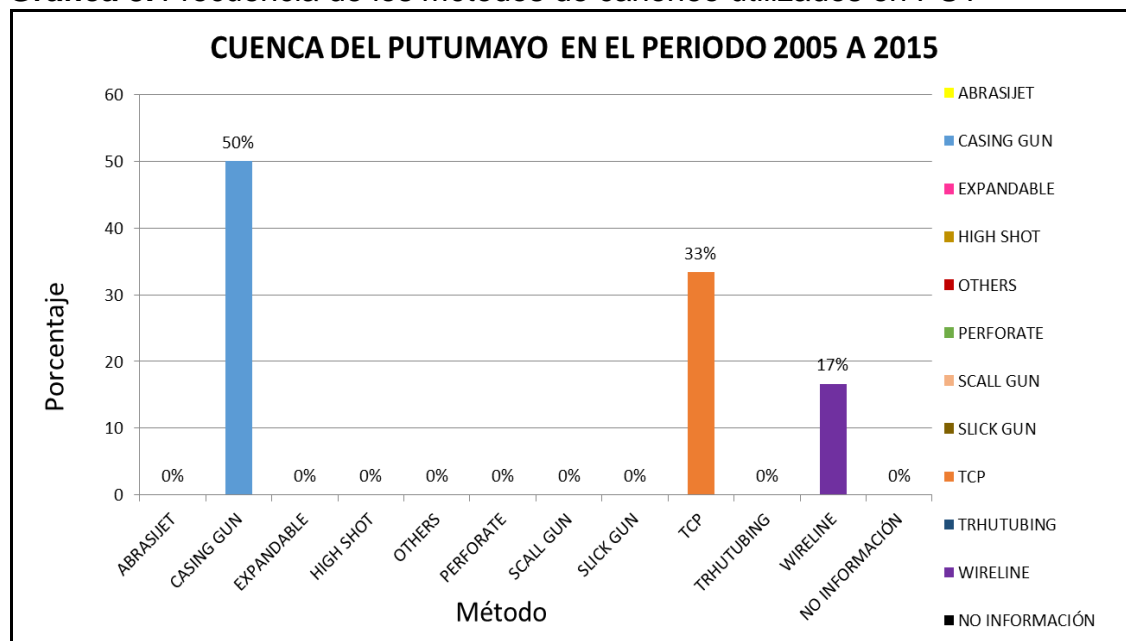


Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

Se puede observar que se realizaron operaciones de cañoneo con Casing Gun en un porcentaje del 87,1%, en 3 pozos se utilizó Abrasijet y en otros 3 pozos se utilizó Wireline representando así un porcentaje de 4,8% cada uno, se utilizó Perforate en un 3,2% que representa 2 pozos, y no se tienen pozos en los cuales que se utilice Scall gun, TCP, Expandable, High Shot, Others, Through tubing y Slick gun.

4.1.1.5 Método de cañoneo para la Cuenca del Putumayo. En el periodo de 2005 a 2015 se identificaron 18 pozos con operación de cañoneo. A continuación, se representa en la **Gráfica 8** el porcentaje de ocurrencia según el método de cañoneo para la cuenca del Putumayo.

Gráfica 8. Frecuencia de los métodos de cañoneo utilizados en PUT



Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificada por los autores.

Se observa que se realizaron operaciones de cañoneo con Casing Gun en un porcentaje del 50 % que representan nueve pozos de 18, en seis pozos se utilizó TCP representando un porcentaje de 33%, se utilizó Wireline en un 17 % lo cual representa tres pozos, y no se tienen pozos en los cuales que se utilice Perforate, Others, Scall gun, Expandable, High Shot, Abrasijet, Through tubing y Slick gun.

4.1.2 Mapa geográfico de eventos. El mapa geográfico de eventos se muestra como un ítem del módulo de selección de conectividad, en el cual se puede observar los pozos en los que Ecopetrol S.A. tiene operaciones de cañoneo, además proporciona información como método de cañoneo, fecha de inicio, fecha de finalización y el evento donde se realiza el cañoneo, esto para cada pozo. En la **Figura 54** se puede observar la parte inicial del MGCP donde se accede a las distintas opciones que ofrece el módulo de conectividad.

Figura 54. Manual General de Completamiento de Pozos



Fuente: MGCP, Autores.

Seleccionando la opción “Mapa por pozos” se accede al mapa geográfico de eventos, visualizando todos los pozos donde Ecopetrol S.A. tiene sus operaciones de cañoneo en el periodo 2005 a 2015, y que se encuentran registrados en Openwells®, y caracterizando cada pozo con el color correspondiente al método de cañoneo utilizado. En la **Figura 55** se observa el mapa final como se encuentra en el módulo.

Figura 55. Mapa geográfico de eventos final



Fuente: MGCP, Autores.

Se proporciona información adicional al momento de seleccionar un pozo en específico. En la **Figura 56** y la **Figura 57** se observa la información de los pozos Castilla 133 y Brisas 12 respectivamente.

Figura 56. Información del Pozo Castilla 133



Fuente: MGCP, Autores.

Figura 57. Información del Pozo Brisas 12



Fuente: MGCP, Autores.

