

LA CIRA-INFANTAS



Una oportunidad para crecer



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO Y VIDA ÚTIL DE LAS VARILLAS EN LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL TIPO PCP Y BOMBEO MECÁNICO EN EL CAMPO LA CIRA-INFANTAS

LELIS AYLIM MALDONADO PEREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA

2012

LA CIRA-INFANTAS



Una oportunidad para crecer



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO Y VIDA ÚTIL DE LAS VARILLAS EN LOS
SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL TIPO PCP Y BOMBEO MECÁNICO EN
EL CAMPO LA CIRA-INFANTAS**

LELIS AYLIM MALDONADO PEREZ

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniera de
Petróleos.

Director

Msc. FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZALEZ

Codirector

HECTOR MIGUEL QUIROS GUALTEROS

Ingeniero ALS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO – QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A Dios por haberme brindado la fuerza y sabiduría necesaria para culminar esta etapa de mi vida y haberme bendecido con tan maravillosas experiencias.

*A mis padres, **LELIS ROSALBA PEREZ CRUZ** y **EDGAR MALDONADO RODRIGUEZ**, gracias por todo su apoyo incondicional, su amor sin medida y su constante preocupación, porque aunque tropezara siempre contaba con sus sonrisas y sus manos extendidas para ayudarme a levantar y seguir adelante. Gracias a ustedes hoy soy quien soy y estoy muy orgullosa de ser su hija. A mi mami, por siempre ser mi amiga y siempre tener las palabras exactas cuando más lo necesito. A mi papi, porque su comprensión y cariño nunca me han abandonado y a pesar de la distancia y el tiempo siempre seguiré siendo su muñequita.*

Al Gordiño y a la Tontis, mis hermanitos, quienes a pesar de las adversidades siempre tienen una sonrisa para compartir conmigo y sus palabras y ánimos me dan la fuerza para siempre seguir adelante y ser un buen modelo a seguir para ellos.

A toda mi familia, en especial mis tías, por siempre estar pendientes de mí, y porque siempre tenían un lugarcito para mí en todas sus oraciones.

A todos los 2050's porque hicieron de mi experiencia universitaria lo mejor, las rumbas, las sesiones de estudio, las reuniones y celebraciones, y todos aquellos momentos que pasamos juntos los voy a llevar siempre en mi corazón.

LELIS AYLIM MALDONADO PEREZ

AGRADECIMIENTOS

A Occidental Andina LLC por permitirme desarrollar este proyecto en sus instalaciones, bajo la supervisión y constante apoyo de brillantes ingenieros.

Al Ingeniero Juan Carlos Trujillo, por brindarme esta oportunidad única y la confianza necesaria para compartir su sabiduría y experiencia conmigo

Al Ingeniero Hector Miguel Quiros, por su constante apoyo, su inmensa paciencia y disposición para dirigirme y enseñarme lo necesario para desarrollar este proyecto.

Al Ingeniero Fernando Enrique Calvete, por toda su ayuda e incondicional apoyo para llevar a cabo todos los objetivos propuestos y su compromiso para el desarrollo de este mismo.

A Jahir Gutierrez, por quien todo esto fue posible; por acompañarme y ayudarme durante todo el desarrollo del proyecto. Gracias por tu amistad y constante apoyo Jahirsiviris.

A todo el equipo de La Cira – Infantas Bogotá, por haberme hecho sentir como una parte más y haber hecho que mi tiempo en la empresa fuera inolvidable.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. GENERALIDADES DEL CAMPO LA CIRA – INFANTAS	20
1.1. LOCALIZACION DEL CAMPO	20
1.2. RESEÑA HISTORICA DEL CAMPO LA CIRA – INFANTAS	22
1.3. ESTRATIGRAFIA	29
1.3.1. Formación Mugrosa	29
1.3.2. Formación Colorado	30
1.4. MODELO ESTRUCTURAL	31
1.5. PROPIEDADES DEL YACIMIENTO	35
2. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL CAMPO LA CIRA - INFANTAS QUE USAN SARTA DE VARILLAS	39
2.1. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON VARILLAS	39
2.1.1. Bombeo Mecánico	40
2.1.2. Bombeo por Cavidades Progresivas	44
3. LA SARTA DE VARILLAS EN SISTEMAS DE BOMBEO	50
3.1. TIPOS DE VARILLAS	52
3.1.1. Varillas Convencionales	52
3.1.2. Varillas No Convencionales	55
3.1.3. <i>Pony Rods</i>	61
3.1.4. <i>Sinker Bars</i> o Barras de Peso	61
3.1.5. <i>Couplings</i> o Acoples	63

3.1.6. Centralizadores	65
3.2. FALLAS POR SARTA DE VARILLAS	65
3.2.1. Fallas Mecánicas	67
3.2.2. Fallas por Corrosión	72
4. REVISION DE REPORTES Y CREACION DE LAS BASES DE DATOS	76
4.1. RECOPIACION DE DATOS DE LAS SARTAS DE VARILLAS	76
4.2. RECOPIACION DE LA INFORMACION DE FALLAS POR VARILLA PARA LOS POZOS DEL CAMPO	81
4.2.1. Construcción de la Base de Datos de Pozos con Primeras, Segundas y Terceras Falla	83
4.2.2. Construcción de la Base de Datos Histórica de las Fallas Totales del Campo La Cira – Infantas.	86
5. DESARROLLO DEL ANALISIS ESTADISTICO	87
5.1. ANALISIS DE LAS PRIMERAS, SEGUNDAS Y TERCERAS FALLAS	87
5.1.1. Análisis por Zona	97
5.1.2. Análisis por Razón de Falla	107
5.1.3. Análisis por Año de Falla	111
5.1.4. Análisis por Diámetro y Grado de Varilla Fallada	114
5.2. ANALISIS DE LAS FALLAS TOTALES DEL CAMPO	116
5.2.1. Análisis por Zona	118
5.2.2. Análisis por Razón de Falla	122
5.2.3. Análisis por Año de Falla	124
5.2.4. Analisis por Diámetro y Grado de Varilla Fallada	125
5.2.5. Análisis por Rango de <i>Runlife</i> y Rango de Caudales	128

5.2.6. Análisis por Sistema de Levantamiento	131
5.3. TABLAS RESUMEN	136
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFIA	144

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Geográfica del Campo La Cira – Infantas.	21
Figura 2. Grafica de Producción Histórica del Campo La Cira – Infantas.	28
Figura 3. Columna Estratigráfica General para la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.	31
Figura 4. Modelo Estructural Actual para el Campo La Cira – Infantas.	33
Figura 5. Sección Sísmica, Orientada Este – Oeste, a través de la Estructura La Cira.	34
Figura 6. Sección Sísmica a través de Infantas.	34
Figura 7. Propiedades de Yacimiento del Área de La Cira – Infantas.	37
Figura 8. Ciclo de Bombeo.	42
Figura 9. Sistema de Bombeo Mecánico	45
Figura 10. Sección Transversal de una PCP.	47
Figura 11. Componentes de Subsuelo de una PCP.	49
Figura 12. Varillas de Acero.	51
Figura 13. Carrete de Transporte y Almacenamiento de Varilla Continua.	58
Figura 14. PCPRod [®] 1000, PCPRod [®] 1500 y PCPRod [®] 2500.	60
Figura 15. Terminaciones Típicas de las Varillas.	63
Figura 16. Acople tipo Hembra – Hembra para Varillas.	64
Figura 17. Corte Transversal de un <i>Subcoupling</i> .	64

Figura 18. Tipos de Centralizadores usados en La Cira – Infantas.	66
Figura 19. Descripción de una Falla por Tensión.	69
Figura 20. Descripción de una Falla por Fatiga.	70
Figura 21. Ejemplo Real de una Falla por Fatiga.	71
Figura 22. Mapa de Corrosión por H ₂ S para el Campo La Cira – Infantas.	73
Figura 23. Ventana de <i>Data Analyzer</i> con el filtro.	78
Figura 24. Grafica de <i>Runlife</i> para las Primeras Fallas.	89
Figura 25. Grafica de <i>Runlife</i> para las Primeras Fallas Censurado.	90
Figura 26. Grafica de <i>Runlife</i> para el Total de Segundas Fallas.	91
Figura 27. Grafica de <i>Runlife</i> para Segundas Fallas Censurado.	92
Figura 28. Grafica de <i>Runlife</i> para el Total de Terceras Fallas.	93
Figura 29. Grafica de <i>Runlife</i> para Terceras Fallas Censurado.	94
Figura 30. Grafica de <i>Runtime</i> para Pozos <i>Running</i> .	95
Figura 31. Grafica de <i>Runtime</i> para Pozos con Sarta Cambiada.	96
Figura 32. Distribución de Primeras Fallas para cada Zona.	97
Figura 33. Distribución de Segundas Fallas para cada Zona.	98
Figura 34. Distribución de Terceras Fallas para cada Zona.	98
Figura 35. Distribución de Primeras, Segundas y Terceras Fallas por Zona con <i>Runlife</i> Promedio.	99
Figura 36. Distribución de Primeras, Segundas y Terceras Fallas por Zona con Caudales Promedio.	101

Figura 37. Distribución de Pozos <i>Running</i> y con Sarta Cambiada por Zona.	102
Figura 38. Comparación de <i>Runlife (Runtime)</i> para Pozos <i>Running</i> y Pozos Fallados.	103
Figura 39. Comparación de Caudales para Pozos <i>Running</i> y Pozos Fallados.	104
Figura 40. Comparación de <i>Runlife (Runtime)</i> para Pozos con Sarta Cambiada y Pozos Fallados.	105
Figura 41. Comparación de Caudales para Pozos con Sarta Cambiada y Pozos Fallados.	106
Figura 42. Distribución de Razones para Primeras Fallas.	107
Figura 43. Distribución de Razones para Segundas Fallas.	107
Figura 44. Distribución de Razones para Terceras Fallas.	108
Figura 45. Distribución de Razones para Primeras, Segundas y Terceras Fallas con <i>Runlife</i> .	109
Figura 46. Distribución de Razones para Primeras, Segundas y Terceras Fallas con Caudales.	110
Figura 47. Distribución por Años de Falla con <i>Runlife</i> .	111
Figura 48. Pozos <i>Running</i> y con Sarta Cambiada por Año de Completamiento (<i>Runtime</i>).	112
Figura 49. Pozos <i>Running</i> y con Sarta Cambiada por Año de Completamiento (Caudales).	113

Figura 50. Distribución Diámetros de Primeras, Segundas y Terceras Fallas.	114
Figura 51. Distribución Grados de Primeras, Segundas y Terceras Fallas.	115
Figura 52. Grafica de <i>Runlife</i> para Fallas Totales del Campo.	116
Figura 53. Grafica de <i>Runlife</i> para Fallas Totales del Campo Censurada.	117
Figura 54. Distribución de Fallas por Zona.	118
Figura 55. Distribución por Año para la Zona CIRA EAST.	119
Figura 56. Distribución por Año para la Zona CIRA NORTH.	119
Figura 57. Distribución por Año para la Zona CIRA SOUTH.	120
Figura 58. Distribución por Año para la Zona INFANTAS NORTH.	120
Figura 59. Distribución por Año para la Zona INFANTAS CENTRAL.	121
Figura 60. Distribución por Año para la Zona INFANTAS SOUTH.	121
Figura 61. Distribución de Razones para Fallas Totales.	122
Figura 62. <i>Runlife</i> y Caudales por Zona y Razón de Falla.	123
Figura 63. <i>Runlife</i> y Razones de Falla para cada Año.	125
Figura 64. Distribución de Diámetros para el Total de Fallas del Campo.	126
Figura 65. Distribución de Grados para el Total de Fallas del Campo.	126
Figura 66. Razones de Falla para los 3 Diámetros con Mayor Número de Fallas.	127

Figura 67. Razones de Falla para los 3 Grados con Mayor Número de Fallas.	128
Figura 68. Distribución Caudales para Rangos Definidos de <i>Runlife</i> y Razones de Falla.	129
Figura 69. Distribución <i>Runlife</i> para Rangos Definidos de Caudales y Razones de Falla.	130
Figura 70. Distribución de Fallas para cada Sistema de Levantamiento.	131
Figura 71. Distribución de Fallas por Rango de <i>Runlife</i> para BM y PCP.	132
Figura 72. Distribución de Fallas para PCP por Año y Razón.	133
Figura 73. Distribución de Fallas para BM por Año y Razón.	134
Figura 74. Comparación de <i>Runlife</i> entre BM y PCP.	135
Figura 75. Comparación de Caudales entre BM y PCP.	135

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de Yacimiento del Área de La Cira – Infantas.	36
Tabla 2. Propiedades del Fluido del Área La Cira – Infantas.	36
Tabla 3. Reservas Estimadas del Área de la Cira – Infantas.	38
Tabla 4. Composición Química de las varillas de Acero.	53
Tabla 5. Propiedades Mecánicas de Fuerza de las Varillas de Acero.	53
Tabla 6. Composición de Varillas para cada Fabricante.	54
Tabla 7. Tipos y Propiedades de Varillas Continuas del Mercado.	56
Tabla 8. Diámetros y Torque Máximo para cada Tipo de Varilla Continua.	57
Tabla 9. Tipos y Propiedades de Varillas Huecas del Mercado.	60
Tabla 10. Propiedades Físicas de las Barras de Peso.	62
Tabla 11. Distribución de Grados de Varillas Instaladas en Completamientos Iniciales y Reactivaciones en el campo La Cira – Infantas.	79
Tabla 12. Distribución de Diámetros de Varillas Instaladas en Completamientos Iniciales y Reactivaciones en el campo La Cira – Infantas.	80
Tabla 13. Promedios de <i>Runtime</i> para Pozos <i>Running</i> y con Sarta Cambiada	136
Tabla 14. Promedios de Caudales para los Pozos <i>Running</i> y con Sarta Cambiada	137
Tabla 15. Promedios de <i>Runlife</i> para Primeras Fallas de los Pozos del Proyecto	137

Tabla 16. Promedios de <i>Runlife</i> para Segundas Fallas de los Pozos del Proyecto	138
Tabla 17. Promedios de <i>Runlife</i> para Terceras Fallas de los Pozos del Proyecto	138
Tabla 18. Promedios de Caudales para Primeras Fallas de los Pozos del Proyecto	139
Tabla 19. Promedios de Caudales para Segundas Fallas de los Pozos del Proyecto	139
Tabla 20. Promedios de Caudales para Terceras Fallas de los Pozos del Proyecto	140
Tabla 21. Promedios de <i>Runlife</i> y Caudales para Fallas Totales del Campo	140

RESUMEN

TITULO: ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y VIDA UTIL DE LAS VARILLAS EN LOS SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL TIPO PCP Y BOMBEO MECANICO EN EL CAMPO LA CIRA – INFANTAS *.

AUTORA: LELIS AYLIM MALDONADO PEREZ **

PALABRAS CLAVE: Sarta de Varillas, Sistema de Levantamiento Artificial, Bombeo Mecánico, Bombeo por Cavidades Progresivas, *Runlife*, La Cira – Infantas.

Siendo el campo La Cira – Infantas un campo maduro que se encuentra en etapa de recuperación secundaria, como la inyección de agua; sus métodos de producción son sistemas de levantamiento los cuales incluyen en su configuración una sarta de varillas, la cual sirve como conexión entre superficie y las bombas o rotores de fondo (dependiendo del sistema). El 54,6% de los pozos activos del campo son desviados y algunas zonas presentan corrosión por presencia de H₂S en aumento, como consecuencia de la inyección de agua. Por esta y otras razones, los sistemas de levantamiento artificial presentes en La Cira – Infantas y por supuesto, sus sartas de varillas, se encuentran expuestas a diferentes ambientes que aceleran y facilitan las fallas.

Este proyecto tiene como objetivo determinar un promedio aproximado de vida útil de las varillas, para esto, se analizarán los reportes de falla por varilla del campo para cada pozo, con el fin de recolectar la información de las varillas que fallaron, para identificar las principales razones de falla e implementar mejoras en las inspecciones realizadas en campo como también incluir nuevas tecnologías, todo esto con el fin de disminuir el índice de fallas e incrementar el *Runlife* actual de las varillas.

La estadística se dividirá en dos etapas, realizando diferentes análisis y agrupando las fallas en diferentes clasificaciones que permitan tener una mejor descripción y un acercamiento más certero de la información recolectada. Al final del proyecto se implementarán los resultados obtenidos inmediatamente en campo.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Msc. Fernando Enrique Calvete Gonzales, Codirector: Ing. Hector Miguel Quiros Gualteros.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE BEHAVIOR AND RUNLIFE FOR THE ROD STRING IN THE ARTIFICIAL LIFT SYSTEMS PCP AND BEAM PUMP FOR LA CIRA – INFANTAS FIELD*.

AUTHOR: LELIS AYLIM MALDONADO PEREZ **

KEYWORDS: Rod String, Artificial Lift System, Beam Pump, Progressive Cavity Pump, Run life, La Cira – Infantas.

Being La Cira – Infantas a mature field which is on its secondary recovery stage, by water injection; its production systems are artificial lift methods like Beam Pumping and Progressive Cavity Pumping; these including a rod string in its configuration, which helps to connect the pumps or rotors (according to the system) at the bottom of the well with the surface equipment. The 54,6% of the active wells in this field are deviated and some areas presents corrosion by H_2S , which it has been increasing, as a consequence for the water injection; because of these and many other reasons, the artificial lift systems and their rod strings installed in La Cira – Infantas field are exposed, causing the rod string to fail.

The objective for this project is to calculate an approximate Runlife for the rod string, by analyzing the fail reports made for the rod string on field for each well, this is made to acquire all the rod fail's information which will help to identify the main reasons of failure and implement the necessary improvements on the inspections made on the field and also to implement the new technologies, and at the end, reducing the failure index an incrementing the current Runlife for the rod string.

The statistic will be divided in two stages, developing different analysis and putting together the failures in several categories that will help to have a better description and a most accurate approach for the information that it was found. At the end of this project, the results will be implemented immediately on the field.

*Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School. Director: Msc. Fernando Enrique Calvete Gonzales, Codirector: Eng. Hector Miguel Quiros Gualteros.

INTRODUCCION

El campo La Cira – Infantas, es un campo maduro actualmente en la etapa de recuperación secundaria a través del proceso de inyección de agua, donde se usan los sistemas por Bombeo Mecánico (BM), Bombeo por Cavidades Progresivas (PCP), Bombeo Electrosumergible (ESP) y Bombeo por Cavidades Progresivas Electrosumergible (ESP-PCP) para la producción de crudo; Y para los sistemas por Bombeo Mecánico y por Cavidades Progresivas, una sarta de varillas de bombeo sirve como conexión entre superficie y las bombas y rotores de fondo, siendo esta razón una de las principales causas de falla en los pozos de este campo las cuales se encuentran relacionadas con la ruptura de varillas. Adicional a esto, encontramos factores propios del campo que contribuyen a la aceleración del proceso de fallas, como corrosión y producción de arena asociada a la pega de las bombas; además de esto, el 54% de los pozos activos del campo tienen registro de desviación (Sin contar los pozos de los cuales se sospechan desviados, pero no se tiene registro de esto), contribuyendo a un mayor fallamiento por rozamiento. Debido a esto, la empresa Occidental Andina LLC, actualmente Socia del campo La Cira – Infantas (en contrato de Colaboración empresarial con Ecopetrol S.A), se vio en la necesidad de llevar a cabo el estudio que determinara un aproximado del tiempo de vida útil de las varillas (Runlife). En este trabajo se hará una recopilación de todos los reportes de fallas por varillas en el campo desde el comienzo del año 2006 hasta finales del año 2011, y se realizara un análisis estadístico, con el fin de determinar las principales causas de falla en el campo (por varilla) y aproximar un valor estimado de tiempo vida útil (Runlife) para las varillas usadas en bombeo mecánico y por cavidades progresivas, los cuales son los principales sistemas de levantamiento del campo; con el fin de reducir el número de intervenciones por falla de varilla, al determinar su tiempo máximo de uso antes de causar alguna falla.

1. GENERALIDADES DEL CAMPO LA CIRA – INFANTAS

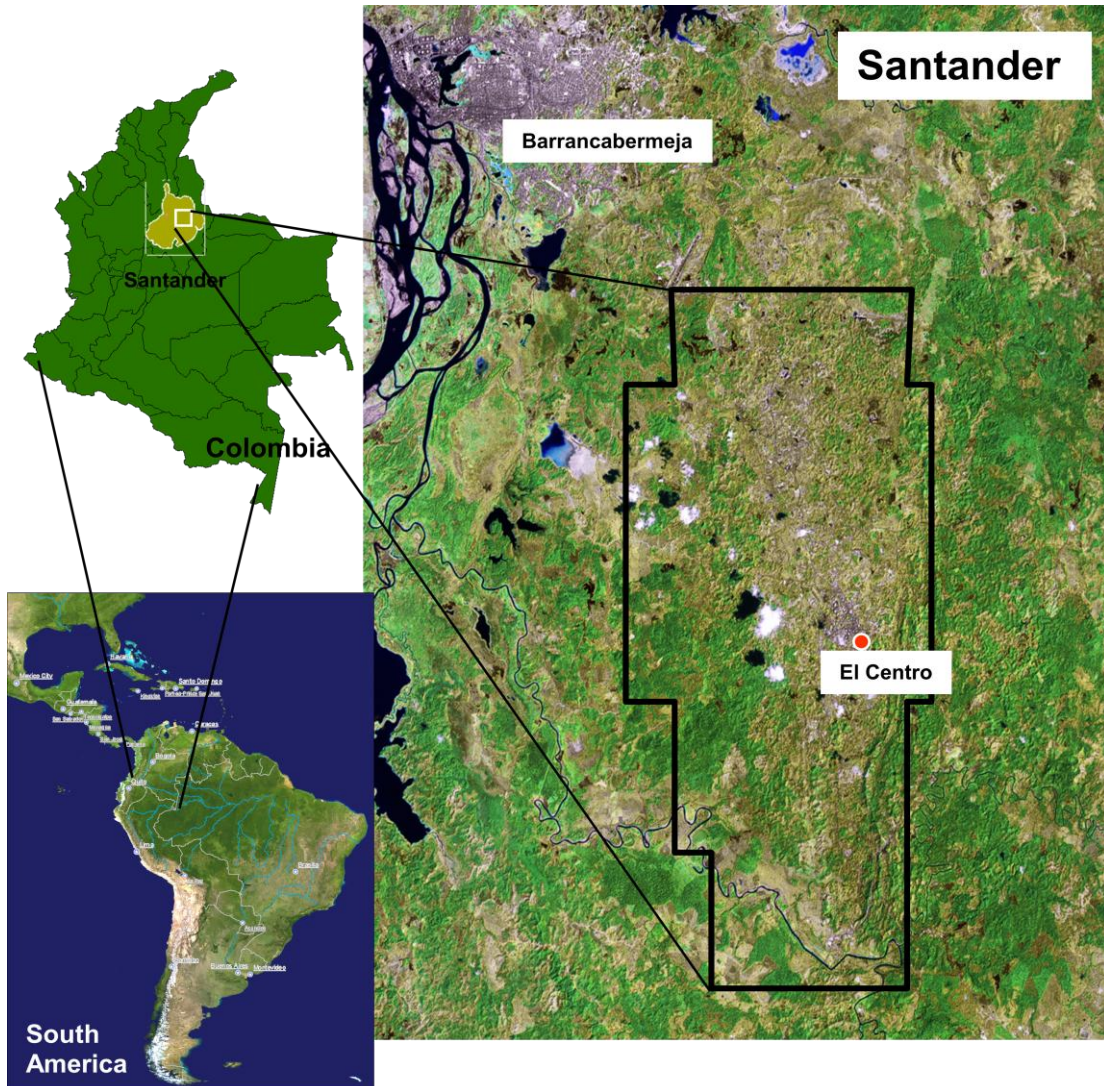
1.1. LOCALIZACION DEL CAMPO

El campo La Cira – Infantas se encuentra ubicado en la parte central de la antigua Concesión de Mares, en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), al este del río Magdalena y al Sur del río Sogamoso, en el corregimiento del El Centro, departamento de Santander, Colombia, América del Sur; a una distancia aproximada de 22 Km al Sureste de la ciudad de Barrancabermeja y a 250 Km al Noroeste de Bogotá DC, a 7° 04' N, 73° 47' 47 W (Figura 1.). El campo abarca un área de aproximadamente 160 Km². En la Figura 1 se observa un mapa de ubicación del campo.

Infantas corresponde a un anticlinal fallado y La Cira es un domo fallado al Noreste de Infantas. Ambos inicialmente eran considerados como dos campos diferentes pero que estaban contiguos y producían de las mismas formaciones geológicas.

Geológicamente el campo se encuentra situado en el valle medio del Magdalena sobre sedimentos Terciarios transportados por el río Magdalena, que descansan sobre el material Cretácico predominantemente marino. El Valle del río Magdalena es definido hacia el este y oeste, limitado por la cordillera occidental y la cordillera oriental. Las mismas series de rocas sedimentarias son encontradas en ambos campos, aunque Infantas ha sufrido un levantamiento mayor y una mayor erosión que La Cira.

Figura 1. Localización Geográfica del Campo La Cira – Infantas.



FUENTE: Peer Review La Cira – Infantas, Presentación de Power Point, Agosto 23, 2010. Occidental de Colombia.

Hay muchos campos petroleros más pequeños que se encuentran en las cercanías de La Cira – Infantas, notablemente el campo Casabe a 20 Km al

Oeste y Provincia a 65 Km al Norte. Estos campos producen crudos similares de los mismos intervalos geológicos.

1.2. RESEÑA HISTORICA DEL CAMPO LA CIRA – INFANTAS.

La historia del campo La Cira – Infantas se remonta a la concesión de Mares. En 1903, José Joaquín Bohórquez llegó a Barrancabermeja, que en ese entonces correspondía a un puerto ribereño, en el cual diversos productos eran traídos al puerto desde diversas ciudades en un viaje a través de caminos por la jungla para que estos fueran cargados dentro de los botes en el puerto. Bohórquez empezó una pequeña compañía de transporte, en la cual transportaba café, caucho y vegetales, que eran muy abundantes en el bosque tropical que cubre el Valle Medio del Magdalena (VMM). El clima era húmedo y cálido.

Bohórquez tomó muestras del crudo, las cuales las llevó a Barranquilla y Cartagena, sin embargo no hubo mucho interés allí por estas muestras. Roberto de Mares vio las muestras y fue a Barrancabermeja a investigar aún mejor la procedencia de las mismas; por lo cual, terminó constituyendo una unión con Bohórquez, y le propuso formar una concesión para explotar el crudo, hasta el punto que en 1905 Bohórquez fue sacado de esta concesión, y solo quedó con una pequeña pensión dada por el gobierno de la época en 1939.

El área de la concesión es de 5120 Km², y no era conocida completamente hasta 1928 que fue inspeccionada por la *Tropical Oil Company*.

El contrato requería que los trabajos fueran empezados en 18 meses, pero este requerimiento fue extendido varias veces, debido también a que el área poseía una vegetación muy espesa, las vías de acceso eran complicadas y también el lugar se encontraba plagado de malaria; lo cual harían que traer equipos desde los Estados Unidos, tardara meses, e hizo que la concesión no se aprobara hasta el 20 de Junio de 1919.

Aunque el gobierno no había aprobado aun la transferencia de la concesión a la *Tropical Oil Company*, ellos procedieron con el desarrollo. El pozo del descubrimiento fue el Infantas #2 que fue perforado el 12 de Diciembre de 1917, 2 Km al Norte de Infantas #1. Esto hizo que en Colombia se viera mucho interés de compañías petroleras por posibilidades de extraer petróleo, lo cual para finales del 1919, alrededor de 10 compañías hubieran tomado concesiones.

Los años 1920 a 1924 fueron invertidos en la preparación del campo, con casas, salones, hasta un hospital fue construido en Infantas, también fue construida una carretera hasta Barrancabermeja para transportar sus camiones. Fue traído también el equipo de perforación; el cual comenzó a operar en 1921. En el año 1924 eran 17 pozos los que se encontraban produciendo, y se dieron cuenta que las herramientas rotativas eran mucho más económicas que las herramientas de cable. Para finales de 1926, cuando la tubería de transporte había sido terminada; ya existían 171 pozos produciendo.

En la época era evidente que el campo poco a poco se iba a extender hacia el norte de infantas, por lo que decidieron trasladar el campamento y tiendas

hasta El Centro, 8 Km al norte de infantas, y así convertido en el lugar de control de Operaciones del Campo. También fue construida una vía férrea hasta Barrancabermeja; lo cual hizo que se convirtiera en el medio de transporte principal, haciendo que la carretera se abandonara.

En 1925 se empezó la construcción de un oleoducto, el cual tenía un diámetro de 25,4 cm, con diez estaciones de bombeo, y que llegaba hasta la localidad de Mamonal cerca de Cartagena. Su capacidad inicial era de 30.000 BPD, y que fue incrementando a 50.000 BPD. Esta línea llamada “La Línea Andina”, fue reemplazada hasta 1985.

Durante los años 1922 a 1926 se construyeron diversas infraestructuras en El Centro, plantas generadoras y otras edificaciones. Para finales de 1927 se habían invertido \$23.251, pero los ingresos anuales eran de \$6.943.000.

Durante estos años, fue mapeada toda la geología de superficie de la concesión, que se encontraba toda cubierta por un bosque tropical, habitada por algunos indígenas. La Cira fue descubierta por *O. Wheeler* (Un geólogo que se encontraba en el área elaborando la cartografía de la concesión, el cual llegó a Colombia en 1921), cuando noto una falla que atravesaba el corte de la vía férrea. Al sur del Rio Colorado unos anticlinales fueron encontrados y perforados. Las formaciones Mugrosa y Colorado produjeron hidrocarburos livianos, que fueron considerados no comerciales en su momento.

La reversión de la concesión de Mares al gobierno Colombiano fue un evento históricamente muy notorio, caracterizado por una gran voluntad por ambas

partes, el gobierno y la compañía, con un muy marcado afecto por parte de Colombianos, Americanos y Canadienses. El contrato original entre el gobierno y la empresa había sido pactado para 30 años a partir del día que se empezaran los trabajos de extracción del crudo; siendo esta fecha fue pospuesta muchas veces, pero finalmente el 25 de agosto de 1951 a las 12 de la media noche en el club Internacional del Centro se firmo la reversión de este tratado, donde estuvieron el presidente de la *Tropical Oil Company*, el Ministro de Desarrollo, el Presidente de *International Petroleum Company*, y mucho otros dignatarios del área local, en donde todos los allí presentes que dieron sus discursos resaltaron que la mayor contribución a Colombia fue el entrenamiento a todos los ingenieros y mano de obra que opero el campo, con una pequeña asistencia de personal extranjero.

Seguido a la reversión de la concesión, hubo un declive en la producción del campo, hasta que en 1960, cuando la perforación de La Cira se aumento debido a la acción de recobros secundarios de algunos pozos por la inyección de agua. Algunos de los pozos antiguos perforados entre 1920 y 1930 se habían cerrado dejando dentro sus tuberías, y esto se debía a que para estos pozos que se habían perforado, no se había empleado aun la técnica de registros eléctricos, pues ya que después que se empezó a utilizar esta, eran localizadas estas arenas con registros *Gamma Ray*, y también algunas cañoneadas en diferentes lugares para hacer que estas produjeran de nuevo, aunque también a algunas se les aplico la técnica de inyección de agua. Así Ecopetrol mantuvo la producción a pesar de que el campo ya se encontraba totalmente perforado.

La columna estratigráfica en pozos de ambos campos, revela rocas que van desde el Pre-Cretácico a el Oligoceno; el Mioceno se encuentra presente en

algunos campos cercanos, y depósitos del <pleistoceno se ubican desigualmente sobre el Oligoceno al oeste de la Cira.

Debido a la magnitud de los levantamiento y a la truncación erosional de sus crestas, alrededor de 7000 pies o mas de sedimentos Terciarios, desde el Eoceno Superior hasta el Mioceno Inferior se encuentran expuestos en superficie.

Las rocas del terciario corresponden a la Formación Esmeralda – La Paz (Zona D) constituida de capas intercaladas de arena y arcilla. La parte inferior de la Formación Mugrosa (Zona C) consiste de areniscas de grano medio a fino, que su composición varia de subarcosa, arcosa a sublitoarenisca. La parte superior de la Formación Mugrosa (Zona B), consiste de intercalaciones de arenas muy finas de composición arcocosa a subarcocosa. La Formación Colorado (Zona A) está compuesta de areniscas de grano muy fino con intercalaciones de areniscas de grano medio, en la que su composición va de arcosa lítica a subarcosa.

Tanto en La Cira como en Infantas, inicialmente, la mayor parte de los pozos produjeron por flujo natural, posteriormente, se paso a un sistema de levantamiento por gas (*Gas Lift*) que fue desmontado en 1935 para dar paso al sistema de Bombeo Mecánico que se mantiene en la actualidad. En 1928, se inicia la inyección de gas en la zona C de la estructura Infantas, como sistema de mantenimiento de presión, siendo suspendida en 1970. Posteriormente, se continúa inyectando en forma esporádica hasta 1986 cuando se suspende definitivamente. En La Cira, se inicia la inyección de gas en la zona C en mayo de 1930, la cual se mantuvo con tasas variables

hasta los inicios de la recuperación secundaria. En La Cira, se inicia la inyección de gas en la zona C en mayo de 1930, la cual se mantiene con tasas variable hasta los inicios de recuperación secundaria.

En 1974, se realizó un ensayo piloto de inyección de vapor en el pozo INFA0152 sin éxito.

El campo ha estado en producción principalmente en las zonas A y B de La Cira, en las zonas B y C de Infantas y en la zona C de un sector de la parte alta de la estructura de La Cira. Secundariamente en el resto de la zona C de La Cira y en algunos pozos localizados en el sector norte de Infantas que han sido afectados por la inyección de agua en La Cira.

Ecopetrol continuó con el desarrollo del campo Galán, que es una extensión del campo Casabe, descubierto en 1942. Ecopetrol también asumió el desarrollo del campo Colorado, descubierto por la Tropical Oil Company en 1921, y el campo Lizama descubierto en 1937. Adicionalmente campos pequeños han sido descubiertos desde esos días pero que se encuentran en estructuras diferentes a la de La Cira – Infantas. La producción máxima del campo se obtuvo en 1940, con 62.000 BPD. Actualmente el campo tiene una producción de 32.000 BPD.

Figura 2. Grafica de Producción Histórica del Campo La Cira – Infantas.

FUENTE: Ecopetrol. Carta Petrolera N° 108. Abril-Mayo. El Regreso de La Cira. [En Línea]. Disponible en Internet: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera108/rev_produccion2.htm

Ecopetrol decidió darle nueva vida al campo después del 2003, lo que implicaba una gran inversión en tecnología que aumentara el factor de recobro del campo, lo que hizo que Ecopetrol invitara en julio de 2003 a un grupo de compañías de alto perfil y con reconocida experiencia mundial en este tipo de proyectos. Entre las ocho firmas invitadas estaban BP, Total, *Chevron-Texaco*, *Nexen*, *China National Oil Corporation* y *Occidental de Colombia*. Esta última empresa fue la seleccionada para suscribir un acuerdo de intención con el objetivo de analizar conjuntamente la viabilidad técnica y comercial de estructurar un proyecto de aplicación tecnológica y recobro incremental en el campo. Con el estudio se decidió si el proyecto era viable y por esta razón Occidental de Colombia, pactó un tratado con Ecopetrol, que por parte de Oxy, formó Occidental Andina LLC (*Limited Liability Company*), que lleva adelante el desarrollo de este proyecto La Cira – Infantas, pero este

convenio contemplo que Ecopetrol continuaría como operador de las actividades de producción del campo.

1.3. ESTRATIGRAFIA

Geológicamente el campo La Cira – Infantas está ubicado en la sección central de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, la cual fue un área de depositación de sedimentos no marinos y de agua salobre durante el terciario; estos sedimentos descansan discordantemente sobre los sedimentos marinos del Cretácico y algunas veces sobre rocas del basamento pre-Cretácico. La columna estratigráfica atravesada por los pozos perforados en el campo abarca rocas desde el pre-Cretácico hasta el Oligoceno; el Mioceno está presente en algunos campos vecinos, y los depósitos del Pleistoceno descansan discordantemente sobre el Oligoceno hacia el Occidente de La Cira. La Figura 3. presenta la columna estratigráfica generalizada para la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

En las siguientes líneas se muestra una breve descripción de las formaciones de interés en la columna del Valle Medio del Magdalena encontradas en los pozos del campo La Cira – Infantas complementada con la descripción que da *Dickey, Park. APG 1992* y *Ward et all, 1973*.

1.3.1. Formación Mugrosa

Se le ha asignado a la Formación Mugrosa una edad Oligoceno Inferior a Medio, verticalmente esta formación yace concordantemente sobre la Formación Esmeraldas. Consiste de areniscas depositadas en canales fluviales de sistemas de carga mixta y de fondo, depósitos

de “*overbank*”, y lodolitas depositadas en llanuras fluviales y paleolagos. En el área La Cira la Formación Mugrosa presenta un espesor aproximado de 1800 ft. La porosidad de esta Formación está entre el 15 al 20%.

Litológicamente se trata de una arenisca con matiz arcillosa bioperturbada, a pesar de esto se observan resumideros activos que emanan aceite y agua probablemente generados en la Formación La Luna.

1.3.2. Formación Colorado

Esta unidad se presenta como roca reservorio con buena porosidad entre el 15-20% y permeabilidades entre 20-600 md. Está compuesta por lodolitas tojas, grises y purpura, masivas, interestratificadas con areniscas de grano fino de *Point Bars*. El espesor promedio perforado para la Formación Colorado en el campo La Cira es de 1500 ft. En el área de La Cira – Infantas el ambiente de sedimentación para la Formación Colorado es de tipo fluvial meandriforme con una edad que abarca desde el Oligoceno Superior hasta Mioceno Inferior, presentando un contacto concordante con la infrayacente Formación Mugrosa. Al tope de esta formación se encuentra una unidad conocida como La Cira Shale, la cual está compuesta de *shales* carbonaceos, duros, ocasionalmente calcáreos con presencia de bivalvos de agua salobre y dulce, además con intercalaciones de delgados paquetes de arenisca de grano fino, que afloran en el flanco Noroeste del Anticlinal de La Cira.

Figura 3. Columna Estratigráfica General para la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

PERIODO	EPOCA	FORMACION	LITOLOGIA		
CUATERN.	PLEISTOCENO	MESA			
	PLIOCENO				
T E R C I A R I O	MIOCENO	REAL			
		COLORADO			
	OLIGOCENO	MUGROSA			
	EOCENO	ESMERALDAS			
		LA PAZ			
	PALEOCENO	DISCORDANCIA EOCENO-PALEOCENO			
	C R E T A C I C O	MAESTRICHTIANO	LISAMA		
		CAMPANIANO	UMIR		
		SANTONIANO	LA LU N A	GALEMBO	
		CONIACIANO		PUJAMANA	
TURONIANO		SALADA			
CENOMANIANO					
ALBIANO		SIMITI			
APTIANO		TABLAZO			
BARREMIANO		PAJA ROSABLANCA			
VALANGINIANO		TAMBOR			
JURASICO	GIRON				
PREMESOZOICO	BASAMENTO				

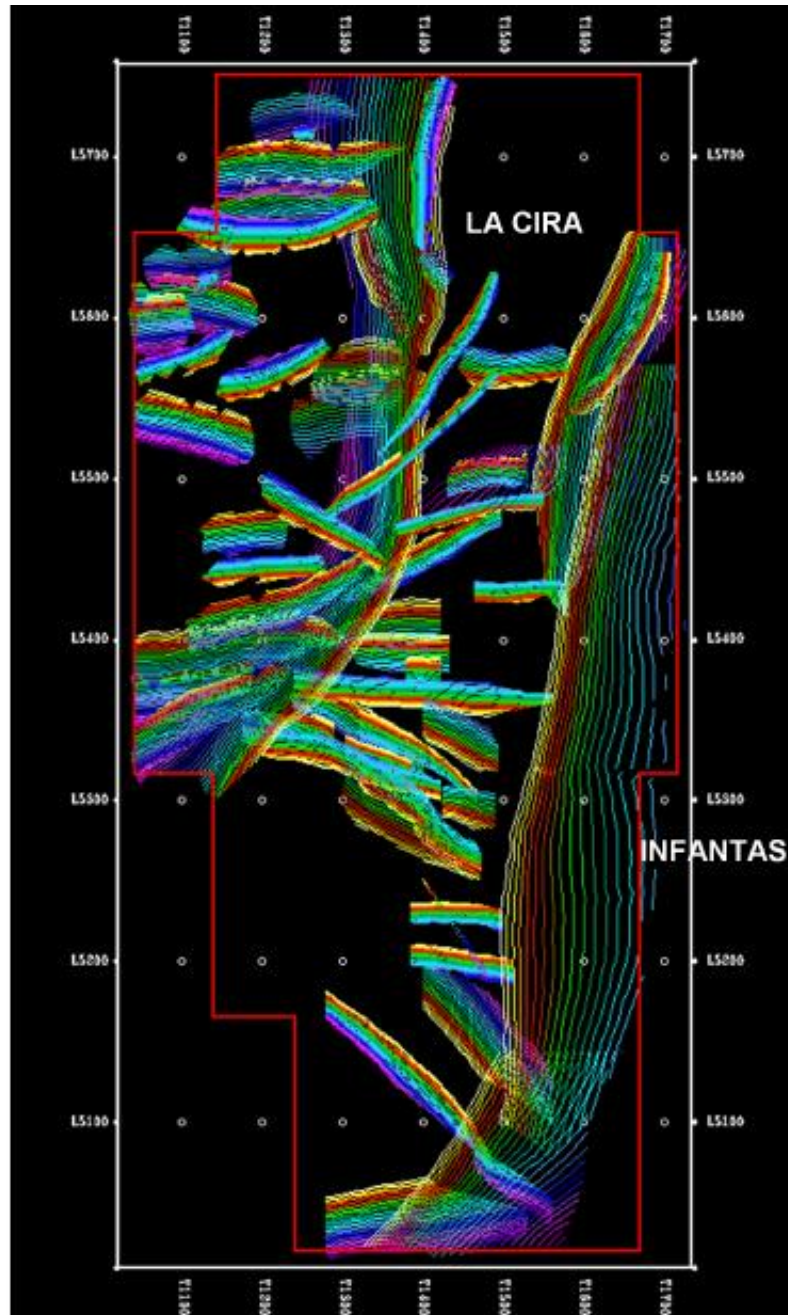
FUENTE: Evaluación Integrada de Yacimientos del campo La Cira – Infantas. División de Yacimientos GCO. Informe Técnico. Ecopetrol 2005

1.4. MODELO ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista estructural se puede establecer que el Campo La Cira – Infantas, en la secuencia Terciaria, está conformado por dos estructuras, una al norte, que es un anticlinal con cabeceo hacia al Norte,

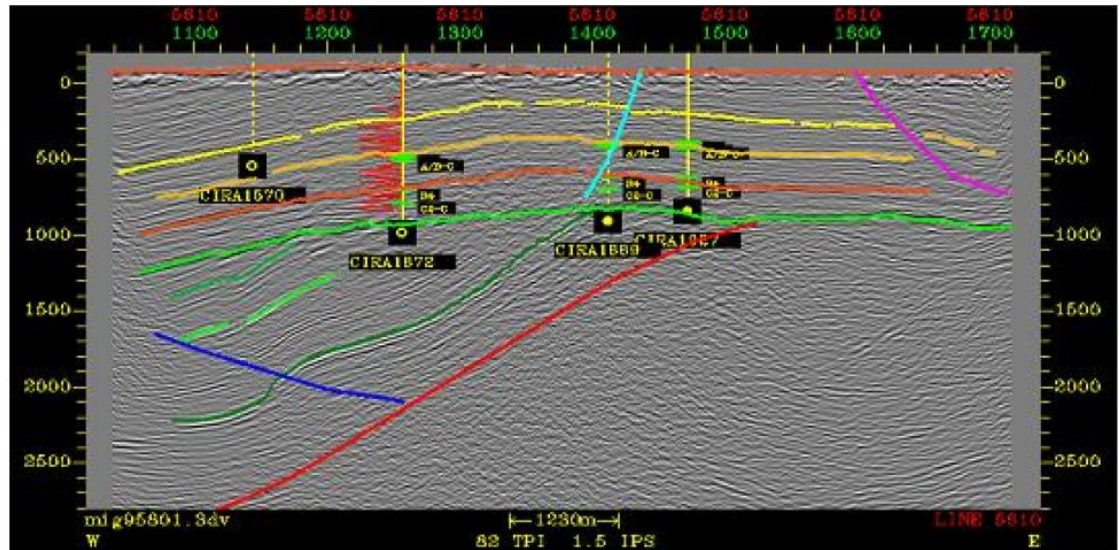
cortado en su eje por la falla de La Cira y con buzamientos suaves (10° a 15°), denominada la estructura de La Cira, y otra al Sur, denominada la Estructura Infantas, que es un anticlinal fallado inversamente en su flanco Oriental por la Falla de Infantas, más estrecho que el anterior y con buzamientos más inclinados (35° a 40°). Como características importantes es necesario resaltar que la Estructura Infantas se encuentra estructuralmente más alta que la Estructura La Cira, y en la primera esta erosionada la Zona A del yacimiento. Los principales rasgos estructurales del campo al nivel de la secuencia Terciaria, además de los pliegues anticlinales antes mencionados, son: La Falla de La Cira con rumbo Norte-Sur, buzamiento de 70° al Oeste y tiene un salto del orden de 200 ft, corta el Anticlinal de La Cira a lo largo de su eje, en los trabajos anteriores esta falla era denominada como plegamiento de *Wheeler*, y la Falla de Infantas con rumbo Norte-Sur, buzamiento de $50-60^\circ$ al Este y salto de hasta 700 ft, sirve de límite oriental al Campo La Cira – Infantas, existiendo además una serie de fallas transversales, casi perpendiculares a las anteriores que en muchos casos constituían los límites de las áreas operacionales y estadísticas del campo. La Figura 4 muestra el modelo estructural para la secuencia Terciaria, elaborado a partir de información geológica y geofísica.