4.1.3 Matriz de tendencias. Para ver este ítem se hace mediante la selección de la opción “Matriz de tendencias” (ver **Figura 54**), la cual evidencia el funcionamiento del planteamiento del diseño de su estructura como se mostró en el Capítulo 3. De esta forma mediante la **Figura 58** y la **Figura 59** se puede observar cómo se realiza la selección de escenarios por Cuenca y Campo, respectivamente.

Figura 58. Matriz de tendencias del módulo de conectividad del MGCP, selección de Cuenca



Fuente: MGCP, Autores.

Figura 59. Campos de la Cuenca del Catatumbo



Fuente: MGCP, Autores.

Al seleccionar la Cuenca del Catatumbo, se despliegan las opciones de Campos que se encuentran en ella: Petrolea, Sardinata, Tibú. Al seleccionar el Campo de interés, por ejemplo, Petrolea se muestra una ventana con los resultados según la selección hecha previamente como se muestra a continuación, en la **Figura 60**.

Figura 60. Resultados de tendencias de conectividad del Campo Petrolea



Fuente: MGCP, Autores.

En la parte superior se enuncian los porcentajes de los métodos de conectividad que se encuentran en el campo, y posteriormente se amplía la información mostrando el método usado en cada uno de los pozos pertenecientes al campo.

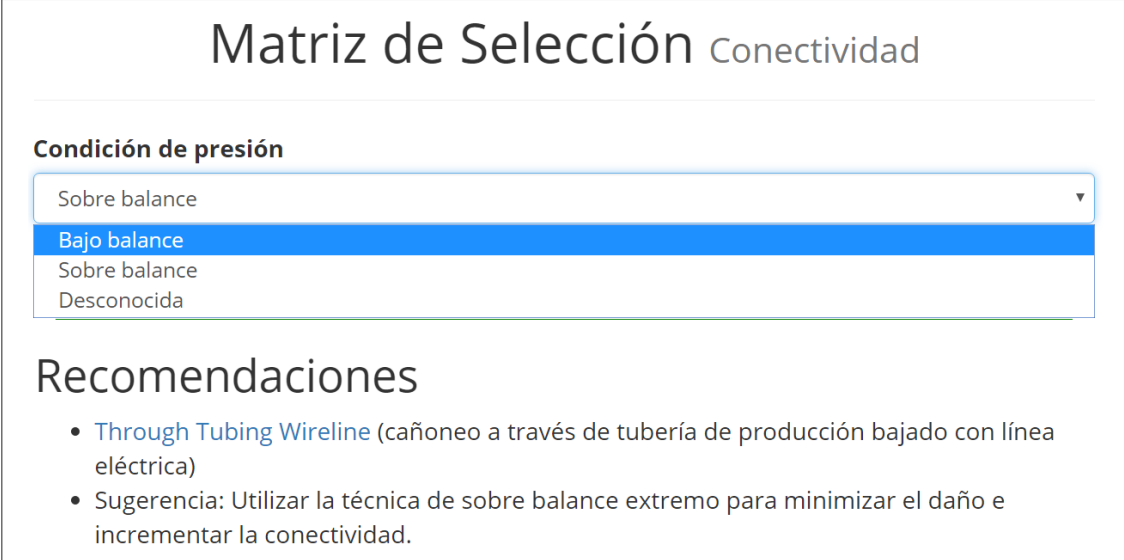
Este procedimiento se aplica para las demás cuencas y respectivos campos, correspondientes a la información obtenida de OpenWells®.

4.2 FASE 2

Esa fase corresponde a la matriz de selección teórica. Así como los anteriores ítems, ésta se puede visualizar al elegir la segunda opción de las tres que ofrece el módulo de conectividad, como se referencia en la **Figura 54**.

Posterior a la selección de la opción “Matriz de selección” la ventana que se puede visualizar es la que se muestra en la **Figura 61**, en la cual se puede observar que la primera variable que se debe especificar es la “Condición de presión” del pozo.

Figura 61. Matriz de selección, variable condición de presión



Matriz de Selección Conectividad

Condición de presión

Sobre balance

Bajo balance

Sobre balance

Desconocida

Recomendaciones

- [Through Tubing Wireline](#) (cañoneo a través de tubería de producción bajado con línea eléctrica)
- Sugerencia: Utilizar la técnica de sobre balance extremo para minimizar el daño e incrementar la conectividad.

Fuente: MGCP, Autores.

Cada una de las opciones (Bajo balance, sobre balance, desconocida) direcciona la matriz internamente para solicitar la especificación de las siguientes variables. En el capítulo 3, en el numeral 3.4.3.2 Matriz teórica se observa de manera gráfica el funcionamiento de ésta matriz.

A continuación, en la **Figura 62** se evidencia la ventana que se visualiza al seleccionar la opción de condición de presión “Desconocida”.

Figura 62. Matriz de selección, condición de presión desconocida

Matriz de Selección Conectividad

Condición de presión

Desconocida ▼

¿El pozo se encuentra con tubería de producción o con revestimiento?

Tubería de producción ▼

Se tiene alguna de estas condiciones?