En la Figura 5 se observa una sección sísmica, orientada Este – Oeste, a través del Campo La Cira, donde se muestran los principales rasgos estructurales. La Figura 6 muestra una sección sísmica a través del Campo Infantas.

Figura 4. Modelo Estructural Actual para el Campo La Cira – Infantas.

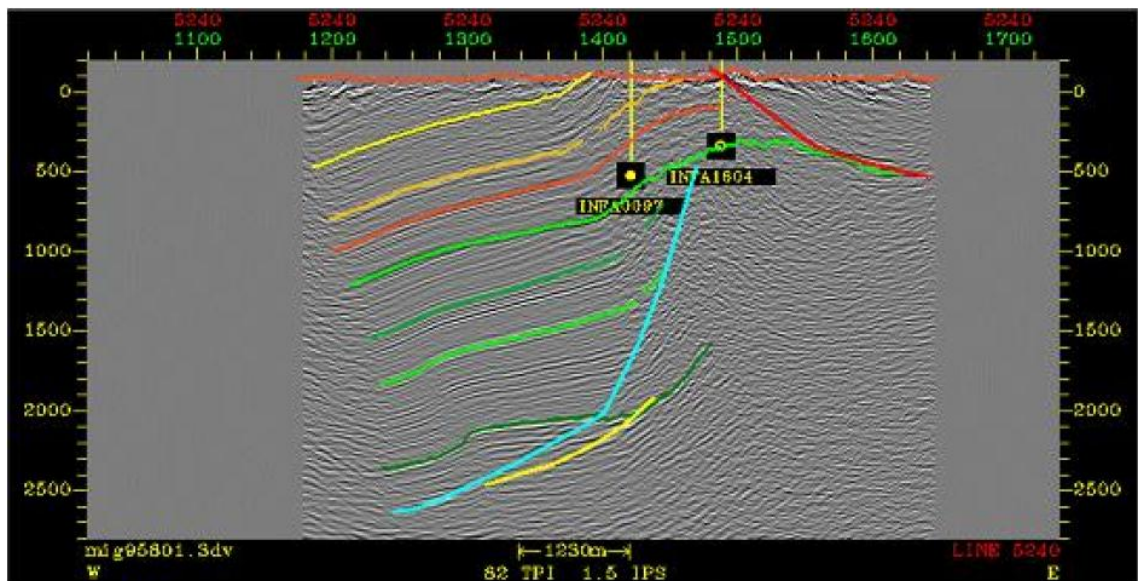
FUENTE: MANTILLA, Andrés Eduardo; TRIANA, Jesús Alberto. Estudio de Estimulación de Pozos. Gerencia de Yacimientos. Bogotá, Diciembre 1996.

Figura 5. Sección Sísmica, Orientada Este-Oeste, a través de la Estructura La Cira.



FUENTE: MANTILLA, Andrés Eduardo; TRIANA, Jesús Alberto. Estudio de Estimulación de Pozos. Gerencia de Yacimientos. Bogotá, Diciembre 1996.

Figura 6. Sección Sísmica a través de Infantas



FUENTE: MANTILLA, Andrés Eduardo; TRIANA, Jesús Alberto. Estudio de Estimulación de Pozos. Gerencia de Yacimientos. Bogotá, Diciembre 1996.

1.5. PROPIEDADES DEL YACIMIENTO

Propiedades petrofísicas. En el campo La Cira-Infantas se realizó la evaluación petrofísica de las formaciones Mugrosa y Colorado en 823 pozos para lo cual se empleo la información de 6 pozos corazonados del campo La Cira (1879, 1880, 1882, 1884, 1888, 1892) y se contó con la información de aprox. 3200 datos de análisis básicos de corazones de dichos pozos corazonados. Con esta información se realizó el cálculo de porosidad y permeabilidad en forma continua a partir de los perfiles disponibles para cada pozo. Además con la información de estudios especiales de corazones (70 muestras presentan propiedades eléctricas y presiones capilares, 24 muestras presentan permeabilidades relativas, 3 de mojabilidad y 11 de sensibilidad), se estableció las correlaciones que permitieron el cálculo de permeabilidades relativas y saturaciones originales basadas en datos de presión capilar, permitiendo por medio de la comparación de esta saturación y la calculada por Archie definir zonas acuíferas y zonas afectadas por inyección de agua dulce para los pozos perforados después de la inyección. Se definieron tres tipos de calidad de roca calibrada con la información de los pozos corazonados, identificando las zonas con mejores propiedades petrofísicas. Un registro tipo es mostrado en la Figura 7 En el campo La Cira-Infantas, está probada la acumulación de hidrocarburos con las siguientes propiedades. Véase la Tabla 1.

Las Propiedades del fluido del área la Cira-Infantas son mostradas en la Tabla 2. Las Reservas estimadas del área la Cira-Infantas son mostradas en la Tabla 3.

Tabla 1. Propiedades de Yacimiento del Área de La Cira – Infantas.

PARAMETROS ZONA	INFANTAS		LA CIRA		
	B	C	A	B	C
Área (Acres)	1171	2778	1492	3444	7438
Tope (pies)	900	2390	820	1600	3070
Espesor Neto (pies)	257	290	227	257	290
Porosidad Promedio (%)	21	22	24	21	22
Permeabilidad Promedio (md)	40	95	111	40	95
S _{wi} (%)	45	45	45	45	45

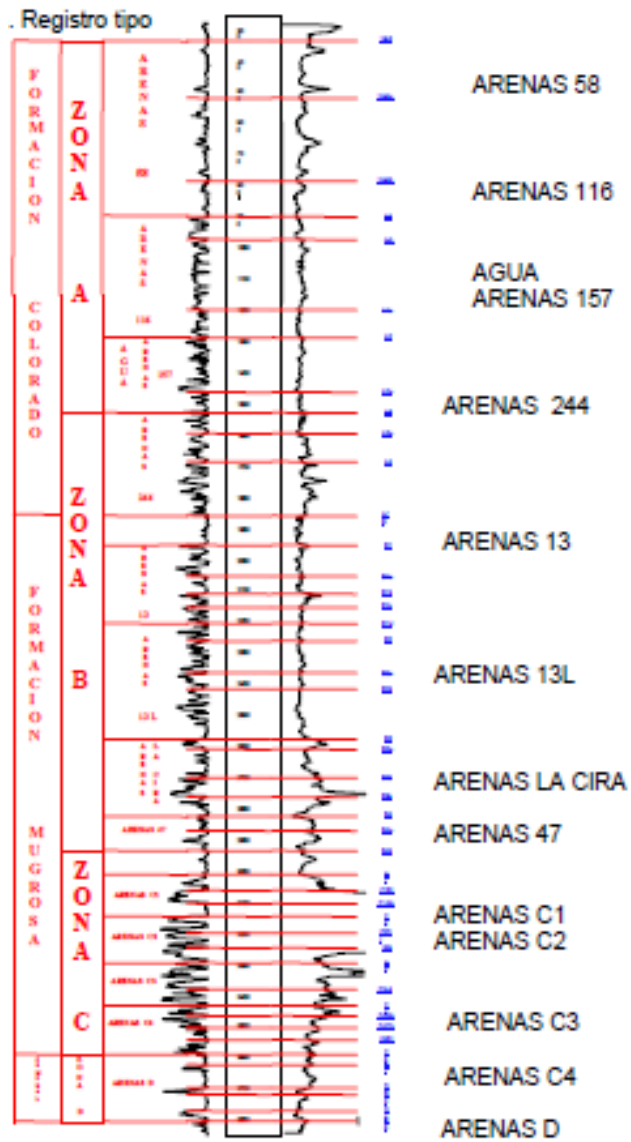
FUENTE: Base de Archivos del Campo La Cira – Infanta. El Centro. ECOPEPETROL. 2005

Tabla 2. Propiedades del Fluido del Área La Cira – Infantas.

PROPIEDAD	LA CIRA			INFANTAS	
	A	B	C	B	C
Temperatura de Yacimiento, °F	92	98	105	85	95
Presión de Saturación, psi	640	715	1570	500	945
Factor Volumétrico a P _s y P _y , RB/STB	1,067	1,075	1,08	-	1,0
R _s , SCF/STB	70	93	181	93	200
Gravedad API	18 – 24	20 – 27	16 – 25	25	24 – 28
Viscosidad, cp (a °F y Psi)	58 cps a 100 °F	11,4 cps a 98 y 650	19 cps a 105 y 1570	11,4 cps a 98 y 650	5,5 cps
Salinidad, ppm NaCl	(10–15) mil	(15–25) mil	(25–40) mil	(15–25) mil	(20–40) mil
Tipo de Crudo	Nafténico			Nafténico - Parafínico	
Mecanismo de Producción	Gas Disuelto			Drenaje Gravitacional Gas Disuelto	

FUENTE: Base de Archivos del Campo La Cira – Infanta. El Centro. ECOPEPETROL. 2005

Figura 7. Propiedades de Yacimiento del Área de La Cira – Infantas.



FUENTE: Base de Archivos del Campo La Cira – Infanta. El Centro. ECOPEL. 2005

Tabla 3. Reservas Estimadas del Área de La Cira – Infantas.

Campo	Zona	Aceite Original (MMbbls)	Producción Acumulada (MMbbls)	RESERVAS PROBADAS		Factor de Recobro (%)
				Desarrolladas (MMbbls)	No Desarrolladas (MMbbls)	
Infantas	B	211	30	2,0	0,0	14
	C	777	181	5,0	10,0	27
La Cira	A	327	43	4,7	1,0	13
	B	677	108	17,0	10,2	16
	C	1638	336	10,1	1,0	21

FUENTE: Base de Archivos del Campo La Cira – Infanta. El Centro. ECOPEL. 2005

2. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL EN EL CAMPO LA CIRA – INFANTAS QUE USAN SARTA DE VARILLAS

La mayoría de los pozos en sus etapas tempranas fluyen naturalmente hacia la superficie. Los requisitos básicos para asegurar el flujo de la producción es que la presión en fondo de pozo sea suficiente para sobreponer la suma de las pérdidas de presiones que ocurren a lo largo del camino que recorre el líquido hacia superficie. Cuando este criterio no se cumple, el pozo deja de fluir naturalmente y es necesaria la instalación de un sistema de levantamiento artificial.¹ Para el campo La Cira – Infantas, el 82,4% de los pozos productores cuentan con sistemas de levantamiento artificial por bombeo mecánico, el 15.8% cuenta con sistemas de cavidades progresivas y el 1.4% con sistemas de bombeo electro sumergible (además de algunos proyectos con ESP-PCP, 0.3% para más exactitud).

2.1. SISTEMAS DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL CON VARILLAS

Para hacer producir pozos que ya están muertos o para incrementar la tasa de producción de pozos productores actuales, se necesita algún tipo de equipo de levantamiento artificial. Hay muchos sistemas de levantamiento de los cuales disponer y todos trabajan a partir del principio de proporcionar la energía necesaria para mover los fluidos desde el pozo hasta superficie.

¹ TAKACS, Tabor; En: Sucker-Rod Pumping Manual, PennWell Books; Tulsa, Oklahoma, 1993.

Aunque todos los métodos de levantamiento se distinguen por basarse en tres mecanismos básicos, las clasificaciones más comunes de alguna manera son todas diferentes, y una de ellas es Bombeo por Varillas.

Los métodos de bombeo por varillas utilizan una sarta de varillas la cual conecta la bomba de fondo de pozo con el mecanismo de producción de superficie. Las varillas pueden oscilar o rotar en superficie, dependiendo del tipo de bomba usada. Históricamente, en pozos de crudo y agua, bombas de desplazamiento positivo fueron las primeras que se instalaron, las cuales requieren un movimiento vertical alterno para operar. El tipo dominante de bombeo por varillas es el Bombeo Mecánico. Este tipo de levantamiento artificial usa una bomba de embolo de desplazamiento positivo y una unidad de producción en superficie la cual convierte el movimiento rotatorio del motor con una conexión mecánica incluyendo un balancín giratorio.

Otro sistema de bombeo por varillas usa una Bomba de Cavidades Progresivas que requiere que la sarta de varillas se encuentre rotando para su operación. Esta bomba, como la bomba de pistón usada en otros tipos de sistemas de bombeo por varillas, trabaja bajo el principio del desplazamiento positivo pero no contiene ninguna válvula.²

2.1.1. Bombeo Mecánico

En su forma más simple, la bomba consiste de un cilindro o camisa suspendida en la tubería de producción, el embolo se mueve hacia arriba y hacia abajo en el interior de este cilindro por medio de la sarta de varillas de succión, la cual consiste en una serie de varillas de acero enroscadas y acopladas en la superficie a la unidad de bombeo.

² TAKACS, Tabor; En: Sucker-Rod Pumping Manual, PennWell Books; Tulsa, Oklahoma, 1993.

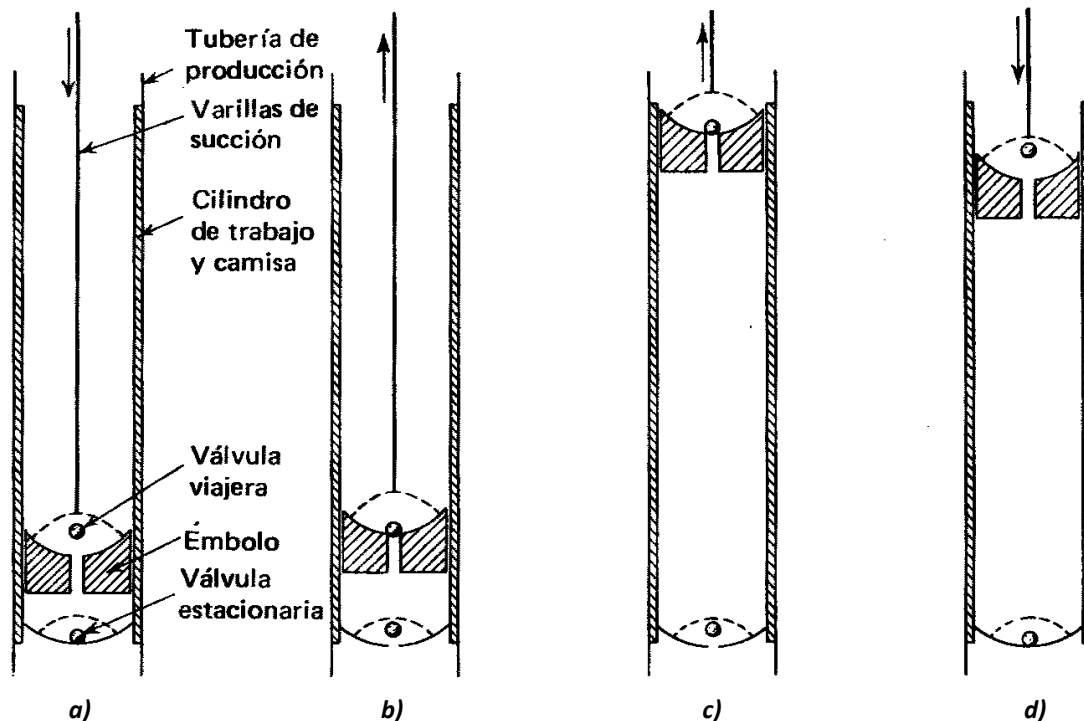
La unidad y la máquina motriz en la superficie suministran el movimiento oscilatorio a la sarta de varillas de succión y, en consecuencia, a la bomba. En el fondo del cilindro está instalada una válvula estacionaria de bola y asiento, la válvula estacionaria o fija (SV), además de una segunda válvula de esfera y asiento, la válvula viajera (TV), la cual está localizada en el embolo.

Las características principales del ciclo de bombeo se ilustran en la Figura 8, y los cuatro esquemas incluidos en esta figura se refieren a las situaciones que se describen a continuación:

- a) Movimiento descendente del embolo, cerca del fondo de la carrera:
El fluido se mueve hacia arriba a través de la TV abierta mientras el peso de la columna de fluido en la tubería de producción esta soportado por la SV, la cual en consecuencia está cerrada.
- b) Movimiento ascendente del embolo, cerca del fondo de la carrera:
La TV ahora está cerrada; en consecuencia, la carga debida a la columna de fluido se ha transferido de la tubería de producción a la sarta de varillas. La SV se abre tan pronto como la presión abajo excede la presión de arriba; la posición en la carrera hacia arriba, en la cual ocurre esto, depende del espaciamiento de la bomba, es decir, del volumen incluido entre las válvulas SV y TV al fondo de la carrera, y el porcentaje de gas libre atrapado en el volumen del fluido.
- c) Movimiento ascendente del embolo, cerca de la parte superior de la carrera: Si en el pozo hay producción obtenida con bombeo, la válvula SV debe estar abierta este tiempo, permitiendo que la formación entregue producción a la tubería de producción. La válvula TV está cerrada.

- d) Movimiento descendente del émbolo, cerca de la parte superior de la carrera: La válvula estacionaria está cerrada por el aumento de presión que resulta de la compresión de los fluidos en el volumen entre las válvulas SV y TV. La TV está abierta, pero en el punto de la carrera hacia abajo en el cual se abre depende del porcentaje de gas libre en los fluidos entrampados, ya que la presión debajo de la válvula debe exceder a la presión de arriba, es decir, la presión debida a los fluidos en la tubería de producción arriba del émbolo, antes de que la TV se abra.³

Figura 8. Ciclo de Bombeo: a) El émbolo se mueve hacia abajo cerca del fondo de la carrera; b) El émbolo sube, cerca del fondo de la carrera; c) El émbolo sube cerca de la parte superior de la carrera; d) El émbolo se mueve hacia abajo cerca del tope de la carrera.



FUENTE: NIND, T.E.W.; *Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros*.

³ NIND, T.E.W.; *En: Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros*, Editorial Limusa; Ontario, Canadá. 1987

Los componentes individuales del sistema de Bombeo Mecánico pueden ser divididos en dos grupos principales: El equipo de superficie y el equipo de subsuelo.

El equipo de superficie incluye:

- ✓ El motor, que provee la energía al sistema y puede ser un motor eléctrico o uno de gas.
- ✓ La manivela o caja de engranaje, reduce la alta velocidad de rotación del motor a la velocidad de bombeo requerida, y al mismo tiempo, incrementa el torque disponible en su eje de baja velocidad.
- ✓ La unidad de bombeo, una conexión mecánica que transforma el movimiento rotatorio de la manivela en el movimiento reciprocante requerido para operar la bomba de fondo de pozo. Su principal elemento es el balancín, el cual trabaja bajo el principio de una palanca mecánica.
- ✓ La barra lisa, la cual conecta el balancín con la sarta de varillas y con un sello evita fluidos del yacimiento dentro del pozo.
- ✓ El montaje del cabezal de pozo, contiene una prensa-estopa que sella la barra lisa y una *pumping tee* que lleva los fluidos del pozo hacia la línea de flujo. El anular entre el *casing* y el *tubing* se conecta usualmente a la línea de flujo, por medio de una válvula cheque.

El equipo de subsuelo incluye:

- ✓ La sarta de varillas, compuesta por varillas de succión, que corren dentro de la sarta de tubería del pozo. La sarta de varillas provee la conexión mecánica entre el equipo de superficie y la bomba de subsuelo.