- **Ángulo de pozo > 60°.**
- **Requiere cañonear zonas múltiples.**
- **Densidad de disparo > 6 TTP.**
- **Cañonear zonas profundas**

Recomendaciones

- [TCP](#) (cañoneo bajado con la tubería de producción)
- Sugerencia: Utilizar un sistema de High Shot Density (alta densidad de disparo). También se puede utilizar el método Through tubing con coiled tubing para pozos altamente desviados.

Fuente: MGCP, Autores.

De esta forma el aplicativo muestra unas opciones para ir seleccionando el método que sera dado en la parte inferior en la parte de recomendaciones según la selección de las variables. En éste caso enuncia dos comentarios importantes a nivel de ésta sección: TCP (cañoneo bajado con la tubería de producción) y Sugerencia: utilizar un sistema de High Shot Density (alta densidad de disparo). También se puede utilizar el método Through tubing con coiled tubing para pozos altamente desviados.

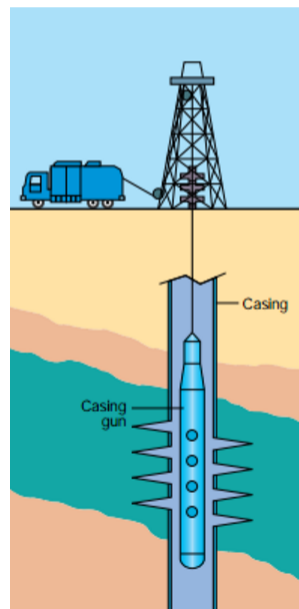
Como se observa en la **Figura 62** la recomendación “TCP” aparece de color azul indicando que al hacer click sobre éstas palabras se redirecciona al usuario a una ventana en la cual podrá encontrar mayor información como se observa en la **Figura 63**, **Figura 64** y la **Figura 65**.

Figura 63. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón bajado a través del revestidor

Cañón bajado a través del revestidor (Casing Gun)

En esta técnica se realiza el cañoneo a través del Casing sin necesidad de tubería de producción. El diámetro interno del casing limita el tamaño del cañón, esto permite usar mayor rendimiento de penetración profunda o cargas de hueco grande para una densidad de tiro optima y fases de perforación. Una de las ventajas es que proporciona control sobre el tamaño de las perforaciones. En la **Figura 1** se observa la representación de la técnica.

Figura 1. Técnica Casing Gun.



Fuente. COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia. 1992.

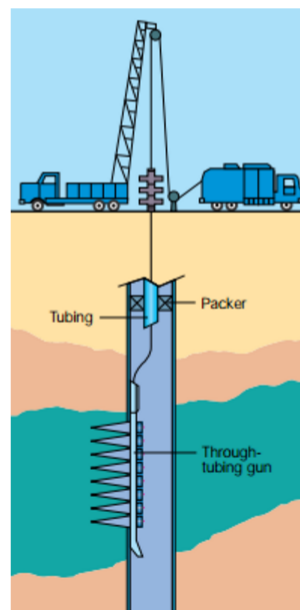
Fuente: MGCP, Autores.

Figura 64. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón bajado a través de tubería de producción

Cañón bajado a través de tubería de producción (Through Tubing)

Se realiza cuando se ha finalizado el completamiento, se crea un diferencial de presión negativo y posteriormente se baja el cañón con equipo de guaya. Este método de cañoneo (Ver **Figura 2**) permite obtener una buena limpieza de las perforaciones debido a su condición de presión. Sin embargo, ellos no son selectivos, es por ello que cuando se requiere probar otro intervalo es necesario controlar el pozo pues las perforaciones quedan expuestas a los fluidos de control, lo que puede causar daño.

Figura 2. Técnica de cañoneo through tubing.



Fuente. COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia. 1992.

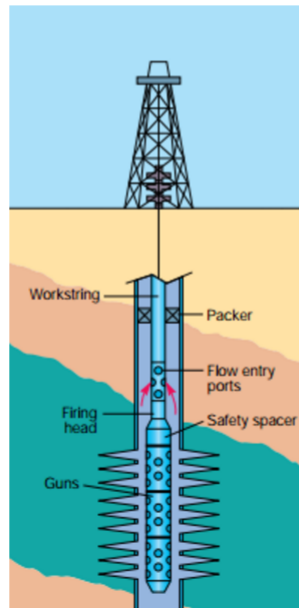
Fuente: MGCP, Autores.

Figura 65. Explicaciones de los métodos de cañoneo, cañón con TCP

Cañón con TCP (Tubing Conveyed Perforating)

Esta técnica (Ver **Figura 3**) involucra la corrida de un cañón casing estándar con tubing o tubería de perforación. Las operaciones de TCP son más eficientes pues brindan perforación de múltiples intervalos, es decir que si se requiere con ayuda de una empaadura se logra perforar en una corrida gran extensión de intervalos. Sin embargo, otras técnicas como el Wireline proporciona mayor velocidad de perforación; éste factor es importante tenerlo en cuenta cuando se analiza la operación a llevar a cabo en pozos con altas temperaturas, ya que su velocidad hace que el tiempo de exposición de los explosivos sea menor. Por otra parte, brinda grandes beneficios en cuanto a la seguridad operacional pues de tiene tubería en el pozo al igual que tener instalado el cabezal del pozo. Mediante este sistema, el cañón tiene dos maneras de ser disparado¹: Por diferencial de presión y por percusión.