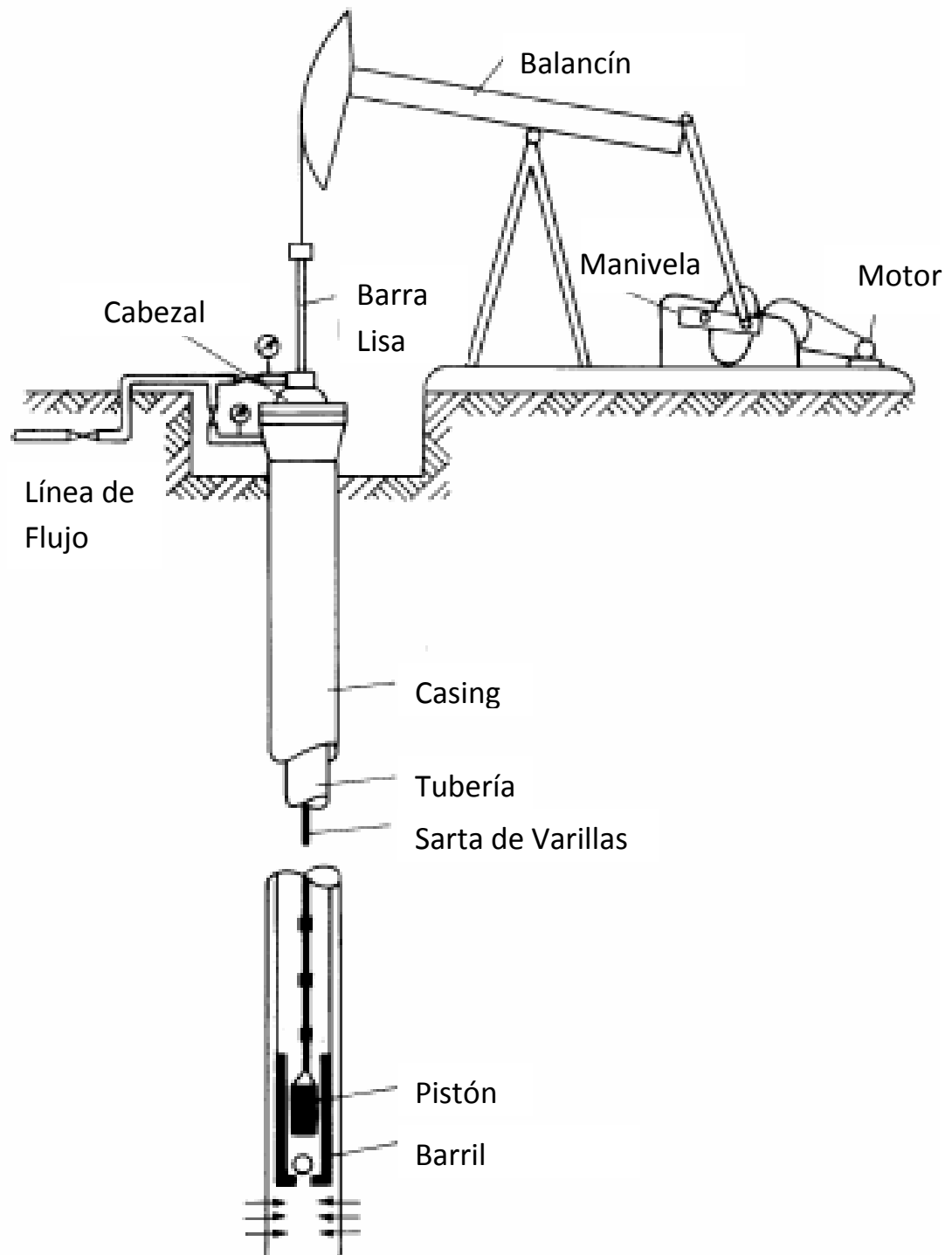
- ✓ La bomba pistón, la cual es la parte en movimiento en un sistema de bombeo mecánico usual y está directamente conectada a la sarta de varillas. Contiene una válvula de bola, llamada Válvula Viajera, la cual, durante el movimiento ascendente del pistón, levanta el líquido contenido en la tubería.
- ✓ El barril de bomba, es la parte (Cilindro) estacionaria de la bomba de subsuelo. En esta se encuentra otra válvula de bola, la Válvula Estacionaria. Este actúa como una válvula de succión para la bomba, a través de la cual los fluidos del pozo entran al barril de la bomba durante el movimiento ascendente.⁴

En la Figura 9 se observa el esquema completo del sistema de Bombeo Mecánico, desde las instalaciones de superficie hasta el equipo de fondo.

2.1.2. Bombeo Por Cavidades Progresivas

El sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas es una opción a considerar en la explotación de pozos productores de petróleo por su relativa baja inversión inicial; bajos costos de transporte, instalación, operación y mantenimiento; bajo impacto visual, muy bajos niveles de ruido y mínimos requerimientos de espacio físico tanto en el pozo como en almacén.

⁴ TAKACS, Tabor; En: Sucker-Rod Pumping Manual, PennWell Books; Tulsa, Oklahoma, 1993.

Figura 9. Sistema de Bombeo Mecánico.

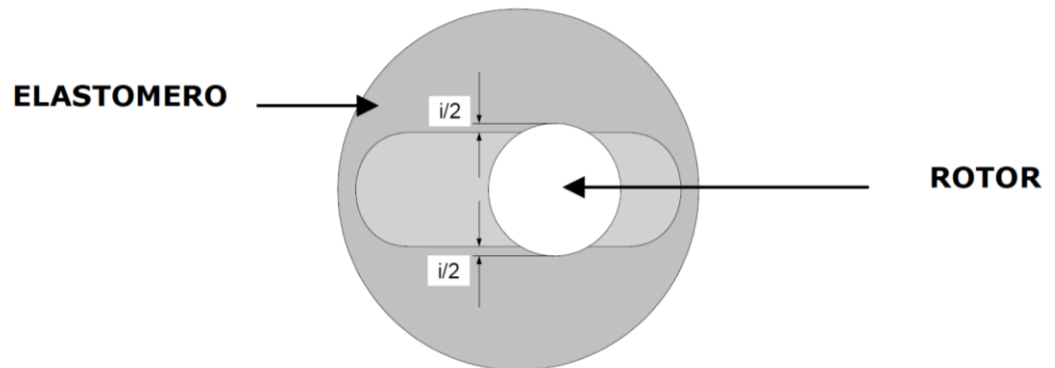
FUENTE: NIND, T.E.W.; *Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros.*

A grandes rasgos, la bomba de Cavidades Progresivas (PCP) está compuesta por el Rotor y el Estator. El Rotor es accionado desde la superficie por un sistema impulsor que transmite el movimiento rotativo a la sarta de Varillas la cual, a su vez, se encuentra conectada al Rotor. El estator es el componente estático de la bomba y contiene un polímero de alto peso molecular con la capacidad de deformación y recuperación elástica llamado Elastómero.

El funcionamiento de las PCP está basado en el principio ideado por *Rene Maoinneau*, la PCP utiliza un Rotor de forma helicoidal de n lóbulos dentro de un Estator en forma de helicoides de $n+1$ lóbulos. Las dimensiones del Rotor y el Estator están diseñadas de manera que producen una interferencia, la cual crea líneas de sello que definen las cavidades. Al girar el rotor, estas cavidades desplazan (o progresan), en un movimiento combinado de traslación y rotación, que se manifiesta en un desplazamiento helicoidal de las cavidades desde la succión de la bomba, hasta su descarga.⁵

La Figura 10 muestra una sección transversal de una PCP convencional (1x2 lóbulos), donde se observa como el diámetro del rotor es un poco mayor que el ancho de la cavidad, produciendo la interferencia (i) que crea el sello.

⁵ CHACIN, Nelvy; En: Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de Falla y Trouble Shooting; Programa de Adiestramiento; El Tigre, Venezuela; 2003

Figura 10. Sección Transversal de una PCP

FUENTE: CHACIN, Nelvy; Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de Falla y Trouble Shooting; Programa de Adiestramiento; El Tigre, Venezuela; 2003

Debajo de la PCP se coloca el Niple de Paro, el cual sirve para espaciar el Rotor con respecto al Estator. En la Figura 11 se muestran de una manera esquemática, los componentes principales del subsuelo del sistema de bombeo por cavidades progresivas.

El equipo de subsuelo incluye:

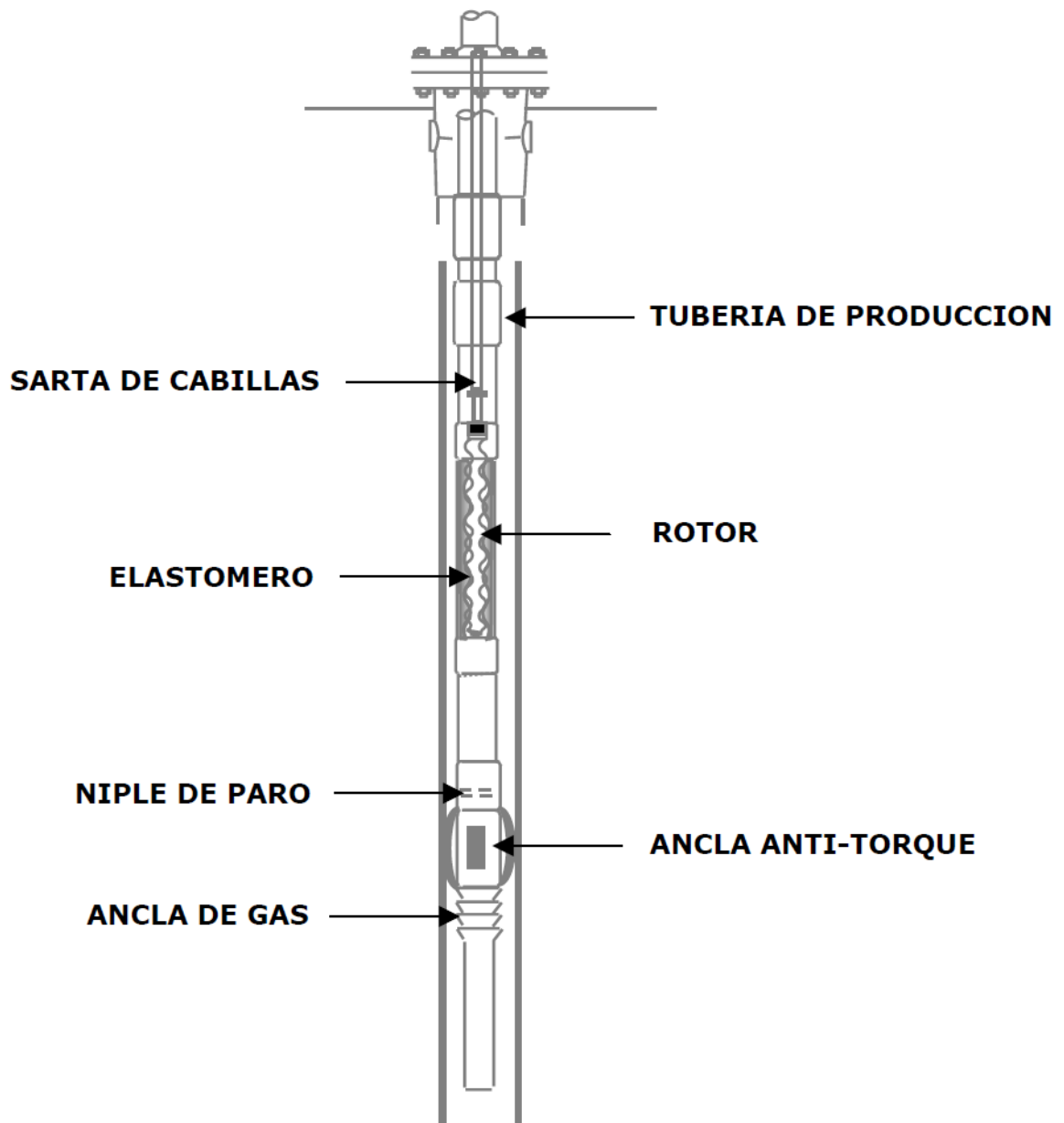
- ✓ **El Estator:** Es un cilindro de acero (o tubo) revestido internamente con un Elastómero sintético (polímero de alto peso molecular) moldeado en forma de dos hélices adherido fuertemente a dicho cilindro mediante un proceso muy especial.
- ✓ **El Elastómero:** Constituye el elemento más “delicado” de la Bomba de Cavidades Progresivas y de su adecuada selección depende en una gran medida el éxito o fracaso de esta aplicación. Este reviste internamente el Estator y en si es un Polímero de alto peso molecular con la propiedad de deformarse y recuperarse elásticamente (Resiliencia).
- ✓ **El Rotor:** Esta fabricado con acero de alta resistencia mecanizado con precisión y recubierto con una capa de material altamente

resistente a la abrasión. Se conecta a la sarta de varillas las cuales le transmiten el movimiento de rotación desde la superficie (accionamiento o impulsor).

- ✓ El Niple de Paro: Es un tubo de pequeña longitud el cual se instala bajo el Estator y cuyas funciones principales son: Servir de punto de tope al rotor, brindar un espacio libre al rotor, impedir que el rotor y/o las varillas lleguen al fondo del pozo y servir de punto de conexión para accesorios (anclas de gas o anti torque, filtros de arena, etc).

Los accionamientos de superficie para los sistemas de bombeo por cavidades progresivas han evolucionado desde pequeñas unidades de velocidad fija hasta sofisticados sistemas protegidos mecánica y eléctricamente y con capacidades de supervisión y control a distancia⁶.

⁶ CHACIN, Nelvy; En: Bombeo de Cavity Progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de Falla y Trouble Shooting; Programa de Adiestramiento; El Tigre, Venezuela; 2003

Figura 11. Componentes de Subsuelo de una PCP.

FUENTE: CHACIN, Nelvy; *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de Falla y Trouble Shooting; Programa de Adiestramiento; El Tigre, Venezuela; 2003*

3. LA SARTA DE VARILLAS EN SISTEMAS DE BOMBEO

La sarta de varillas es la parte más vital de un sistema de bombeo, ya que esta transmite la energía entre el equipo de superficie y la unidad de bombeo de subsuelo. El comportamiento de esta barra puede tener un impacto fundamental en la eficiencia del levantamiento del fluido y su eventual falla llevaría a una pérdida total de producción. Es por esto que un diseño apropiado de esta sarta no solo garantiza una buena condición de operación sino que también reduce considerablemente los costos totales de producción del pozo.

El tipo más usado de varillas son las varillas de acero sólido las cuales han sido estandarizadas por el *American Petroleum Institute* (API) desde 1926. Las terminaciones de las varillas son forjadas a altas temperaturas y luego tratadas. En la Figura 12 se observa algunas imágenes de varillas.

Los materiales de las varillas de acero sólido normalmente tienen un contenido de hierro mayor al 90%. Elementos de aleaciones son usados para incrementar la resistencia, dureza, mejorar los efectos de los tratamientos metalúrgicos y para combatir corrosión. Los aceros usados para la fabricación de varillas se dividen en dos categorías: Aceros de Carbón y Aleaciones. Los primeros contienen solo carbón, manganeso, silicio, fósforo y azufre. Las aleaciones contienen otros elementos adicionales.

Figura 12. Varillas de Acero.

FUENTE: WEATHERFORD, *PRO/KC Sucker-Rod Connection and Makeup Services*, 2009

Muchos de los problemas del bombeo por varillas se asocian con la existencia de las juntas o acoples en la sarta de varillas, ya que estos están sujetos a condiciones de operación severas. Una sarta continua de varillas sin ninguna junta o acople, por lo tanto, elimina totalmente las terminaciones de las varillas y acoples e incrementa la vida de la sarta. Este tipo de varilla está disponible en el mercado y son llamadas ya sea varillas continuas o “*Corod*”.

Otro tipo de varilla son las Varillas Huecas (*Hollow Rod*), las cuales reducen los costos operativos y aumentando con confiabilidad gracias a su enfoque en las cargas axiales. Fue desarrollada para trabajar bajo cargas por rotación en sistemas PCP y con el fin de resistir el fenómeno de fatiga del material.⁷

⁷ TAKACS, Tabor; En: *Sucker-Rod Pumping Manual*, PennWell Books; Tulsa, Oklahoma, 1993.

3.1. TIPOS DE VARILLAS

Las varillas se pueden clasificar en dos grupos, Varillas Convencionales y Varillas No Convencionales, sin embargo hay también otros componentes que hacen parte de la sarta de varillas como lo son los *Pony Rods*, las Barras de Peso o *Sinker Bars*, los Acoples o *Couplings* y los Centralizadores. En el campo La Cira – Infantas, desde que comenzó a regir el contrato de asociación entre las empresas ECOPETROL S.A. y Occidental Andina LLC, se usan tanto varillas convencionales como no convencionales para el completamiento de los pozos.

3.1.1. Varillas Convencionales

Las varillas convencionales son aquellas que son diseñadas y construidas de acuerdo con las especificaciones para las dimensiones, propiedades mecánicas y materiales que aparecen en la norma API SPEC 11B⁸. Las composiciones de las varillas de acero y *pony rods*, debe ser cualquier composición recomendada por la AISI (*American Iron and Steel Institute*), las cuales están listadas en la Tabla 4, y deben ser efectivamente tratadas con calor siguiendo los requerimientos de las propiedades mecánicas del API (*American Petroleum Institute*) mostradas en la Tabla 5. Cada composición exacta debe ser detallada en las especificaciones de materiales para cada fabricante.

⁸ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; En: Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998.

Tabla 4. Composición Química de las Varillas de Acero.

Grado API	Composición Química
K	AISI 46XX Serie Acero
C	AISI 10XX Serie Acero
	AISI 15XX Serie Acero
D Carbón	AISI 10XX Serie Acero
	AISI 15XX Serie Acero
D Aleación	AISI 41XX Serie Acero
D Especial	Especial*

FUENTE: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998

Tabla 5. Propiedades Mecánicas de Fuerza de las Varillas de Acero.

Grado API	Cedencia Mínima 0,2% Offset Psi (Mpa)	Tensión Mínima Psi (Mpa)	Tensión Máxima Psi (Mpa)
K	60.000 (414)	90.000 (620)	115.000 (793)
C	60.000 (414)	90.000 (620)	115.000 (793)
D	85.000 (586)	115.000 (793)	140.000 (965)

FUENTE: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998

Algunas comparaciones de composiciones para diferentes grados de varillas dependiendo del fabricante, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición de Varillas para cada Fabricante.

Grado API		WEATHERFORD	NORRIS	TENARIS	ALBERTA OIL TOOLS
K	Cargas	Ligeras a Medias			-
	Aplicación	Pozos corrosivos	Pozos con buen tratamiento de inhibición.	Pozos corrosivos (se recomienda inhibición).	-
	Acero	AISI 4623 Aleación de Ni-Mo	AISI 4621 Aleación de Ni-Cr-Mo	AISI 4621 Aleación de Ni-Cr-Mo	-
C	Cargas	Ligeras a Medias			-
	Aplicación	Pozos no Corrosivos	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de inhibición	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de Inhibición	-
	Acero	AISI 1536 Aleación de C-Mn	AISI 1541 de C-Mn	AISI 1530 de C-Mn	-
D Carbón	Cargas	Medias a Altas			
	Aplicación	Pozos no Corrosivos	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de inhibición	Pozos no corrosivos o con buen tratamiento de Inhibición	Pozos no Corrosivos
	Acero	AISI 1541 Aleación de C-Mn	AISI 1541 Aleación de C-Mn	AISI 1530 Micro Aleación de C-Mn	AISI 1541 Aleación de C-Mn
D Aleación	Cargas	Altas			
	Aplicación	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de Inhibición	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de Inhibición.	Pozos no Corrosivos o con buen tratamiento de Inhibición	Pozos con buen tratamiento de Inhibición
	Acero	AISI 4142 Aleación de Cr-Mo	AISI 4142 Aleación de Cr-Mo	AISI 4142 Aleación de Cr-Mo	AISI 4142 Aleación de Cr-Mo

D Especial	Cargas	Altas			
	Aplicación	Pozos con buen tratamiento de Inhibición	Pozos con buen tratamiento de Inhibición	Pozos Corrosivos (se recomienda Inhibición)	Pozos con buen tratamiento de Inhibición
	Acero	AISI 4720 Aleación de Ni-Cr-Mo	AISI 4330 y 4320 Aleaciones de Ni-Cr-Mo	AISI 4330 y 4320 Aleaciones de Ni-Cr-Mo	AISI 4330 Aleación de Ni-Cr-Mo

Todas las varillas convencionales tienen una longitud de 25 ft y los diámetros varían entre 3/4" y 1 1/4" aumentando en 1/8" cada rango. En el campo La Cira – Infantas, el grado de varilla más usado es el D. Además de estos tipos de varillas, en el campo se usan otras variaciones especiales, específicas de cada fabricante como lo son las varillas ELECTRA y T66XD de *Weatherford*, las cuales soportan altos torques en los sistemas PCP; y las varillas UHS (*Ultra High Strength*) de *Tenaris*.

3.1.2. Varillas No Convencionales

- **Varillas Continuas:**

Es una sarta continua de varillas que no usan acoples. Estas varillas son almacenadas y transportadas en grandes carretes; además, requieren de un equipo especial de instalación/desinstalación y de soldadura para operaciones de conexión/desconexión. Las varillas continuas se dividen en 2 clases, las varillas redondas y las varillas semielípticas; en el campo La Cira – Infantas solo se usan las varillas continuas redondas. Algunos de los tipos de varillas continuas y algunas de sus propiedades se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos y Propiedades de Varillas Continuas del Mercado.

TIPO DE VARILLA	Material	Tensión Mínima Psi	Cedencia Mínima Psi	Dureza Máxima Promedio (Rc)
COROD DR	AISI 1536 Aleación de Ni- Cr	115.000	85.000	28
COROD DER	AISI 4120 Aleación de Ni- Cr-Mo	115.000	90.000	26
COROD DWR	AISI 4320 Aleación de Ni- Cr-Mo	115.000	90.000	28
COROD SER	AISI 4120 Aleación de Ni- Cr-Mo	130.000	110.000	32
COROD SWR	AISI 4320 Aleación de Ni- Cr-Mo	145.000	120.000	38
PROROD 620C	AISI 1536 Aleación de Ni- Cr	120.000	95.000	22
PROROD 780M	AISI 4120 Aleación de Ni- Cr-Mo	120.000	95.000	22
PROROD 750N	AISI 4320 Aleación de Ni- Cr-Mo	120.000	100.000	22
PROROD 960M	AISI 4120 Aleación de Ni- Cr-Mo	140.000	115.000	28
PROROD 970N	AISI 4330 Aleación de Ni- Cr-Mo	140.000	120.000	28

Estas varillas están disponibles en los diámetros que se muestran en la Tabla 8 con sus respectivos torque máximos.