Figura 3. Cañoneo Tubing Conveyed Perforating.



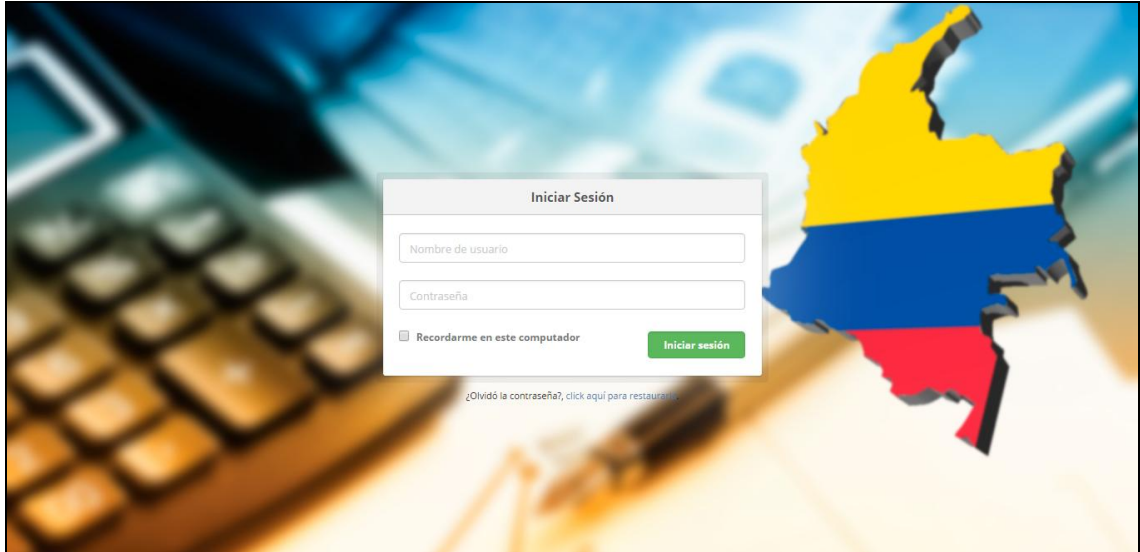
Fuente. COSAD, Charlie. Schlumberger Testing Services. Oilfield Riview. Aberdeen, Escocia. 1992.

Fuente: MGCP, Autores.

4.3 FASE 3

En ésta sección se puede visualizar el resultado final del aplicativo del Manual General de Completamiento de Pozos de Ecopetrol S.A, constituido por cinco módulos, de los cuales el de conectividad es el correspondiente a este proyecto. La **Figura 66** muestra la página de ingreso al MGCP, en donde solo personal autorizado y con conocimiento de la contraseña podrá continuar y visualizar su contenido.

Figura 66. Página de ingreso al MGCP



Fuente: MGCP, Autores.

Cuando el usuario ingresa, la interfaz que se observa es la de la **Figura 67**, en ésta como se ha dicho anteriormente se visualizan las opciones que contiene el módulo de selección de conectividad.

Figura 67. Interfaz inicial del MGCP



Fuente: MGCP, Autores.

A continuación, se presenta la **Figura 68** que junto a la **Figura 69** y **Figura 70** corresponden al mapa de ocurrencias, matriz de selección y matriz de tendencias, respectivamente.

Figura 68. Sección del mapa geográfico de eventos en el MGCP



Fuente: MGCP, Autores.

Figura 69. Sección de la matriz de selección teórica en el MGCP

The screenshot shows a web-based interface for a theoretical selection matrix. At the top, there is a dark navigation bar with the following menu items: 'MGCP', 'Control de Arena', 'Fluidos de Completamiento', 'Sistemas de Levantamiento Artificial', 'Conectividad', 'Completamientos Múltiples', and 'Administrador'. Below the navigation bar, the main content area has a white background. At the top of this area, the text 'Matriz de Selección Conectividad' is displayed. Below this, there is a section titled 'Condición de presión' with a dropdown menu. At the bottom of the section, there is a section titled 'Recomendaciones'.

Fuente: MGCP, Autores.

Figura 70. Sección de la matriz de tendencias en el MGCP

MGCP Control de Arena Fluidos de Completamiento Sistemas de Levantamiento Artificial Conectividad Completamientos Múltiples Administrador

Matriz de Tendencias Conectividad

Aquí puede obtener la matriz de tendencia de conectividad que proporciona la frecuencia de los métodos que se utilizan en cada campo y el método de cañoneo por pozo durante el periodo 2005-2015.