Tabla 8. Diámetros y Torque Máximo para cada Tipo de Varilla Continua.

TIPO DE VARILLA	13/16"	7/8"	1"	1 1/8"
COROD DR	500	640	955	1.490
COROD DER	-	640	955	1.490
COROD DWR	-	-	955	1.490
COROD SER	700	900	1.300	2.000
COROD SWR	700	900	1.300	2.000
PROROD 620C	540	680	1.015	1.445
PROROD 780M	565	735	1.100	1.535
PROROD 750N	580	750	1.110	1.550
PROROD 960M	725	900	1.350	1.900
PROROD 970N	725	900	1.350	1.900

Las varillas COROD dependiendo de su diámetro tienen una nomenclatura especial; Para diámetro de 13/16" es 3, para diámetros de 7/8" es 4, para diámetros de 1" es 6 y para diámetros de 1 1/8" es 8.5. Las varillas COROD son fabricadas por *Weatherford* y las varillas PROROD, su fabricante es *Norris*. Las varillas continuas más usadas en el campo La Cira – Infantas son las COROD SER, COROD SWR Y PROROD 970N. En la Figura 13 podemos observar un carrete de transporte y almacenamiento de varilla continua.

Figura 13. Carrete de Transporte y Almacenamiento de Varilla Continua.



FUENTE: WEATHERFORD, COROD® Regular-Stength Countinuos (DE/DER) Rod, 2011

- **Varillas Huecas:**

Las especificaciones para los diseños de varillas dadas por la norma API SPEC 11B, fueron definidos para trabajar únicamente bajo cargas de tracción, lo que indica que las varillas van a ser usadas por sistemas de Bombeo Mecánico o Bombeo por Balancín. Durante mucho tiempo, la industria espero el desarrollo de un producto especialmente diseñado para resistir altas cargas de torsión para los sistemas PCP. A través del Centro de Investigación Industrial de Tenaris, se desarrollo la verilla de bombeo Hueca PCPRod[®], la cual aumenta la confiabilidad del sistema PCP como también reduce los costos operativos.

Para trabajar bajo cargas rotativas en PCP y resistir vida infinita a la fatiga fue desarrollado un nuevo producto que incluye un tubo con extremos box-box y un manguito de conexión que posibilita una unión *external flush* (sin variar de diámetro en la zona de la unión), que minimiza turbulencias y perdidas de cargas localizadas. La conexión *flush* reduce notablemente el rozamiento entre el *tubing* y la sarta de varillas y consecuentemente genera ahorros gracias a la reducción de fallas y la disminución en el consumo de *tubing* y varillas.

Hay tres modelos de PCPRod[®] que permiten trabajar con torque de hasta 1000, 1500 y 2500 lbs.pie según el modelo. En la Tabla 9 vemos sus características⁹.

⁹ TENARIS, En: PCPRod[®] Varillas Huecas para Bombeo por Cavidades Progresivas, Mayo 2009.

Tabla 9. Tipos y Propiedades de Varillas Huecas del Mercado.

	PCPRod [®] 1000	PCPRod [®] 1500	PCPRod [®] 2500
Torque Mínimo (lbs.pie)	900	1400	2400
Torque Oprimo (lbs.pie)	950	1450	2450
Torque Máximo (lbs.pie)	1000	1500	2500
Diámetro Externo (mm)	48,8	42,2	48,8
Espesor (mm)	6,7	5,0	6,7
Rango de Longitud (m)	9,35 – 9,75	8,53 – 9,20	9,35 – 9,65

FUENTE: TENARIS, PCPRod[®] Varillas Huecas para Bombeo por Cavidades Progresivas, Mayo 2009

En la Figura 14 se puede observar una imagen de las diferentes varillas huecas disponibles.

Figura 14. PCPRod[®]1000, PCPRod[®]1500 y PCPRod[®]2500.

FUENTE: TENARIS, PCPRod[®] Varillas Huecas para Bombeo por Cavidades Progresivas, Mayo 2009

3.1.3. *Pony Rods*

Los *Pony Rods* hacen parte también de la sarta de varillas y son fabricados con las mismas propiedades, diámetros, dimensiones y tolerancias que las varillas convencionales. Se usan normalmente para espaciar la sarta en el pozo a la longitud deseada. Vienen en longitudes estándar de 2' (0.61 m), 4' (1.22 m), 6' (1.83 m) y 8' (2.44 m), o otras longitudes solo por pedido especial.

3.1.4. *Sinker Bars* o Barras de Peso

Las *Sinker Bars* o Barras de Peso son varillas de mayor diámetro diseñadas para añadir peso al final de la sarta. Lo que diferencia a las barras de peso de las varillas convencionales es que están diseñadas para usarlas al fondo de la sarta. Los pines son más pequeños que el diámetro de su cuerpo para permitirles entrar en la sarta. El tamaño del pin no suele ser un problema ya que las cargas en las varillas al fondo de la sarta son pequeñas comparadas con las cargas cerca de la superficie. Esto se debe a que las varillas cercanas a la superficie tienen que soportar su propio peso, el peso de las varillas debajo de ellas y la carga del fluido. Por otro lado, las barras de peso, al estar al fondo de la sarta solo soportar su propio peso y la carga del fluido. Los diámetros de las barras de peso van desde 1 ¼" a 2", las barras de peso que se usan en el campo La Cira – Infantas son de diámetro de 1 5/8". El tamaño de la tubería limita el diámetro máximo de la barra de peso que se pueda usar. La Tabla 10 muestra los diámetros estándar de barras de peso disponibles, su peso y el tamaño de tubería mínimo requerido para cada una.

Tabla 10. Propiedades Físicas de las Barras de Peso.

DIAMETRO DE BARRA DE PESO	PESO (lb/pie)	TAMAÑO MINIMO REQUERIDO DE TUBERIA
1-1/4"	4,2	1,90"
1-3/8"	5,0	2-3/8"
1-1/2"	6,0	2-3/8"
1-5/8"	7,0	2-7/8"
1-3/4"	8,2	2-7/8"
2"	10,7	3-1/2"

FUENTE: SANCHEZ NAVARRO, Yoel Salvador; *Evaluación del Comportamiento de Producción en Pozos con Unidad de Bombeo Hidráulico CORLIFT*; Universidad del Zulia, Trabajo de Grado, Marzo de 2010.

Las barras de peso se utilizan por las tres siguientes razones: 1) Para ayudar a bajar las varillas durante la carrera descendente; 2) Para evitar problemas de pandeo de varillas al final de la sarta; y 3) Para mantener tensionadas las varillas de fibra de vidrio.

Otra razón para usar barras de peso es para ayudar a balancear la unidad de bombeo. En algunos pozos la unidad puede ser demasiado grande para la aplicación y puede tener mucho contrabalanceo aun sin contrapesas en las manivelas. Al añadir barras de peso se obtiene mayor carga en la barra pulida y así poder balancear la unidad. Sin embargo, esta aplicación para las barras de peso solo se recomienda si es la única forma de reducir el torque en la caja de engranaje. Este problema se puede prevenir seleccionando el tamaño correcto de unidad para el pozo ¹⁰.

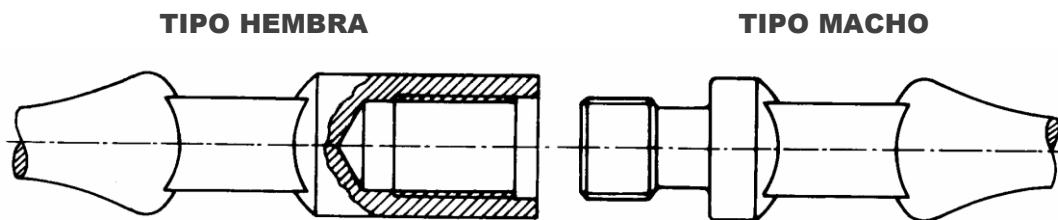
¹⁰ SANCHEZ NAVARRO, Yoel Salvador; *En: Evaluación del Comportamiento de Producción en Pozos con Unidad de Bombeo Hidráulico CORLIFT*; Universidad del Zulia, Trabajo de Grado, Marzo de 2010.

3.1.5. Couplings o Acoples

Las varillas que se fabrican comúnmente es una varilla de una sola pieza que tiene un extremo de salida con las conexiones necesarias tratadas. Hay otras varillas que tienen sus conectores de los extremos aparte, los cuales se enroscan en los dos extremos del cuerpo de la varilla, y pueden ser usados hasta ciertas profundidades de pozo. A estos se les llama Acoples o *Couplings* (Por su nombre en inglés)

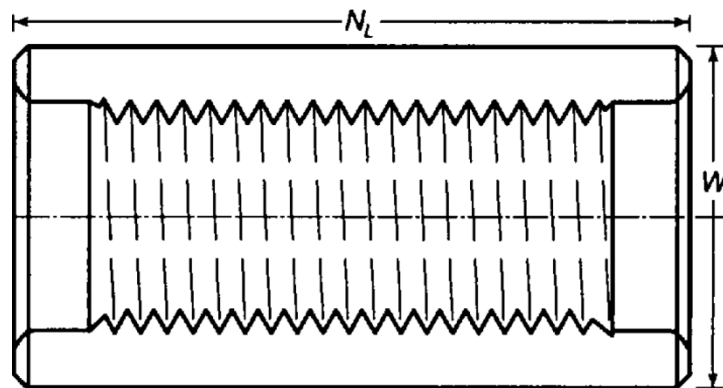
Estos acoples son forjados a altas temperaturas y luego tratados. Se pueden usar conexiones de tipo Pin (tipo Macho) o Box (tipo Hembra), como se observa en la Figura 15.

Figura 15. Terminaciones Típicas de las Varillas.



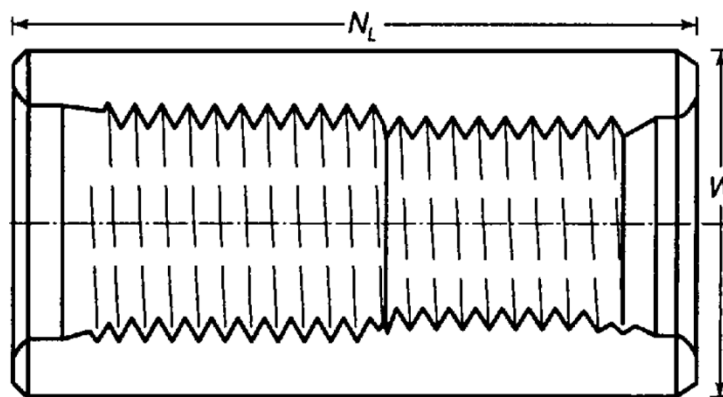
FUENTE: TAKACS, Tabor; *Sucker-Rod Pumping Manual*, PennWell Books; Tulsa, Oklahoma, 1993

Usualmente se fabrican varillas con dos terminaciones tipo macho y se usa un acople hembra para unirlas. Podemos observar en la Figura 16 la sección transversal de un acople Hembra-Hembra (Siendo N_L la longitud del acople y W su diámetro externo).

Figura 16. Acople tipo Hembra – Hembra para Varillas.

FUENTE: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998

Los acoples para un servicio regular son diseñados “Full Size”, y aquellos con un diámetro exterior reducido son llamados acoples “Slim Hole”. También existen conexiones con entradas de diferentes diámetros con el fin de conectar diferentes tipos de varillas y estos son llamados *Subcouplings*. En la Figura 17 se puede observar el corte transversal de uno de ellos (Siendo N_L la longitud del acople y W su diámetro externo) ¹¹.

Figura 17. Corte Transversal de un *Subcoupling*.

FUENTE: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998

¹¹ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; En: Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998

3.1.6. Centralizadores

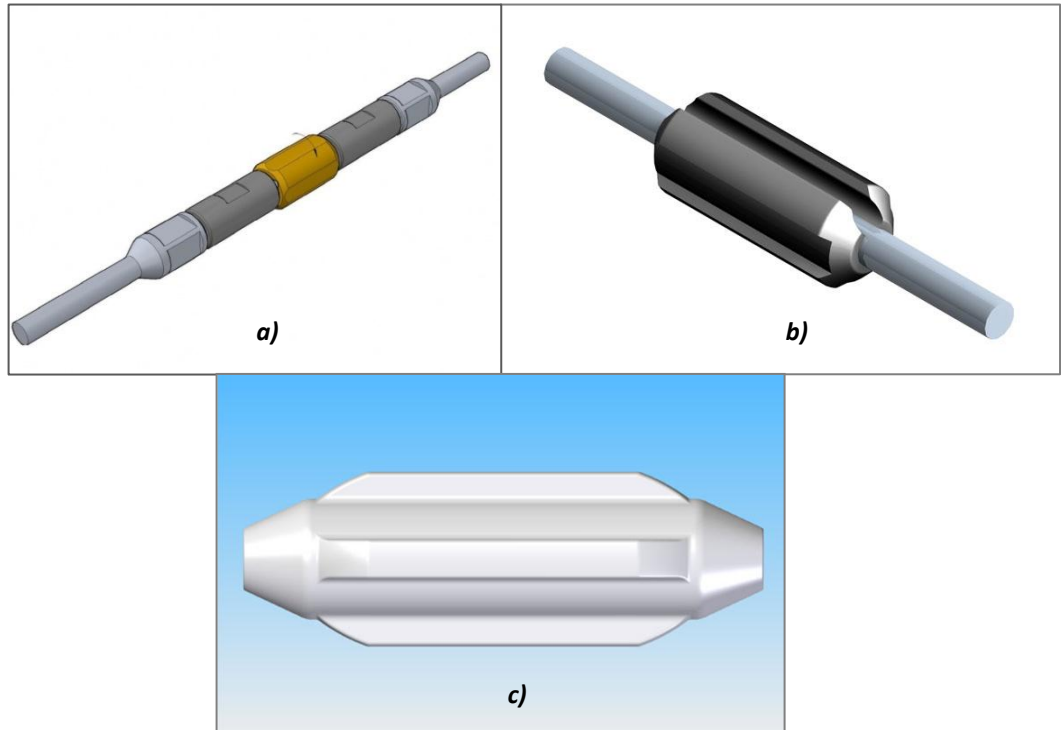
Los centralizadores o guías no son obligatorios en la sarta de varillas y se usan para pozos desviados mayormente, ya que su función es mantener la varilla en el centro de la tubería evitando así, el rozamiento entre estos dos componentes durante los ciclos de producción. Hay muchos tipos de centralizadores en el mercado y estos dependen de los fabricantes. Los tipos más usados en el campo La Cira – Infantas son los centralizadores inyectados, los centralizadores *Roto-Bear* (se instalaron hace algún tiempo en el campo y no funcionaron bien, por lo que se decidió no volver a instalarlos en el campo) y los centralizadores *Retrievable Rod-Guide*.

Los centralizadores *Roto-Bear* son específicos para bombas PCP y previenen el desgaste prematuro de las varillas y conserva, en su caso, la parte interna de la tubería de producción. Los centralizadores *Rod-Guide* se deben instalar en pozo y se fabrican en diferentes materiales y tamaños dependiendo de las necesidades del pozo. Por último, los centralizadores inyectados son los que se pueden inyectar una vez se encuentre dentro del pozo la sarta de varillas y estas se moldean de acuerdo a las varillas. En la Figura 18 se aprecian los tipos de centralizadores anteriormente mencionados.

3.2. FALLAS POR SARTA DE VARILLAS

Una falla de la bomba del subsuelo, de la varilla de bombeo o de la tubería de producción es definida como cualquier evento catastrófico que requiere que el personal de servicio extraiga o reemplace uno o más de estos componentes.

Figura 18. Tipos de Centralizadores usados en La Cira – Infantas. **a)** *Roto-Bear*; **b)** *Rod-Guide*; y **c)** Inyectado.



FUENTE: <http://www.enqepetrol.com.br/br/produto/5>; <http://mapleoilttools.com/node/62>

El manejo de las fallas incluye, impedir, identificar, implementar y registrar la raíz de la causa “real” de cada falla y es importante para la gestión eficaz en general de los activos, en función de los costos. Realmente, la mayoría de las fallas continúan con mayor frecuencia hasta que toda la varilla de bombeo sea extraída y reemplazada¹².

La frecuencia de las fallas producidas en las varillas de bombeo varían de pozo a pozo, sin embargo, es común que las mismas se produzcan al menos una vez al año. Las sarta de varillas de bombeo adecuadamente diseñadas, construidas siguiendo las recomendaciones del fabricante, puestas en

¹² TENARIS SIDERCA, En: Catalogo de Fallas PCP, 2009.

operación con el procedimiento correcto, operadas adecuadamente y trabajando en pozos cuyas condiciones corrosivas están controladas, deberían tener una vida de servicio larga, satisfactoria y económica. De hecho, cuando se toman todas las precauciones posibles, la incidencia de las fallas se reduce significativamente.

A continuación, se describirán los tipos de falla más comunes de las varillas de bombeo.

3.2.1. Fallas Mecánicas

Las fallas de las varillas de bombeo resultan costosas porque la sarta debe ser removida y desarmada para llegar al lugar de la falla y, luego, ser rearmada. En consecuencia, la pesca de varillas conduce al cese de la producción por un lapso de 3 o 4 días. Los pozos con poca producción tal vez no puedan producir lo suficiente como para compensar los costos de fallas frecuentes. Aún en el caso contrario, el cese constante de la actividad implica menor ganancia económica de la que se tendría sin cese.

Algo que sucede comúnmente es que luego de reemplazar una sección de varillas que ha estado fallando continuamente, los problemas aparecen en otra sección de la sarta, generalmente en las varillas del diámetro siguiente. Cuando estas varillas se rompen, también dañan la sección que se acaba de reemplazar.

En consecuencia, el control y minimización de las fallas de cualquier tipo es un factor clave. La correcta clasificación de las fallas y la

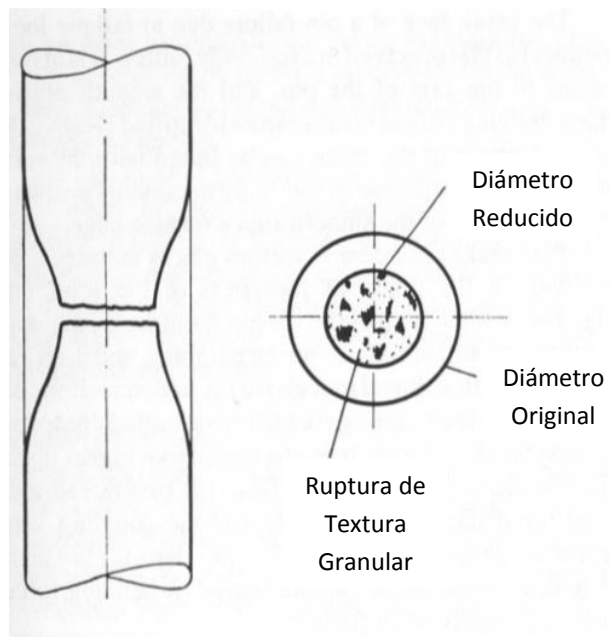
determinación de las causas de las mismas es el primer paso en la toma de medidas correctivas.

El movimiento de bombeo se caracteriza por ciclos de carga que afectan a toda la sarta de varillas y a cada varilla individualmente. En cada ciclo completo, las varillas se encuentran sometidas a diferentes de tensiones por aceleración, desaceleración y alargamiento elástico, lo que puede derivar en fallas producidas por tensión o fatiga.

- **Fallas por Tensión (Tracción):**

Las fallas por tensión ocurren cuando la carga aplicada excede la resistencia a la tensión de la varilla. Esta carga se concentra en un punto específico dando lugar a la reducción de la sección transversal y, en consecuencia, a la fractura. Este fenómeno solo sucede cuando se aplica demasiada carga en la sarta de varilla, por ejemplo, al tratar de retirar una bomba atascada. Inicialmente, la tensión de la varilla produce su alargamiento elástico pero, si la tensión aumenta hasta superar el límite elástico del material, la varilla sufrirá deformación permanente. El diámetro se reducirá hasta que la varilla se rompa. La fractura típica es cónica y en ángulo de 45° respecto al esfuerzo aplicado. La Figura 19 muestra la apariencia típica de las fallas por tensión.

Figura 19. Descripción de una Falla por Tensión.

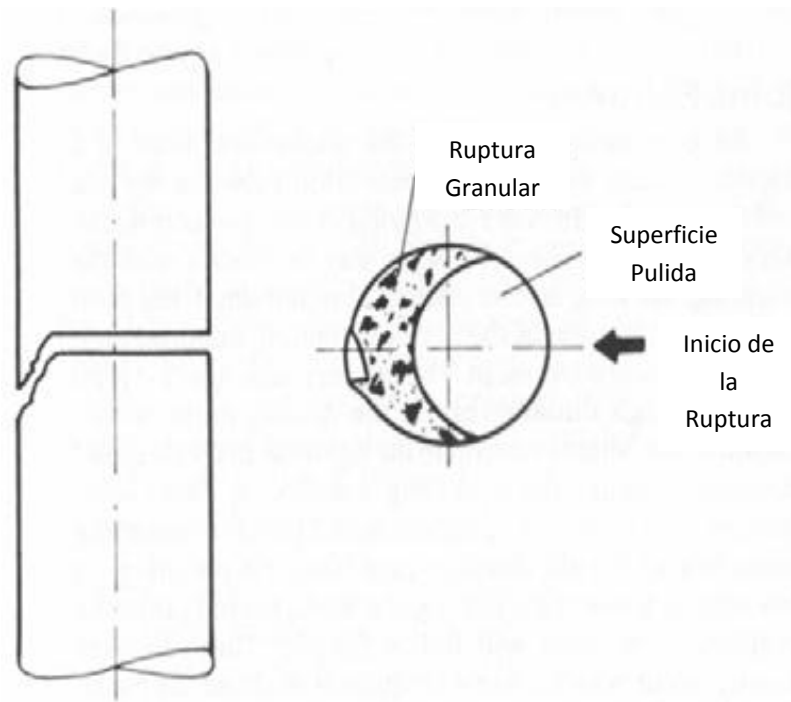


FUENTE: TENARIS SIDERCA, *Catálogo de Fallas PCP*, 2009.