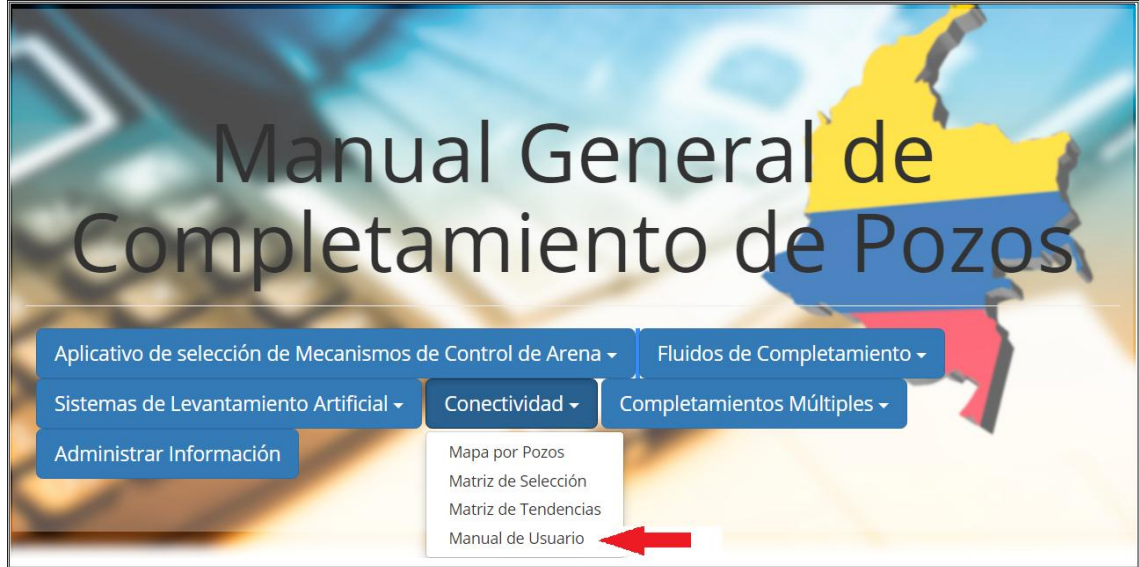
Seleccione una cuenca:

| |
|-------------------|
| Catatumbo |
| Llanos Orientales |
| Putumayo |
| VMM |
| VSM |

Fuente: MGCP, Autores.

Estas figuras se muestran con el fin de evidenciar el resultado de sus respectivos contenidos. Por otra parte, como se menciona en el tercer capítulo, hace parte de la fase 3 el manual operativo del aplicativo, es por ello que se hace necesario aclarar que el manual operativo se encuentra accesible al usuario en forma de video, el cual tiene una duración de 3 minutos, 37 segundos. Consecuente con lo anteriormente mencionado en el presente documento se plasma la forma de acceso a él mediante la **Figura 71**, y una representación del mismo con la **Figura 72**.

Figura 71. Acceso al Video del Manual Operativo



Fuente: MGCP, Autores.

Figura 72. Interfaz del Manual a manera de Video, incluido en el módulo



Fuente: MGCP, Autores.

5. CONCLUSIONES

- El módulo de selección de conectividad primaria permite el análisis de 1.566 pozos en 60 campos en el periodo 2005 a 2015 donde Ecopetrol S.A. tiene operaciones de cañoneo, y se obtuvo que entre el periodo 2005 a 2010 la cuenca donde más se realizó operaciones de cañoneo fue la del Valle Medio del Magdalena (VMM) con 505 pozos que representa el 65% de las operaciones, y entre el período 2010 a 2015 la cuenca que más operaciones de cañoneo registro fue la de los Llanos Orientales (LLAO) con 580 pozos que representa el 56% de las operaciones.
- En los pozos identificados y analizados el método de cañoneo utilizado en mayor proporción fue el Casing gun en un 51% (791 pozos), esto se puede deber a la facilidad y velocidad con la que se puede realizar este cañoneo; le sigue el TCP con 13% (210 pozos) lo cual representa una gran cantidad de pozos posiblemente desviados o donde se tuvo que realizar grandes longitudes de cañoneo.
- El módulo de selección de conectividad primaria permite observar de manera gráfica cuales son las cuencas donde más se realizan operaciones de cañoneo y cuál es el método predominante.
- La representación de los métodos de conectividad primaria en el mapa geográfico de Colombia permitió identificar que en las cuencas del Valle Medio del Magdalena y la de los Llanos Orientales es donde se encuentra mayor representación de pozos con eventos de conectividad primaria, siendo para el VMM el 46% que representan 724 pozos principalmente en los Departamentos de Santander y Antioquia; y para los LLAO 42% representando 646 pozos principalmente en los Departamentos de Meta y Casanare.
- Se identificaron las variables técnicas inherentes a la planeación y selección del tipo de cañoneo a emplear durante el completamiento original de un pozo, las cuales se utilizaron para el desarrollo de la matriz de selección teórica incluida en el módulo de selección de conectividad, estas son: condición de presión, longitud de cañoneo, ángulo de pozo, velocidad de operación, profundidad de la zona de interés, zonas múltiples a cañonear, densidad de disparo y las condiciones mecánicas a las que se encuentra el pozo (si tiene tubería de producción o revestimiento) .
- El módulo de selección de conectividad primaria proporciona una guía teórica durante la formulación de estudios de pre-factibilidad para la selección del

método de cañoneo que más se ajuste a las condiciones de operación de cada pozo de Ecopetrol S.A.