- **Fallas por Fatiga:**

Las fallas por fatiga son fácilmente identificables. A diferencia de las fallas por tensión, este tipo de rotura no implica el alargue del cuerpo de la varilla ni la reducción de diámetro.

Las fallas por fatiga son progresivas y comienzan como pequeñas grietas que crecen bajo la acción de las tensiones cíclicas. Inicialmente, las grietas se propagan lentamente dando como resultado una zona suave, pulida; luego aceleran generando una zona de textura granular. Por último, se produce el desgarro con rotura dúctil y bordes a 45° como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Descripción de una Falla por Fatiga.

FUENTE: TENARIS SIDERCA, *Catálogo de Fallas PCP*, 2009

Los esfuerzos asociados a este tipo de falla tienen un valor máximo menor que la resistencia a la tensión del acero de la varilla de bombeo. Las fallas por fatiga son siempre iniciados por los llamados concentradores de tensión que no son más que discontinuidades, visibles o no, de la superficie de las varillas (Pits de corrosión, grietas, marcas o desgaste). Estas fallas otorgan a la superficie de fractura características propias, como estrías y “marcas de playa” (En forma de ondas), que sirven para identificar la ubicación de los concentradores de tensión. Las marcas de playa indican la posición sucesiva de la grieta por fatiga y son anillos elípticos o semielípticos.

Las fallas por fatiga se dividen en distintas clases:

- ✓ Roturas en Conexiones (pines y acoples): Fallas por exceso o insuficiencia de torque o por desajuste.
- ✓ Rotura en Acoples: Fallas por fatiga pura.
- ✓ Roturas en Cuerpo de Varilla: Fallas por daño superficial, pandeo o flexión.
- ✓ Roturas por Corrosión-Fatiga.

En la Figura 21 se observa un ejemplo de real de campo para una falla por fatiga en el cuerpo de una varilla.

Figura 21. Ejemplo Real de una Falla por Fatiga.



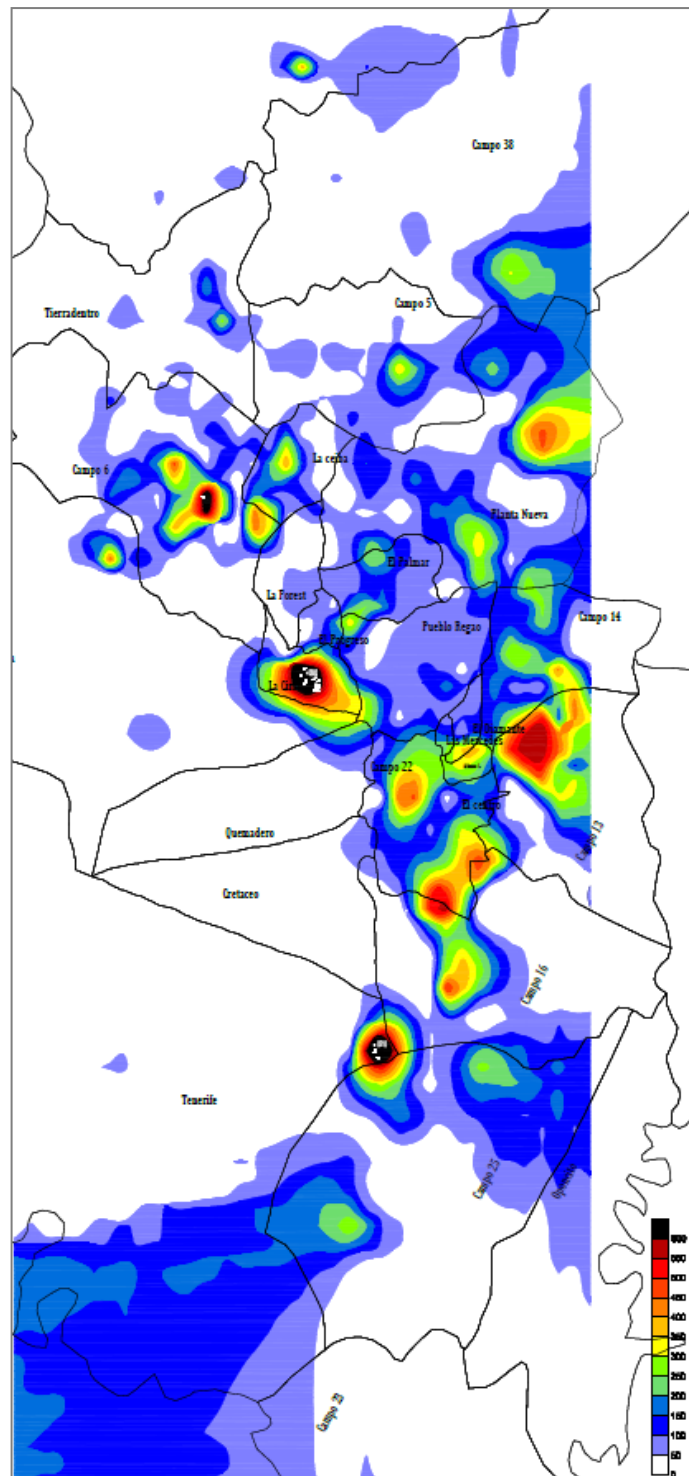
FUENTE: ESPEJO, Edgar; Curso Análisis de Falla en Sistemas Mecánicos, OXY, Marzo 2012.

3.2.2. Fallas por Corrosión

La corrosión es uno de los mayores problemas que se pueden presentar y puede resultar en una importante limitación del comportamiento de los materiales. A menudo, los metales están sujetos a la corrosión electroquímica o a la oxidación, resultado de su interacción con el medio ambiente en el cual se encuentra. Algunos metales forman óxidos que cumplen una función protectora pero la aparición de estos compuestos no garantiza la ausencia de la corrosión; simplemente disminuyen la velocidad de la misma y, si esta capa fuera removida en algún punto, la corrosión volvería a acelerarse. Los diferentes metales se comportan de manera distinta según la presencia de otro metal (Par galvánico), agua ácida o ácido entre otras cosas. El hierro que contiene el acero se combina con la humedad o ácidos para formar compuestos tales como óxido, sulfuro o carbonato de hierro. El agua presente en los pozos pueden contener cantidades considerables de dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrogeno (H_2S) que son ácidos gaseosos corrosivos presentes en la mayoría de los pozos y alta y fácilmente solubles en agua. Todos los ambientes del pozo son corrosivos hasta cierto punto. La corrosión no puede eliminarse por completo pero es posible controlarla. El campo La Cira – Infantas posee corrosión mayormente por H_2S . En la Figura 22 se muestra la localización de las zonas con mayor corrosión para el campo ¹³.

A continuación se explicaran las formas de corrosión que se presentan en las sartas de varillas.

¹³ TENARIS SIDERCA, En: Catalogo de Fallas PCP, 2009.

Figura 22. Mapa de Corrosión por H₂S para el Campo La Cira – Infantas.

FUENTE: Archivo Modelado H₂S, Campo La Cira – Infantas, Occidental Andina LLC, Marzo 2012.

- ✓ Corrosión Uniforme o General: Es un tipo de corrosión más o menos pareja sobre toda la superficie expuesta. En el caso de las varillas, la corrosión se propaga radialmente hacia el centro a una velocidad uniforme alrededor de toda la superficie. El resultado será progresivamente una varilla de diámetro menos al original. Se caracteriza por el aspecto áspero de la superficie y se produce, por ejemplo, por diferencias menores en la composición o en la orientación de pequeñas áreas de la superficie metálica.
- ✓ Corrosión Localizada: Cuando la toda o casi toda la pérdida de metal ocurre en áreas relativamente pequeñas. En el caso de varillas de bombeo es muy común que la corrosión localizada sea del tipo *pitting* (picadura). El *pitting* es un tipo de corrosión profunda, estrecha y de rápida penetración. Se caracteriza por el ataque corrosivo de una región localizada rodeada por superficies no corroídas o por superficies que han sido atacadas en menor medida. El *pitting* puede tardar en iniciarse pero una vez que lo hace, se propaga rápidamente.
- ✓ Cracking por Tensión - Corrosión: Ocurre por la acción combinada de tracción y corrosión. La morfología de este tipo de rotura son las grietas, generalmente ramificadas, que penetran el metal de forma perpendicular a la dirección de la tensión. En estas grietas pueden encontrarse productos e corrosión aunque la apariencia de la superficie sea limpia y no existan evidencias de corrosión. Existen básicamente 3 fenómenos posibles: 1) *Stress Corrosion Cracking (SCC)*, que es un modo de fractura frágil del acero, resultado de la combinación de tensión y un ambiente corrosivo; 2) *Cracking Inducido por Hidrogeno*, el cual se produce por la adsorción del hidrogeno atómico generado en la superficie del metal por una

reacción de corrosión, el cual va produciendo fragilización dentro de la varilla; y 3) Fatiga – Corrosión, el cual resulta de la acción de ciclos de tracción en un medio corrosivo.

- ✓ Desgaste - Corrosión: Son aquellos daños superficiales producidos por Erosión (cuando los fluidos líquidos o gaseosos contienen partículas y la velocidad de flujo es suficiente para remover productos de corrosión que estén adheridos al cuerpo de la varilla), Cavitación (cuando aparecen burbujas que colapsan contra la superficie de las varillas) o Rozamiento (se debe al contacto entre superficies y usualmente está acompañado de cantidades visibles de productos de corrosión).
- ✓ Corrosión Galvánica: Puede ocurrir cuando se forma un par eléctrico entre metales o aleaciones, esto depende de la diferencia de potencial entre metales (o aleaciones), la naturaleza del ambiente en el que se encuentran, la polarización del metal (o aleación) y de la relación geométrica de los componentes ¹⁴.

¹⁴ TENARIS SIDERCA, En: Catalogo de Fallas PCP, 2009.

4. REVISION DE REPORTES Y CREACION DE LAS BASES DE DATOS

Este proyecto tiene como objetivo revisar y analizar la información de los pozos con completamientos iniciales o reactivaciones que se hayan intervenido por la empresa Occidental Andina LLC, comprendidos desde las fechas del 1ero de Enero del 2006 hasta el cierre del año 2011, es decir, el 31 de Diciembre del 2011. Los pozos que cumplan con estos requisitos, a partir de ahora se les llamaran “Pozos del Proyecto”, haciendo referencia a que se encuentran dentro de las intervenciones realizadas desde el momento en el que comenzó a regir el contrato de colaboración entre las empresas Occidental Andina LLC y ECOPETROL S.A; aquellos que no se encuentren dentro del proyecto, se les llamara “Pozos de la Básica”, haciendo referencia a que son pozos que están operando desde antes del año 2006.

4.1. RECOPIACION DE DATOS DE LAS SARTAS DE VARILLAS

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos al comienzo de este proyecto, se debió crear una base de datos de varillas, la cual muestre toda la información disponible para los pozos con completamiento inicial o reactivación dentro del proyecto y con sistemas de levantamiento actuales con varillas, ya sean Bombeo Mecánico o por Cavidades Progresivas.

A fecha del 31 de Diciembre del 2011 se encontraban activos 831 pozos, de los cuales, 685 pozos se encuentran operando con sistema por bombeo mecánico, 131 pozos se encuentran operando con sistema por cavidades

progresivas, 12 pozos con sistema por bombeo electro-sumergible y 3 pozos con sistema ESP-PCP.

De esos 831 pozos, 625 son del proyecto (481 con BM, 130 con PCP, 11 con ESP y 3 con ESP-PCP) y 206 son de la básica (204 con BM, 1 con PCP y 1 con ESP). Sin embargo, fue necesario realizar un filtro de la información total de la empresa, esto, debido a que la cantidad de pozos activos a cierre del año 2011 no es la cantidad total de pozos completados inicialmente o reactivados, muchos de estos se encuentran actualmente inactivos o en su defecto, abandonados.

En el campo La Cira – Infantas se encuentra implementado el programa *Open Wells*¹⁵ para realizar los reportes de campo de cualquier evento o intervención que se le haya realizado a cada pozo. Dentro del paquete de este programa, encontramos uno de nombre *Data Analyzer*¹⁶ el cual, dentro de sus usos, nos permite hacer filtros de la información registrada en *Open Wells*. Se empezó por filtrar la información para los pozos con eventos de completamiento inicial o reactivación entre el 1-Ene-06 y el 31-Dic-11 y ya obtenido el filtro, se observó que dentro del proyecto se habían completado inicialmente 454 pozos, y reactivado 271, además de un pozo de la básica al cual se le hizo recañoneo (Intervención de optimización), para un total de 726 pozos intervenidos dentro del proyecto. En la Figura 23 se muestra la ventana de *Data Analyzer* una vez se realizó el filtro.

Una vez se pasaron los datos del filtro a una hoja de Excel, se comenzó a construir la base de datos. Teniendo los nombres de los pozos y las fechas de los eventos de completamiento inicial o reactivación, se revisó cada evento en busca de los siguientes datos:

^{15 Y 16} Programas Desarrollados y Registrados por la empresa Halliburton. Acceso Permitido bajo licencia a nombre de la empresa Occidental Andina LLC.

Figura 23. Ventana de *Data Analyzer* con el filtro.

The screenshot shows the Data Analyzer software interface. The main window is titled "Data Analyzer - [Inicial Completion&Reactivaciones(varillas)]". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Tree, Spreadsheet, Query, Graphics, Options, Window, Help), a toolbar, and a status bar at the bottom showing "NUM EN API xmdaloni".

The "Selection Tree" on the left lists various data elements, with several checked under the "Rod String Components" category:

- Additional Description
- Component Name
- Condition
- Grade
- Jts

The "Conditions" window in the center-right shows the following configuration:

	Data Element Name	Expression	Show	Sort	Sort Ord	Sort Method	Cond	Conditions ANDED Together
1	Common Well Name	CD_WELL.well_co	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
2	Legal Well Name	CD_WELL.well_leg	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
3	Event Code	DM_EVENT.event_c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	[Event Code] LIKE %
4	Event Name	DM_EVENT.event_n	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
5	Report Date	DM_REPORT.jour	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1	Ascending	<input type="checkbox"/>	
6	Component Name	CD_ASSEMBLY_C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	[Component Name] LI
7	Condition	CD_ASSEMBLY_C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
8	Jts	CD_ASSEMBLY_C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
9	Grade	CD_ASSEMBLY_C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	

The main data table displays the following columns: Common Well Name, Legal Well Name, Event Code, Event Name, Report Date, and Co. The table contains 30 rows of data, all with "RECOMPLETION" as the Event Name and "ROD(S)" as the Co. value.

Common Well Name	Legal Well Name	Event Code	Event Name	Report Date	Co.
CIRA0390	CIRA0390	REC	RECOMPLETION	7/21/1971	ROD(S)
CIRA1157	CIRA1157	REC	RECOMPLETION	5/15/1998	PONY ROD
CIRA1157	CIRA1157	REC	RECOMPLETION	5/15/1998	ROD(S)
CIRA1157	CIRA1157	REC	RECOMPLETION	5/15/1998	PONY ROD
CIRA1157	CIRA1157	REC	RECOMPLETION	5/15/1998	POLISHED ROD
CIRA1157	CIRA1157	REC	RECOMPLETION	5/15/1998	ROD(S)
CIRA1194	CIRA1194	REC	RECOMPLETION	10/31/2000	POLISHED ROD
CIRA1194	CIRA1194	REC	RECOMPLETION	10/31/2000	PONY ROD
CIRA1194	CIRA1194	REC	RECOMPLETION	10/31/2000	ROD(S)
CIRA1693	CIRA1693	REC	RECOMPLETION	7/8/2001	PONY ROD
CIRA1693	CIRA1693	REC	RECOMPLETION	7/8/2001	PONY ROD
CIRA1693	CIRA1693	REC	RECOMPLETION	7/8/2001	ROD(S)
CIRA1693	CIRA1693	REC	RECOMPLETION	7/8/2001	POLISHED ROD
CIRA1693	CIRA1693	REC	RECOMPLETION	7/8/2001	ROD(S)
CIRA1695	CIRA1695	REC	RECOMPLETION	7/22/2001	PONY ROD
CIRA1695	CIRA1695	REC	RECOMPLETION	7/22/2001	POLISHED ROD
CIRA1695	CIRA1695	REC	RECOMPLETION	7/22/2001	PONY ROD
CIRA1695	CIRA1695	REC	RECOMPLETION	7/22/2001	ROD(S)
CIRA1812	CIRA1812	REC	RECOMPLETION	7/26/2001	POLISHED ROD
CIRA1812	CIRA1812	REC	RECOMPLETION	7/26/2001	PONY ROD
CIRA1812	CIRA1812	REC	RECOMPLETION	7/26/2001	ROD(S)
CIRA1812	CIRA1812	REC	RECOMPLETION	7/26/2001	PONY ROD
CIRA0877	CIRA0877	REC	RECOMPLETION	8/22/2001	PONY ROD
CIRA0877	CIRA0877	REC	RECOMPLETION	8/22/2001	ROD(S)
CIRA0877	CIRA0877	REC	RECOMPLETION	8/22/2001	PONY ROD
CIRA0877	CIRA0877	REC	RECOMPLETION	8/22/2001	POLISHED ROD
CIRA0876	CIRA0876	REC	RECOMPLETION	8/25/2001	ROD(S)
CIRA0876	CIRA0876	REC	RECOMPLETION	8/25/2001	PONY ROD
CIRA0876	CIRA0876	REC	RECOMPLETION	8/25/2001	POLISHED ROD
CIRA0876	CIRA0876	REC	RECOMPLETION	8/25/2001	PONY ROD
CIRA0876	CIRA0876	REC	RECOMPLETION	8/25/2001	ROD(S)
CIRA0846	CIRA0846	REC	RECOMPLETION	11/28/2001	ROD(S)
CIRA0846	CIRA0846	REC	RECOMPLETION	11/28/2001	POLISHED ROD
CIRA0846	CIRA0846	REC	RECOMPLETION	11/28/2001	PONY ROD
CIRA0846	CIRA0846	REC	RECOMPLETION	11/28/2001	ROD(S)
CIRA1666	CIRA1666	REC	RECOMPLETION	2/5/2002	ROD(S)
CIRA1666	CIRA1666	REC	RECOMPLETION	2/5/2002	PONY ROD
CIRA1666	CIRA1666	REC	RECOMPLETION	2/5/2002	POLISHED ROD
CIRA1666	CIRA1666	REC	RECOMPLETION	2/5/2002	ROD(S)

- ✓ Cantidad de varillas instaladas
- ✓ Diámetro de las varillas
- ✓ Grado de las varillas
- ✓ Sistema de Levantamiento

- ✓ El estado actual del pozo (a 31-Dic-11)
- ✓ Zona en la que se encuentra ubicado el pozo

Debido a que antes de que comenzara el contrato de asociación con OXY, la empresa Ecopetrol S.A. trabajaba con un programa diferente a *Open Wells*, para los completamientos y reactivaciones de los primeros años del proyecto se tiene muy poca información, por lo cual, para propósitos del análisis, se asumió que todas las varillas instaladas en los eventos de completamientos iniciales y reactivaciones eran nuevas.

Una vez se revisaron todos los eventos y se registraron la cantidad de varillas instaladas por pozo en la base de datos, se obtuvieron las cantidades de varilla que se muestran en las Tabla 11 (Clasificada por grados) y Tabla 12 (Clasificada por diámetros).

Tabla 11. Distribución de Grados de Varillas Instaladas en Completamientos Iniciales y Reactivaciones en el campo La Cira – Infantas.

TIPO DE VARILLA	CANTIDAD (Unidades)	PORCENTAJE (%)
D CARBON	24.223	29,82
D ALEACION	1.565	1,93
D ESPECIAL	3.973	4,89
ELECTRA	1.814	2,23
UHS	8.926	10,99
T66XD	123	0,15

COROD SER*	418	0,51
COROD SWR*	1.078	1,33
PROROD 970N*	613	0,76
PCPROD[®] 1000	2.465	3,03
SINKER BAR	338	0,42
SPECIAL HIGH STRENGTH**	34.621	42,63
DESCONOCIDO***	10.63	1,31
TOTAL	81.220	100,00

*Para las varillas continuas, se trabaja con unidades equivalentes, esto se refiere al valor de longitud usada de varilla continua (en pies) dividido entre el valor de la longitud de una varilla convencional (25ft).

**Special High Strength es un tipo especial de varilla, que como las UHS (de la empresa Tenaris) o las ELECTRA y T66XD (de la empresa Weatherford) tienen una composición especial diferente a los demás tipos, especial de cada empresa, pero siguiendo la norma API SEPC 11B.

*** Las varillas registradas como grado "Desconocido" se refieren a que no hay la suficiente información en los reportes para determinar el grado de varilla que se uso en la instalación inicial.

Tabla 12. Distribución de Diámetros de Varillas Instaladas en Completamientos Iniciales y Reactivaciones en el campo La Cira – Infantas.

DIAMETRO DE VARILLA	CANTIDAD (Unidades)	PORCENTAJE (%)
5/8"	152	0,19
3/4"	2.126	2,62
7/8"	29.923	36,84
1"	39.527	48,67
1 1/8"	2.337	2,88
1 1/4"	4.352	5,36
1 5/8" (SINKER BAR)	338	0,42
48.8 mm (PCPROD[®] 1000)	2.465	3,03
TOTAL	81.220	100,00

De acuerdo a las tablas, los grados con mayor porcentaje de instalación en el campo La Cira – Infantas fueron: Grado D (Carbon) y Grado *Special High Strength*, con porcentajes de 42,63% y 29,82% respectivamente; y los diámetros más usados fueron: 7/8” y 1”, con porcentajes de instalación de 36,84% y 48,67% respectivamente. Siendo 81.220 el total de varillas instaladas en el campo para completamientos iniciales y reactivaciones dentro del proyecto.

4.2. RECOPIACION DE LA INFORMACION DE FALLAS POR VARILLA PARA LOS POZOS DEL CAMPO

Una vez se completo la base de datos de información de varillas instaladas en el campo para completamientos y reactivaciones de pozos dentro del proyecto, fue necesario revisar los eventos de cada pozo para recolectar la información de fallas por varilla para el campo y generar otra base de datos, esto con el fin de realizar la estadística.

Teniendo todos los reportes de intervenciones en *Open Wells* como también el registro de intervenciones que se lleva en campo, se compararon y revisaron dichos reportes, en busca de fallas generadas por varillas, teniendo en cuenta que se toma como “falla por varilla” cuando la producción del pozo se ve afectada (se detiene o disminuye significativamente) debido al funcionamiento defectuoso de la sarta de varillas.

Al revisar los reportes tanto de campo como de *Open Wells* y comparando los datos que se encontraron, se puede afirmar que el total de fallas por varillas en el campo es de 474 fallas.

Para propósitos de este proyecto, se deben tener en cuenta todas las fallas de las cuales se tenga información certera de fechas de instalaciones e información de estado de la sarta al momento del completamiento inicial o reactivación; es por esto que inicialmente se pensó en usar solo los pozos registrados dentro del proyecto, puesto que estos pozos fueron intervenidos por OXY desde el inicio y se conoce su fecha de instalación y su estado inicial (nuevas).

Para estas fallas, se revisaron los eventos y se registró la siguiente información para cada uno:

- ✓ Zona en la que se encuentra el Pozo
- ✓ Estado actual del Pozo (a 31-Dic-11)
- ✓ Completamiento Inicial o Reactivación
- ✓ Fecha de Completamiento
- ✓ Sistema de Levantamiento (a 31-Dic-11)
- ✓ Fecha de Falla
- ✓ Profundidad de Falla
- ✓ Numero de Varilla Fallada
- ✓ Breve descripción de la falla
- ✓ Razón de Falla
- ✓ Diámetro de la Varilla Fallada
- ✓ Grado de la Varilla Fallada

- ✓ Fecha de Instalación de la Sarta
- ✓ Presencia de Centralizador en la Varilla Fallada y que Tipo
- ✓ Sistema de Levantamiento al momento de Falla
- ✓ Cambio o no de Varilla
- ✓ Cantidad de Varillas Cambiadas
- ✓ Diámetro de Varillas Cambiadas
- ✓ Grado de Varillas Cambiadas
- ✓ Caudal del Pozo al Momento de Falla
- ✓ Caudal Máximo de la Vida del pozo

Además del cálculo de un aproximado de *Runlife* (tiempo de vida útil) para la sarta de varillas en el campo, una de las finalidades de este proyecto es demostrar la efectividad de las inspecciones visuales de la sarta en campo. Para esto se va a separar en dos fases el análisis de las fallas.

4.2.1. Construcción de la Base de Datos de Pozos con Primeras, Segundas y Terceras Fallas

A medida que se iban revisando los reportes, se registraba el numero de falla por varilla para cada falla en cada pozo (Teniendo en cuenta solo las fallas por varillas). Con esta información, se construyo una base de datos, incluyendo para cada pozo (si las tenían), su primera, segunda y tercera falla, sacando un *Runlife* especial, el cual se toma desde la fecha de la primera falla hasta la fecha de la segunda falla (para segundas fallas) y entre la fecha de la segunda falla hasta la fecha de la tercera falla (para terceras fallas), y al cual a partir de ahora se le llamara: "*Runlife* entre Fallas". Esta base se elabora, con el fin de observar el tiempo que tarda la sarta en fallar por segunda o

tercera vez y evaluar la efectividad que tienen las inspecciones visuales que se realizan en campo.

Luego de revisar los datos, exhaustivamente, se encontraron en total de 356 fallas que comprenden las primeras, segundas y terceras fallas. El total de primeras fallas fue de 203, de segundas fallas fue de 95 y de terceras fallas fue de 58.

Anteriormente se había dicho que eran 726 pozos del proyecto adicional 6 pozos de la básica que se tienen en cuenta dentro de los cálculos; de estos pozos, 529 sin fallas por varilla, 108 con 1 sola falla por varilla, 37 con solo 2 fallas por varilla, 28 con solo 3 fallas por varilla y 30 con más de 3 fallas por varilla desde el año 2006 hasta Diciembre del 2011.

Para los pozos sin fallas, se registraran los mismos datos de los pozos fallados, exceptuando los datos de falla, y se clasifican en dos grupos:

- ✓ Pozos *Running*: Refiriéndose a los pozos que desde que se instalo la varilla, y que al 31-Dic-11 se encontraban activos, no tuvieron ninguna falla por varilla ni se había cambiado la sarta desde la primera instalación. Para estos pozos se tomara un *Runlife* relativo desde el momento de la instalación hasta el cierre de año del 2011.
- ✓ Pozos con Sarta Cambiada: Refiriéndose a los pozos, los cuales en algún momento de su vida productiva desde el 1-

Ene-06 al 31-Dic-11, hubo la necesidad del cambiar más del 50% de la sarta de varillas sin haber presentado ninguna falla por varilla. El *Runlife* para estos pozos se tomará desde el momento de la instalación de la varilla, hasta el momento del cambio de más del 50% de la sarta y para el valor del caudal, se registrara el máximo caudal que haya tenido el pozo hasta el momento del cambio de la sarta.

De los 529 pozos que se encontraron sin fallas, 393 pozos tienen aun la misma sarta que se les instalo en el completamiento inicial o reactivación (247 pozos con completamiento inicial y 146 reactivados), de estos 393 pozos, 321 aun se encontraban activos al 31-Dic-11 (siendo estos los pozos a los que se les llama "*Running*"), 67 pozos se encontraban inactivos, y 5 abandonados (los pozos inactivos o abandonados sin cambio de varilla no se toman en cuenta para las estadísticas). Los otros 136 pozos restantes sin fallas (76 pozos con completamiento inicial y 60 pozos reactivados), son pozos que en algún momento se les cambio la sarta de varillas sin haber fallado, es decir, entraron al pozo por algún otro evento, diferente de varilla, y encontraron evidencia de desgaste, la cual llevo a la decisión de cambia la sarta; De esos 136 pozos, 95 aun se encontraban activos al 31-Dic-11, 34 se encontraban inactivos y 7 abandonados.

4.2.2. Construcción de la Base de Datos Histórica de las Fallas Totales del Campo La Cira - Infantas

Con la información de fallas anteriormente recolectada, se creara otra base de datos, la cual incluirá todas las fallas por varilla del campo (Básica y Proyecto) con su respectivos datos, calculando un *Runlife* desde el momento de instalación de la varilla, hasta el momento de falla, sin importar si antes hubo o no, otra falla por varilla. Sera a partir de esta base de datos, de la cual nos basaremos para los principales análisis.

Una vez registradas todas las fallas por varilla en el campo desde el 2006, se obtuvo un total de 474 fallas, de las cuales 434 fallas que se dieron en 207 pozos del proyecto y 40 fallas que se presentaron en 20 pozos de la básica.

De las 40 fallas que se encontraron de pozos de la básica, solo 13 de ellas que se presentaron en 6 pozos, se pueden incluir en los cálculos, esto, debido a que no hay información para las otras 27 fallas sobre la fecha de instalación inicial de la sarta de varilla que fallo, las cuales se presentaron en 14 pozos.

5. DESARROLLO DEL ANALISIS ESTADISTICO

5.1. ANALISIS DE LAS PRIMERAS, SEGUNDAS Y TERCERAS FALLAS

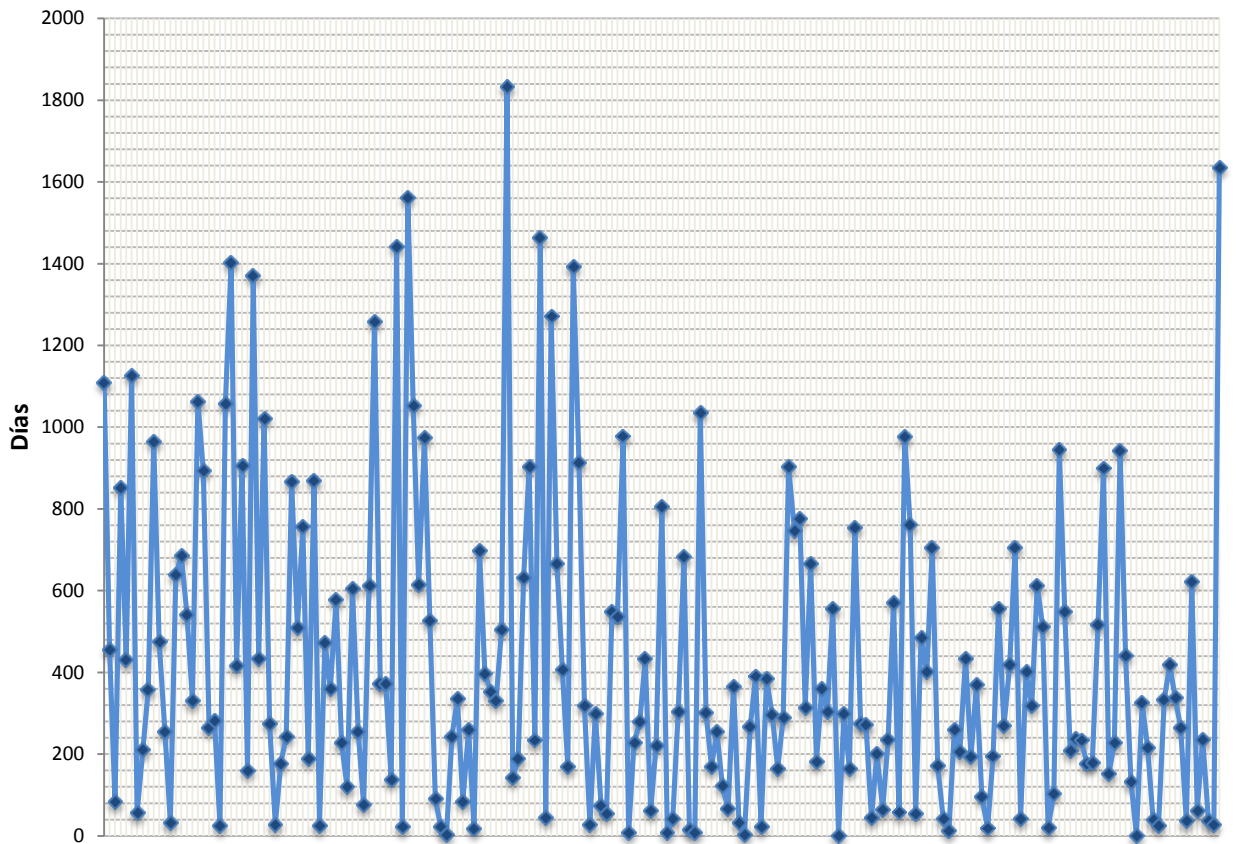
Una vez se tuvo lista la base de datos con todos los pozos del proyecto, se comenzó a sacar el promedio para el *Runlife* de las varillas en el campo. Se clasificaron los datos basados en diferentes criterios; primero, se clasifico por las zonas en las que se encuentran ubicados los pozos; luego se clasifico por sistema de levantamiento con el cual se encontraba produciendo en el momento de la falla; seguidamente se clasifico por diámetro y grado de la varilla que fallo; y por último, por la razón de falla, tomando 4 grupos principales para esta clasificación:

- ✓ Corrosión: Falla que fue causada debido a la presencia de agentes corrosivos. Esto es principalmente debido a que en el campo se encuentra en etapa de inyección de agua.
- ✓ Make Up: Aquella falla que se debió a razones ajenas a la varilla, como por ejemplo, una desconexión por el pin de la varilla.
- ✓ Rozamiento: Falla que se presenta por el contacto excesivo entre la tubería y la varilla, y principalmente se produce en pozos desviados.
- ✓ Operacional: Falla que se considera fue causada por procedimientos operacionales durante algún evento en el pozo, como el sobretorque.
- ✓ Otras: Dentro de esta categoría entran las fallas causadas por Accesorios, Fatiga de Material, Diseño, efecto combinado de Corrosión y Rozamiento y fallas a las que no se conoce la causa.

Estas son las clasificaciones que se usan en campo para los reportes de falla. A partir de principios de año del 2010 se empezaron a hacer informes detallados de fallas para el campo y las clasificaciones de las fallas son 100% confiables de la base de datos, sin embargo para los años anteriores, para algunas fallas, no hay casi información para determinar cuáles fueron las causas de estas, es por eso que se la causa de falla no era clara, se pasaba a revisar el *Survey* del pozo y si el valor del *Dog Leg Severity* para la profundidad de falla era mayor a 1, la razón de falla se tomaba como Rozamiento, de no ser así y no indicar tampoco alguna otra evidencia de razón de falla, se clasificaba como Desconocido.

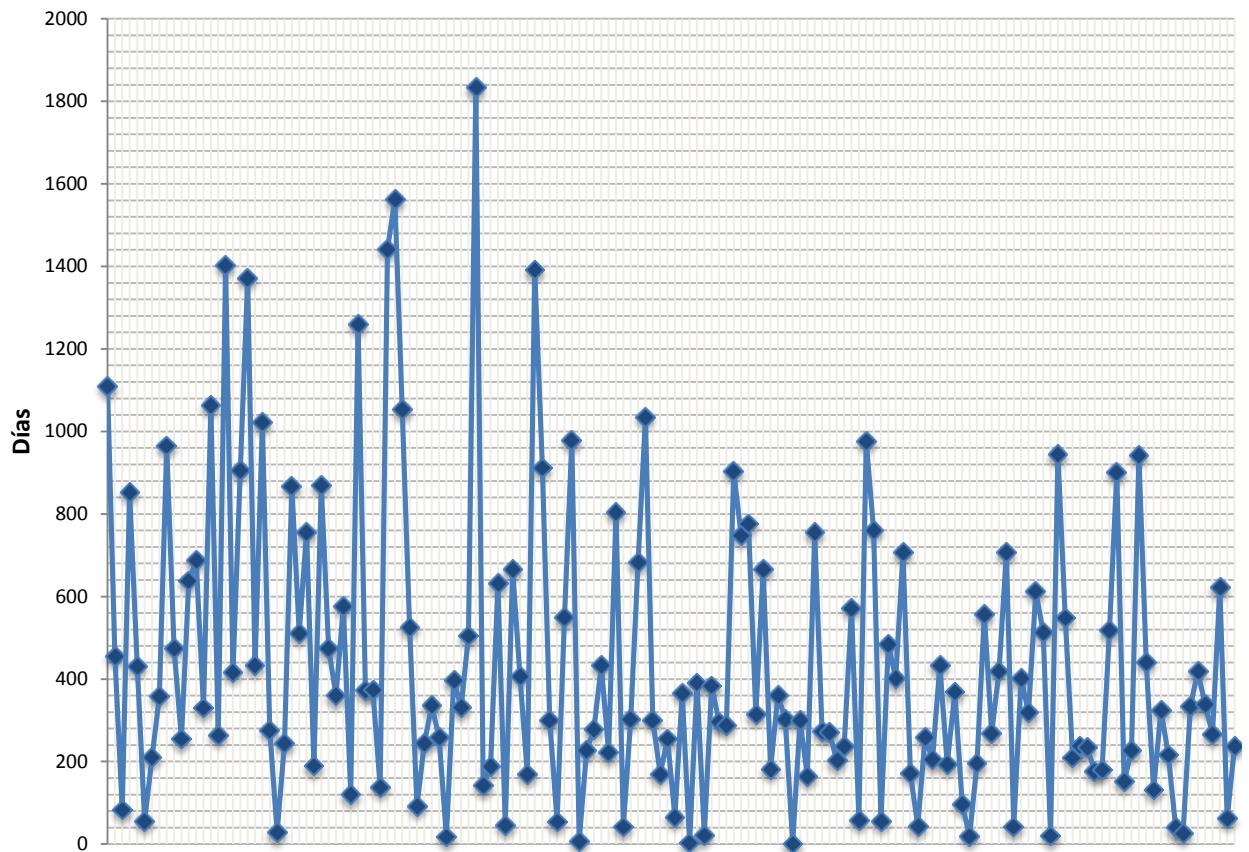
Se tomaron los datos de *Runlife* calculados y se crearon graficas tanto para primeras, como segundas y terceras fallas para intentar observar las tendencias y se calcularon promedios. Primero se usaron todos los datos disponibles, luego se censuraban removiendo las fallas clasificadas como *Make Up* (Estas fallas no se toman en cuenta ya que son fallas que se consideran ajenas a las varillas y no se puede culpar a estas por la falla) y por Accesorios (Fallas que no son directamente en las varillas, sino en alguna conexión) y se graficaban de nuevo los datos calculando nuevamente el promedio.

En la Figura 24 se muestra la grafica en la que se incluyen todos los datos de *Runlife* calculados para las primeras fallas. En esta grafica se observa que a pesar de que no se sigue ninguna tendencia, la mayoría de los valores se concentran entre los 200 y los 400 días para el *Runlife*. Se observa también que hay valores que se encuentran fuera de las proporciones comunes, encontrando valores por encima de los 1000 días, como también valores muy bajos cercanos a 0, los cuales causan que el promedio se disperse bastante.

Figura 24. Grafica de *Runlife* para las Primeras Fallas.

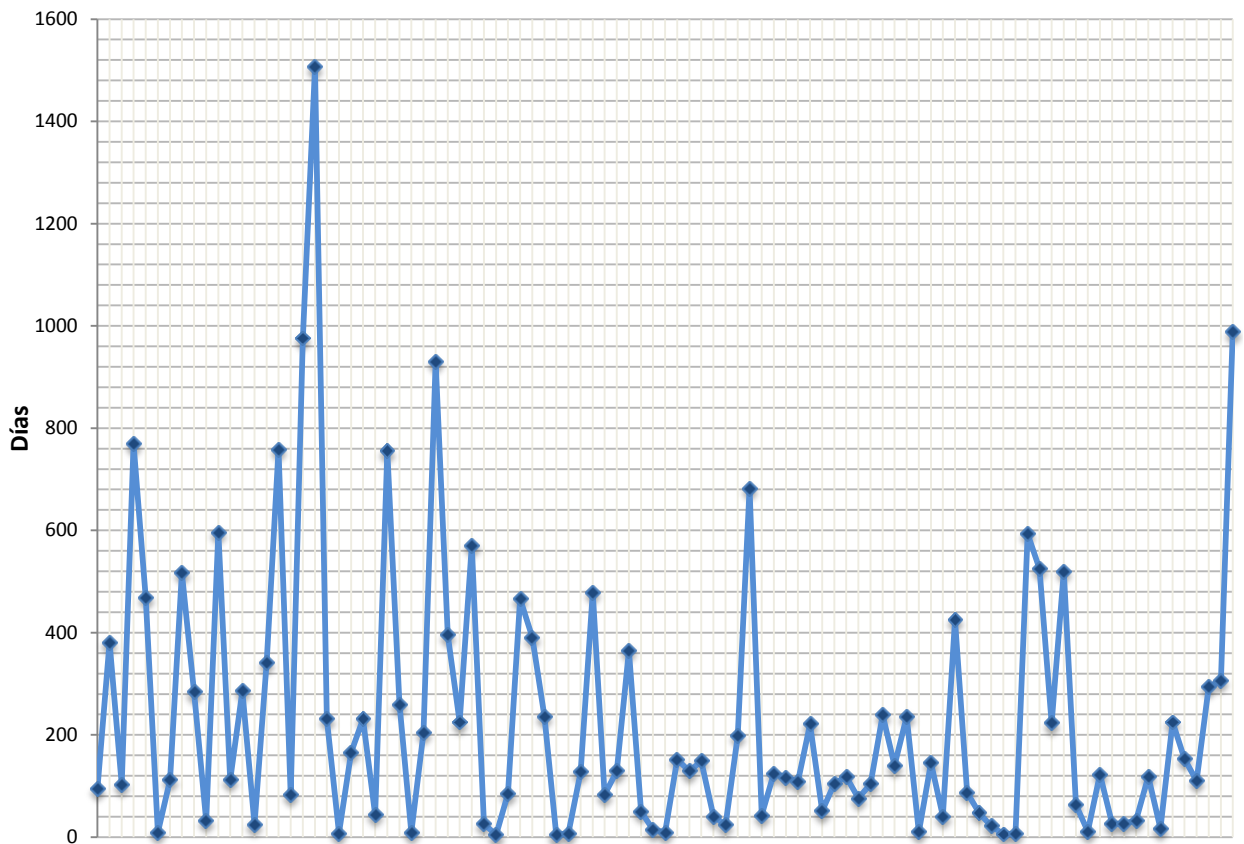
Tomando para el cálculo el total de primeras fallas, siendo este, 203 fallas y sacando un promedio, se obtuvo un valor de *Runlife* para primeras fallas de 417 días.

Debido a que las fallas clasificadas como fallas por *Make Up* se consideran fallas ajenas a la varilla, estas no se deben tener en cuenta para el cálculo del *Runlife* definitivo. En la Figura 25 se observa la gráfica de *Runlife* censurado (sin contar las fallas por *Make Up* o Accesorios).