6. RECOMENDACIONES

- Profundizar en las tendencias de cada uno de los campos, a manera de nuevos proyectos que estudien las justificaciones técnicas por las cuales Casing gun es el sistema de cañoneo predominantemente aplicado en los pozos operados por Ecopetrol S.A.
- Correlacionar a profundidad técnicas y tecnologías mejoradas con el módulo de selección de conectividad primaria para proporcionar más métodos de cañoneo.
- Realizar una matriz para la selección de los diferentes tipos de cañones y cargas para un pozo en específico.
- Realizar un análisis-diagnóstico de factores que inciden para que los métodos de cañoneo Through tubing, Abrasive, Expandable, High Shot y Slick Gun, tengan una aplicación tan baja en los pozos completados por Ecopetrol S.A.
- Realizar un estado del arte de los métodos de cañoneo, describiendo la aplicabilidad de nuevas tecnologías a nivel mundial y local (Colombia) junto con sus rangos operativos.
- Formular una versión mejorada de la matriz, transformándola de aplicación netamente teórica a una plataforma numérica más robusta que incluya la relación aritmética entre los diferentes parámetros técnicos.
- Realizar procesos de revisiones de los registros de métodos de conectividad primaria que se ingresen a la plataforma Openwells®, para así garantizar la calidad de la información antes de realizar futuros procesos.
- Consultar en otros programas proporcionados por Ecopetrol S.A. diferentes a Openwells®, para corroborar y complementar la información de operaciones de conectividad primaria al momento de completar los pozos.
- Proporcionar un registro único de información para todas las operaciones de conectividad primaria para poder registrar de manera adecuada en la plataforma Openwells®.
- Se sugiere establecer una revisión de la información de coordenadas obtenida de la plataforma OpenWells® en comparación con el aplicativo MIGEP de la ANH para mantener un control de la calidad de la misma y evitar incongruencias.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuencas Minironda. [Online]. 2009. Tomado de: [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Minironda%20PhD%20Jairo%20Mojica%20\(pdf\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Minironda%20PhD%20Jairo%20Mojica%20(pdf).pdf)

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Cuenca Llanos Orientales. [Online]. 2012. Tomado de: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf>

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Cuenca Valle Medio del Magdalena. [Online]. 2012. Tomado de: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/6.%20Informe%20Final%20VMM.pdf>

ALMANZA, Cesar Augusto y Vargas, José Daniel. Cuantificación de reservas de la formación Barco en el Campo Carbonera la Silla, en la Cuenca del Catatumbo, ubicado en Tibú Norte de Santander. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.

ÁLVAREZ, Andrés Felipe y Fajardo, María Camila. Diseño de un nuevo tren de fluidos de limpieza y remoción para las operaciones de completamiento en el campo Castilla. Trabajo de grado Ingenieros de Petróleos. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Evaluation of Well Perforators. API RP43. 1971.

ARQUITECTURA DE SISTEMAS INFORMÁTICOS. Qué es un ORM (Object-relational mapping). [Online]. 2007. Tomado de: <http://metodologiasdesistemas.blogspot.com.co/2007/10/que-es-un-orm-object-relational-mapping.html>

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DEL PETRÓLEO. Estimulación Hidráulica en Yacimientos No Convencionales. [videograbación]. 3 min, 45 s, sonido, color.

BELLARBY, J. Well Completion Design, [Online]. 2009. Tomado de: https://books.google.com.co/books?id=SPlyvZvYgjoC&pg=PA166&lpg=PA166&dq=coberly+criteria&source=bl&ots=jVu26BHeMk&sig=Ut6Vb77s_0RTYk5F1JA0V6

MW79Y&hl=es419&sa=X&sqj=2&ved=0ahUKEwjI4aOY6aDLAhUCHR4KHbp8ClwQ6AEIKjAC#v=onepage&q=coberly%20criteria&f=false

BAQUERO, Liliana. Análisis comparativo de la eficiencia de los tipos de cargas utilizadas en los trabajos de cañoneo en los Campos Cusiana y Cupiagua. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2001. 35-53 p.

BARRERO, D. PARDO, A. VARGAS, C. MARTÍNEZ, J. ANH. Colombian Sedimentary Basins. [Online] 2007. Tomado de: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Cuencassedimentarias/Documents/colombian_sedimentary_basins.pdf

BARRETO, Juan, et al. Cañoneo de pozos. República Bolivariana de Venezuela. Instituto Universitario Politécnico “Santiago Mariño”. 2015.

CANAS, Vincen, “Punzado y daño de formación”. [Online]. Tomado de: <http://slideplayer.es/slide/2545757/>

DE LA HOZ, Maty María y Ortiz, Diana Patricia. Metodología para la selección, diseño y ejecución del cañoneo y/o recañoneo de pozos de bajo potencial, aplicación al campo Colorado. Trabajo de grado Ingenieros de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. 2009.

EVINGER, H. H., y Muskat, M. Some Theoretical Considerations on the Problem of Well Shooting. Society of Petroleum Engineers. Tulsa, Estados Unidos. 1941.

FOLSE, K., Dupont, R., Malbrough, J., & Chow, C. Perforating for Injection Wells. Society of Petroleum Engineers. Virginia, Estados Unidos. 2004.

GRANT, Bruce, Duvall, W. I., Obert, L., Rough, R. L., & Atchison, T. C. Research on Shooting Oil and Gas Wells. American Petroleum Institute. Estados Unidos. 1950.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación, Presentación de Tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. 2008. NTC 1486.

— — — — — .. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008, p. 12.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998, p.2.

J. de Porta. Léxico Estratigráfico. Paris: Centre national de la recherche scientifique. 1974.

LEWIS, Paul. The How and Why of Oil-Well Shooting. American Petroleum Institute. Estados Unidos. 1938.

MCDOWELL, J. M., & Muskat, M. The Effect on Well Productivity of Formation Penetration Beyond Perforated Casing. Society of Petroleum Engineers. 1950.

MÉNDEZ CASTRO, Armando. Aspectos de producción [diapositivas]. Instituto Mexicano del Petróleo, 2013. 38 diapositivas.

MENDOZA PASTO, Bertha Sol Ángel. “Análisis mecánico y de riesgos para la implementación de la técnica de estimulación fracturamiento con gas a alta energía (HEGF) en pozos colombianos”, Colombia. Universidad Industrial de Santander; Facultad de Ingenierías físico-químicas, 2012.

MENDOZA, Sol Angel. Análisis geomecánico y de riesgos para la implementación de la técnica fracturamiento con gas a alta energía (HEGF) en pozos colombianos. 2010. [Online]. Tomado de: http://www.wellborestability.org/files/fase/2/2/user_55_relacion_105_fase_2_2010-10-09.pdf

M. JULIVERT. Léxico Estratigráfico. Paris: Centre national de la recherche scientifique, 1968.

MONTILLA, Rosa. Curso completación de pozos. 2015. [Online]. Tomado de: <http://www.slideshare.net/RosaMontilla3/curso-completacin-de-pozos-55658028>

MORA, Miguel Antonio. Determinación de la eficiencia de los inhibidores base amina y base silicato para la perforación de la sección 8 1/2 de un pozo en el campo Velásquez en la cuenca Valle Medio del Magdalena. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.

PALACIOS, Estefanía y Ramos, Paola Andrea. Implementación del diseño de un pozo estratigráfico y su evaluación financiera en el bloque Talora de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena integrando información de nuevas tecnologías de prospección. Trabajo de grado Ingenieros de Petróleos. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.

PARADA CISNEROS, Reyna Maribel. "Técnicas de disparos para optimizar la producción en la condición de operación bajo balance" México. Universidad Nacional Autónoma de México; Facultad de Ingeniería, 2013.

PÉREZ, Paula Andrea y Franco, Julián Andrés. Evaluación técnica y financiera por simulación numérica del proceso de inyección cíclica de dióxido de carbono en el campo Acaé-San Miguel de la cuenca del Putumayo. Trabajo de grado Ingenieros de Petróleos. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.

PETROBLOGGER. Acidificación de Pozos. [en línea]. Tomado de: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/acidificacion-de-pozos.html>. [citado el 21 de septiembre de 2016]

PIEDRAHITA RODRÍGUEZ, Jaime Alberto, et al. Cañoneos extremos incrementan la producción y capacidad de inyección de agua en la GEC. Bogotá D.C. Ecopetrol. 2013.

PORTER, W. L., & Satterwhite, B. Evaluation of Well Perforator Performance. Society of Petroleum Engineers. Estados Unidos. 1976.

PUERTA COLORADO, Carlos Alberto. Clasificación y Características de los Explosivos. Trabajo escrito. Bogotá D.C.: Escuela de Ingenieros Militares ESING. Facultad de Ingeniería. 2016.

RAHMAN, J. U., Allen, C., & Bhat, G. Second Generation Interval Control Valve (ICV) Improves Operational Efficiency and Inflow Performance in Intelligent Completions. Society of Petroleum Engineers. Estados Unidos. 2012.

REYES VIAMONTE, Sebastián Ramiro y ROSETE VEGA, Miguel Ángel. Análisis de Productividad en Pozos de Aceite y Gas Disuelto en Formaciones Carbonatadas para Diferentes Terminaciones. Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 2010. 82 p.

SCHLUMBERGER. Definición del concepto de fracturamiento hidráulico: Elementos del fracturamiento hidráulico. Oilfield Review, 2013. Vol 25, no.2.

SCHLUMBERGER. Fracturamiento con calanes de flujo abiertos: Una vía rápida para la producción. Oilfield Review, 2011.

SCHLUMBERGER. Manual de completación. 2003. [Online] Tomado de: <http://www.elrinconpetrolero.blogspot.com.co/2010/02/completacion-y-reacondicionamiento-de.html>

SCHLUMBERGER. Oilfield Glossary. [Online]. Tomado de: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>

SCHLUMBERGER. Operación de disparos cuando la falla es el objetivo. 2009. [Online]. Tomado de https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish09/win09/01_operaciones_disparos.pdf

SCHLUMBERGER. Perforating Services Catalog 2008. Pdf.

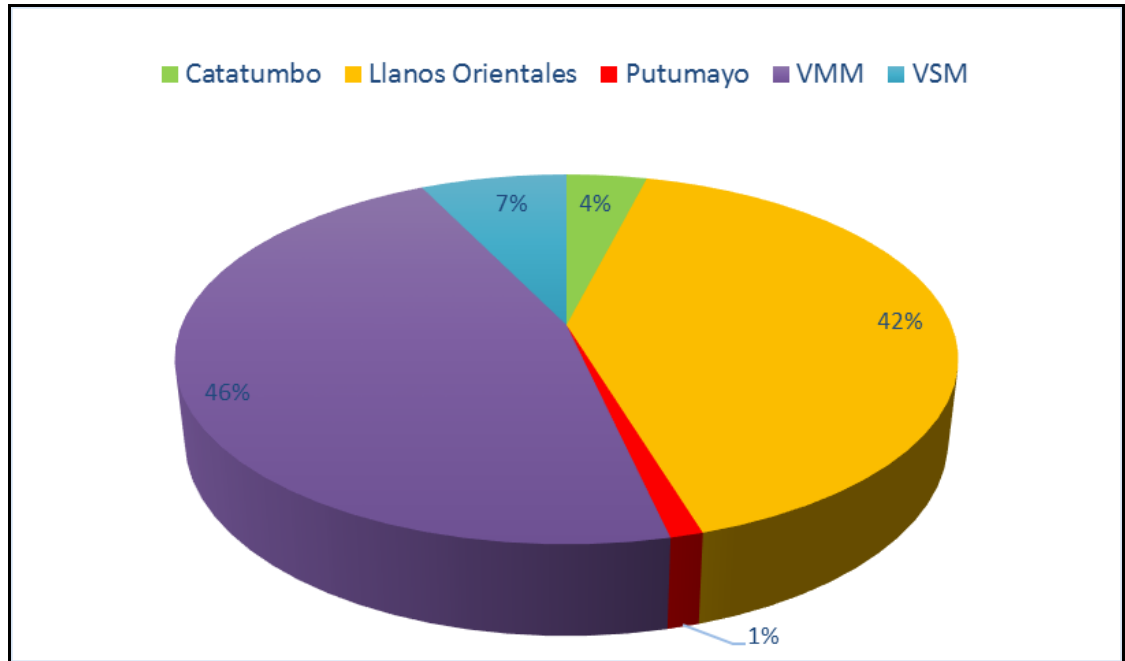
SMITHSON, Tony, (s.f). Detonación para inducir el flujo de fluidos. (vol. 24, no. 1). [Online]. Tomado de http://www.slb.com/~media/files/resources/oilfields_review/spanish12/spr12/defining_perforating.pdf

VERGARA LARA, Gabriel. La técnica del árbol para la toma de decisiones [diapositivas]. Valle: Tuluá, 2008. 19 diapositivas.


WEEKS, S. G. Formation Damage or Limited Perforating Penetration? Test-Well Shooting May Give a Clue. Society of Petroleum Engineers. Misisipi, Estados Unidos. 1974.

ANEXOS

ANEXO A
REPRESENTACIÓN DE POZOS CAÑONEADOS ENTRE LOS AÑOS 2005-2015,
EN LAS CUENCAS PRODUCTORAS DE COLOMBIA DONDE OPERA
ECOPETROL S.A.



Fuente: Ecopetrol S.A., obtenido a través de DataAnalyzer® y Openwells®. [Consultado en marzo de 2016]. Modificado por los autores.

| | | |
|--|--|--------------|
|  Fundación Universidad de América | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotros Savieth Aceros García y Juan Camilo Sarmiento Moncaleano en calidad de titulares de la obra Diseño del módulo de selección de conectividad para el manual general de completamiento de pozos de Ecopetrol S.A., elaborada en el año 2016 , autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor(es) manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor(es) establezco (establecemos) las siguientes condiciones de uso de mi (nuestra) obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

| | | |
|--|--|--------------|
|  Fundación Universidad de América | FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA | Código: |
| | PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA | Versión 0 |
| | Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres | Julio - 2016 |

| | | |
|---|--|-------------------------------------|
|  | Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor. | <input type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor. | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma. | <input type="checkbox"/> |

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su(s) autor(es).

De igual forma como autor (es) autorizo (amos) la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:


| AUTORIZO (AUTORIZAMOS) | SI | NO |
|---|-------------------------------------|--------------------------|
| La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

| Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso. | SI | NO |
|---|--------------------------|-------------------------------------|
| | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |


Para constancia se firma el presente documento en (Bogotá), a los 9 días del mes de marzo del año 2017.

EL(LOS) AUTOR(ES):

Autor 1

| | |
|---------------------------------------|--|
| Nombres | Apellidos |
| Savieth | Aceros García |
| Documento de identificación No | Firma |
| 1019093816 |  |

Autor 2

| | |
|---------------------------------------|--|
| Nombres | Apellidos |
| Juan Camilo | Sarmiento Moncaleano |
| Documento de identificación No | Firma |
| 1022390860 |  |

Nota: Incluya un apartado (copie y pegue el cuadro anterior), para los datos y la firma de cada uno de los autores de la obra.