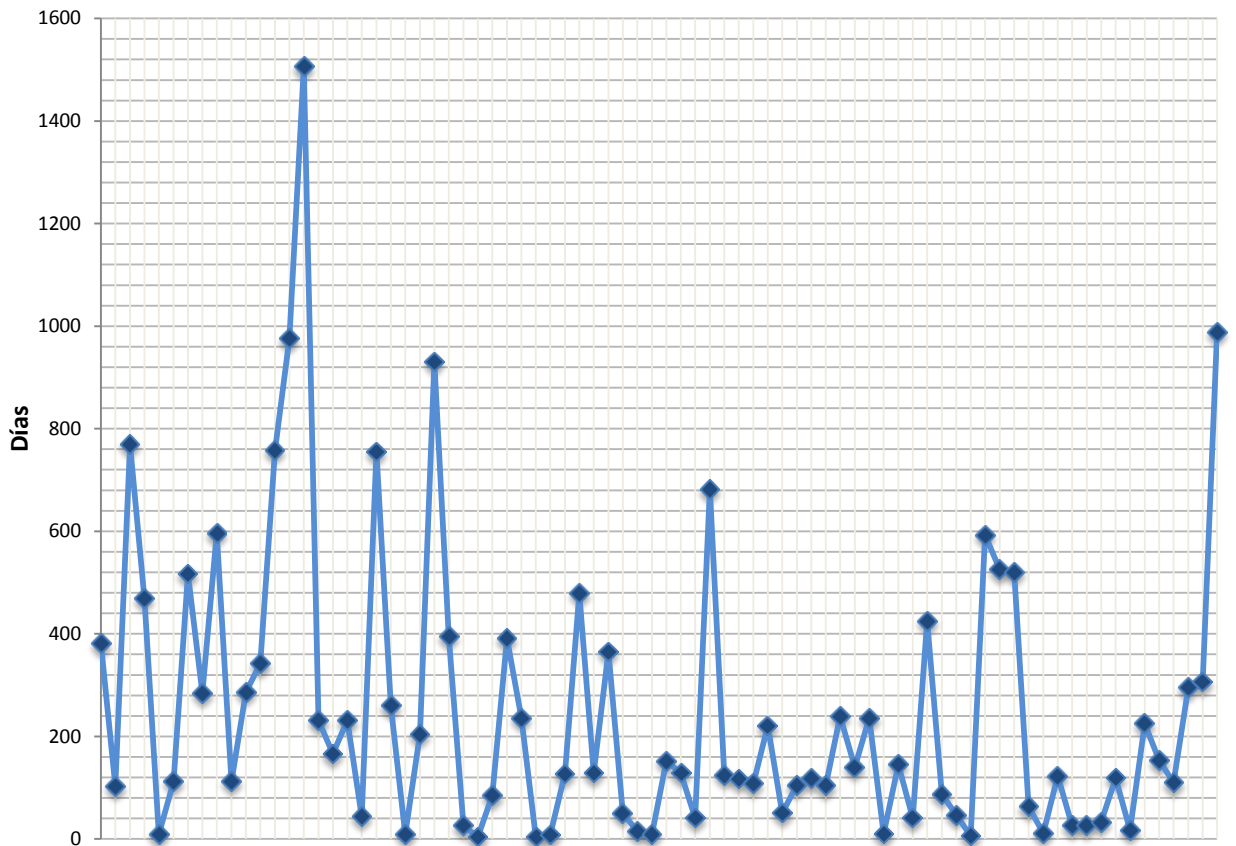
Figura 25. Grafica de *Runlife* para las Primeras Fallas Censurado.

Sacando el promedio, una vez se censuro la cantidad de pozos, eliminando los valores para fallas por *Make Up*, se obtuvo un valor de 450 días para las primeras fallas, teniendo en cuenta que para el cálculo de este valor, se usaron 150 datos de fallas.

Se realizó el mismo procedimiento para las segundas y terceras fallas. En la Figura 26 se observa el *Runlife* para segundas fallas con el total de datos. En la Figura 27 se observa el *Runlife* con los datos censurados, eliminando las fallas por *Make Up*.

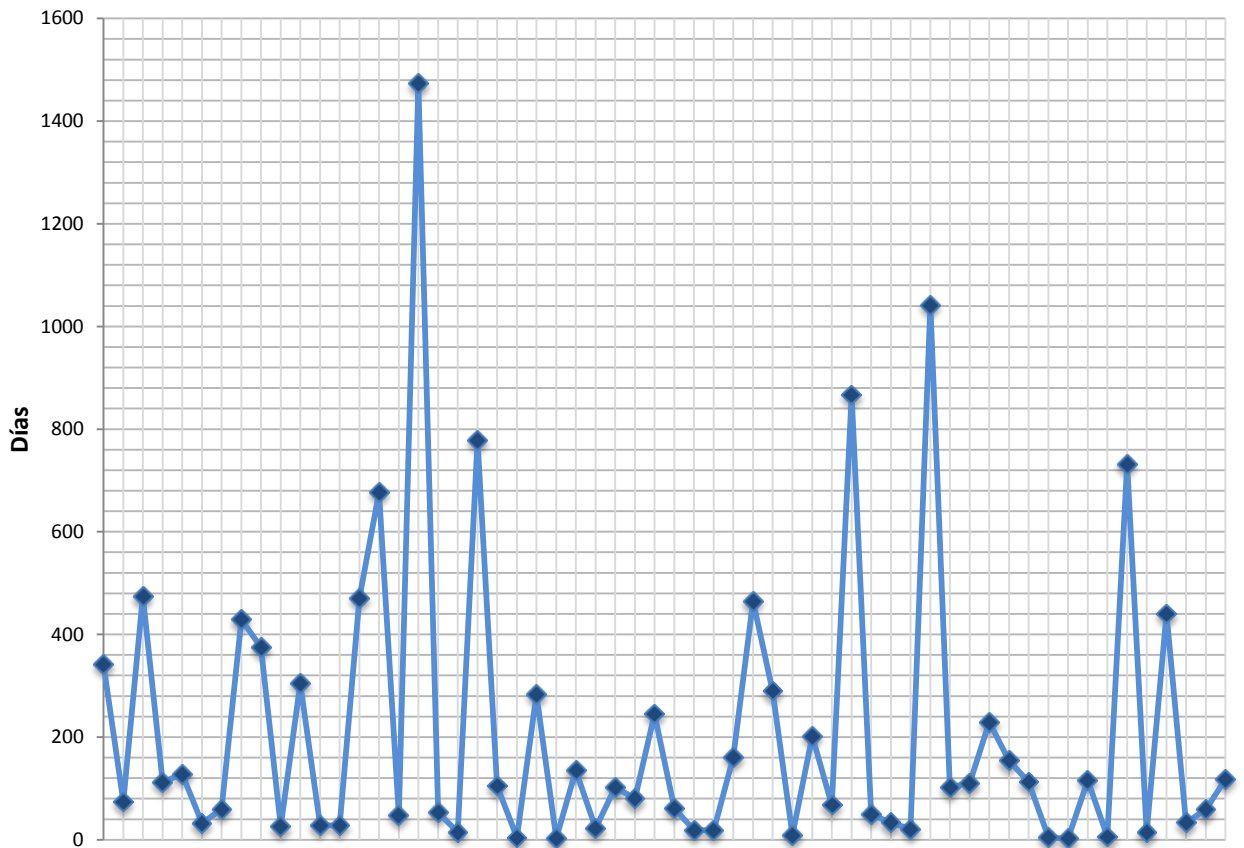
Figura 26. Grafica de *Runlife* para el Total de Segundas Fallas.

Para las segundas fallas, en el cálculo se incluyeron los valores de *Runlife* del total de segundas fallas, siendo este total 95 fallas, obteniendo un valor de *Runlife* promedio de 233 días.

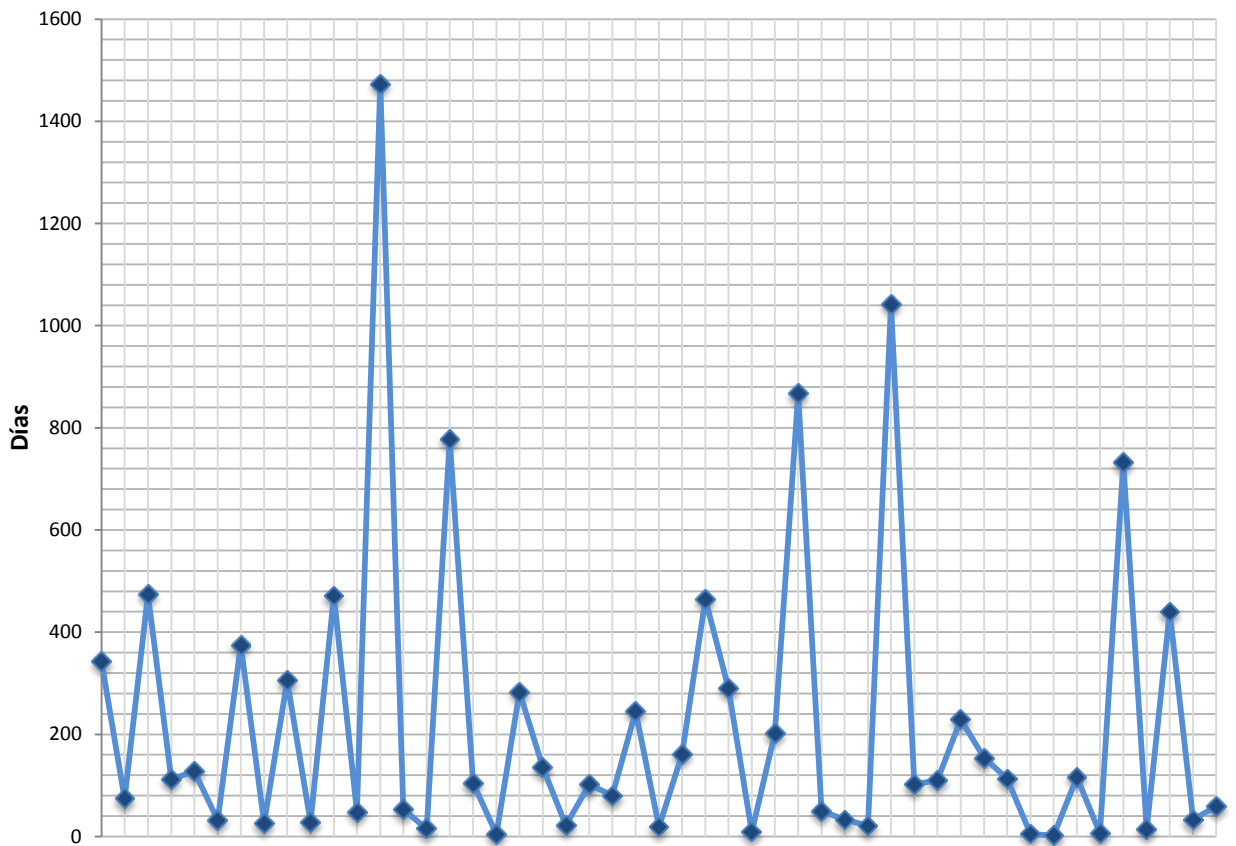
Figura 27. Grafica de *Runlife* para Segundas Fallas Censurado.

Para este cálculo de *Runlife* entre fallas censurado, para segundas fallas, se incluyeron 75 datos de falla, obteniendo un valor de *Runlife* promedio de 252 días.

En la Figura 28 se observa la gráfica de *Runlife* entre fallas, para los valores de terceras fallas y para el total se tuvieron en cuenta 58 datos de falla.

Figura 28. Grafica de *Runlife* para el Total de Terceras Fallas.

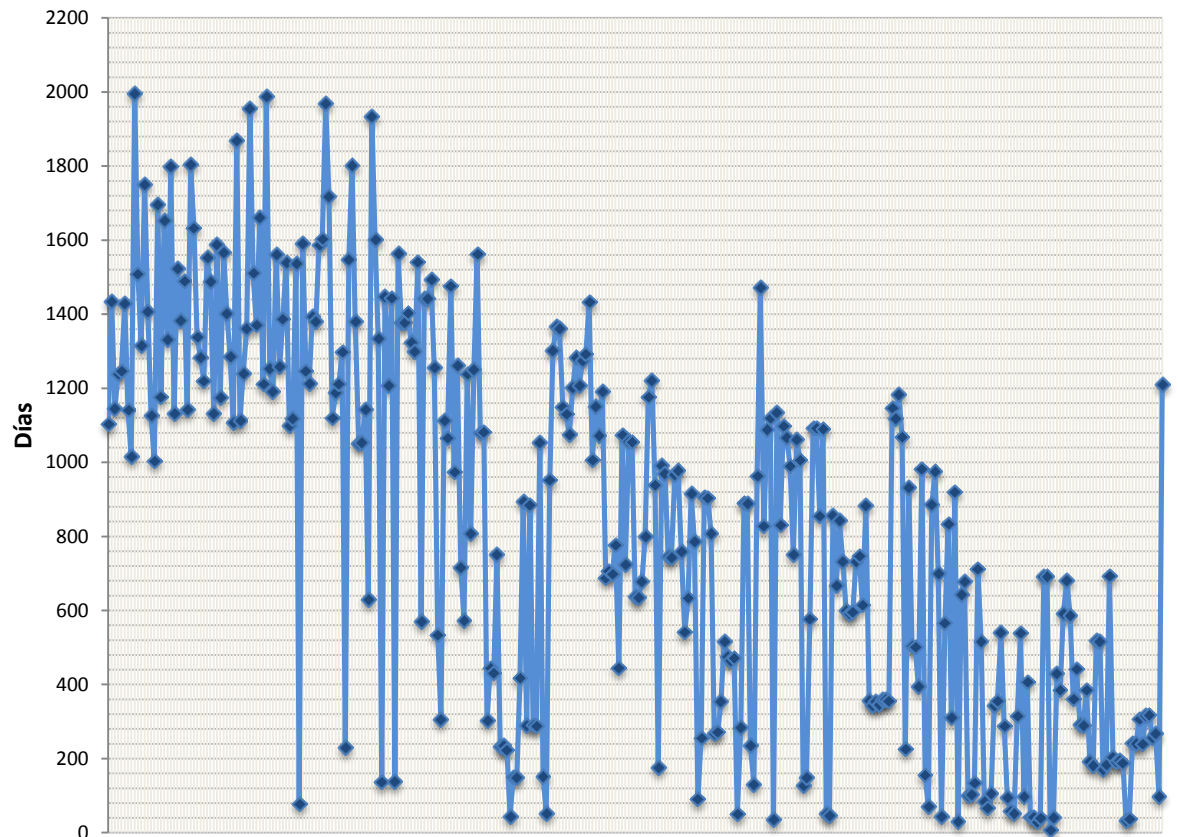
Se obtuvo un valor de *Runlife* promedio de 180 días. En la Figura 29 se observa la grafica censurada para las terceras fallas, eliminando las fallas por *Make Up* y teniendo en cuenta 44 datos de fallas.

Figura 29. Grafica de *Runlife* para Terceras Fallas Censurado.

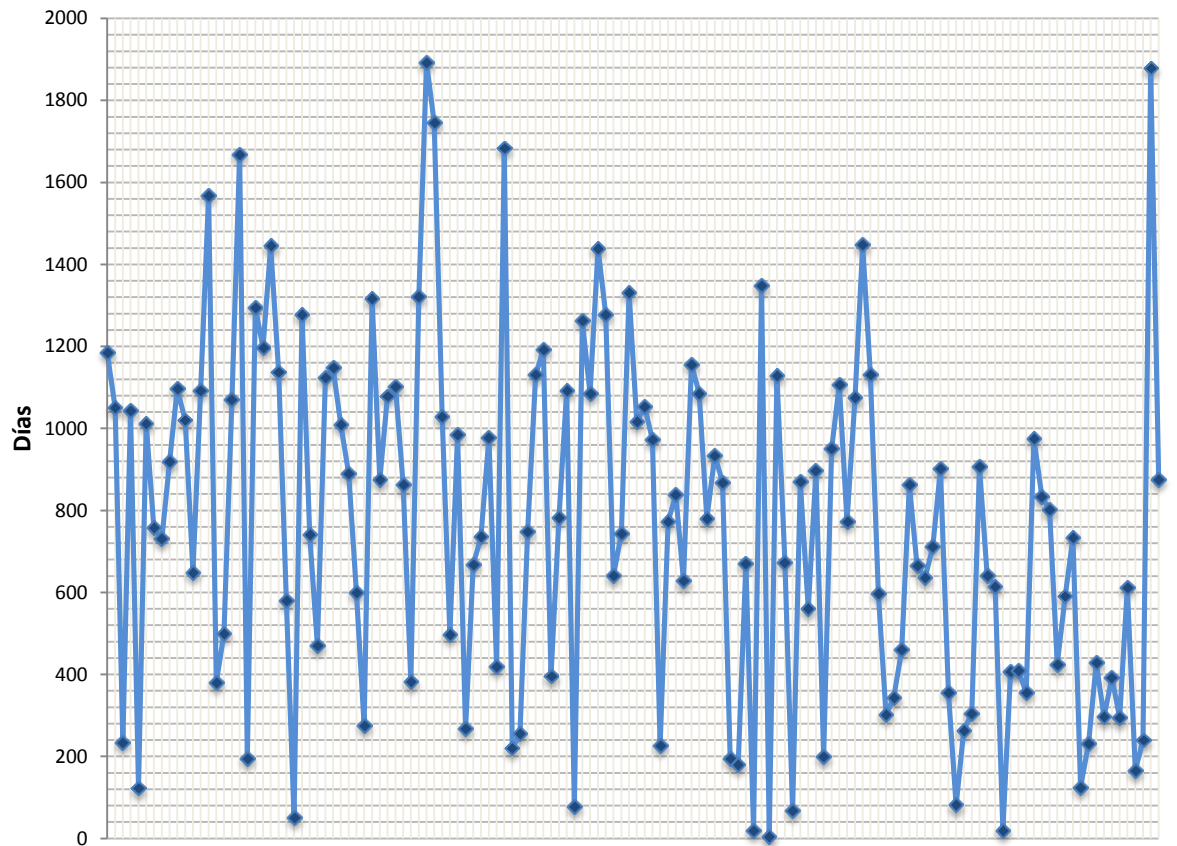
Se obtuvo un valor de *Runlife* promedio de 166 días. Como se había comentado antes, para los pozos que no tuvieron fallas, también se saca un valor promedio de *Runlife* relativo, separándolos en 2 grupos; el primero, los pozos *Running*, para los cuales se calcula el *Runlife* entre el momento de la instalación de la sarta hasta la fecha del 31-Dic-11; el otro grupo, los pozos con sarta cambiada, para los cuales el *Runlife* se tomara desde el momento de instalación de la sarta de varillas hasta el momento del cambio de más del 50% de ella; y para estos dos se les llamara *Runtime* en vez de *Runlife*, ya que no hubo falla.

Para las Figuras 30 y 31 se observan las graficas de los valores de *Runtime* calculados para estos pozos.

Figura 30. Grafica de *Runtime* para Pozos *Running*.



Tomando para el cálculo, 321 valores de *Runtime* de los pozos *Running*, y obteniendo un valor promedio de 837 días. Los valores bajos de *Runtime* en esta grafica se deben a los pozos que fueron inicialmente completados en el año 2011.

Figura 31. Grafica de *Runtime* para Pozos con Sarta Cambiada.

Tomando para el cálculo 136 valores de *Runtime* de pozos con sarta cambiada y obteniendo un valor promedio de 768 días.

Con el fin de analizar los datos que se obtuvieron, se elaboraron graficas, separando los datos por zonas, por diámetro y grado de la varilla fallada, y por razones de falla.

5.1.1. Análisis por Zona

Es importante para este estudio conocer qué zona o área del campo es la que se encuentra fallando más. Para esto, se construyeron graficas que facilitaran el análisis. En las Figuras 32, 33 y 34 se observan las distribuciones y numero de primeras, segundas y terceras fallas para cada zona.

Figura 32. Distribución de Primeras Fallas para cada Zona.

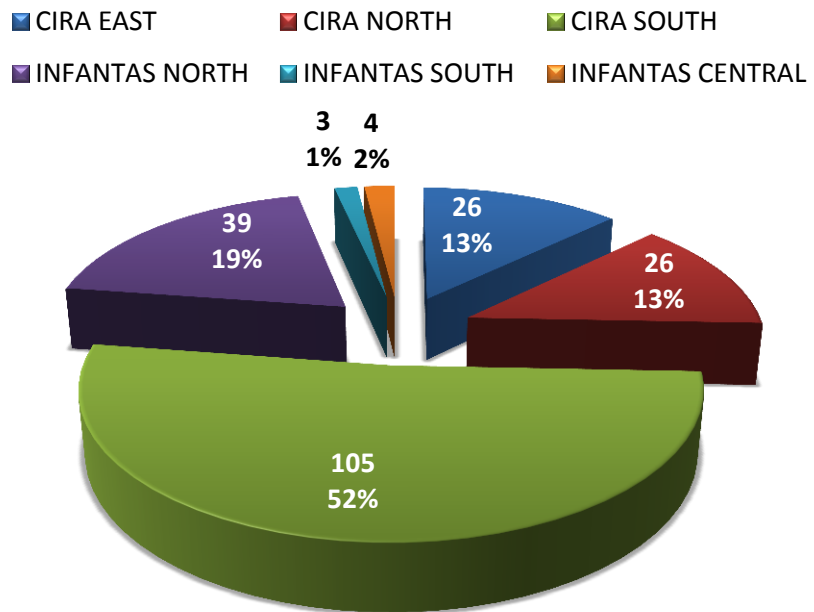


Figura 33. Distribución de Segundas Fallas para cada Zona.

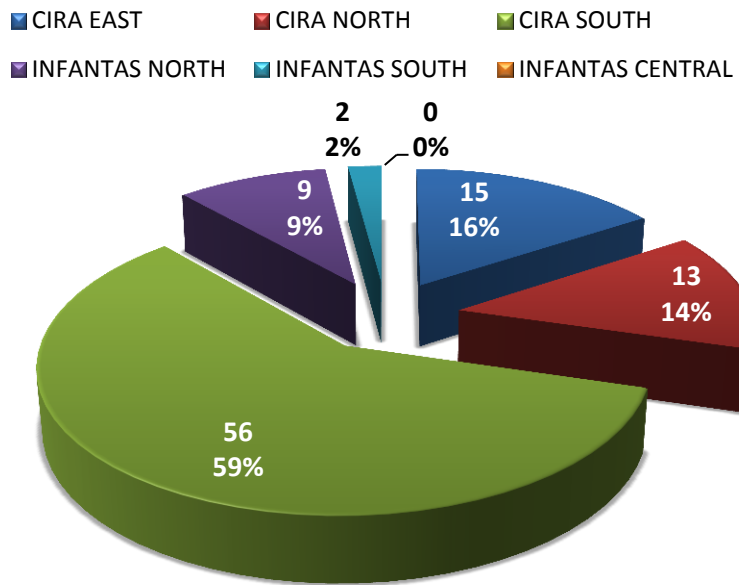
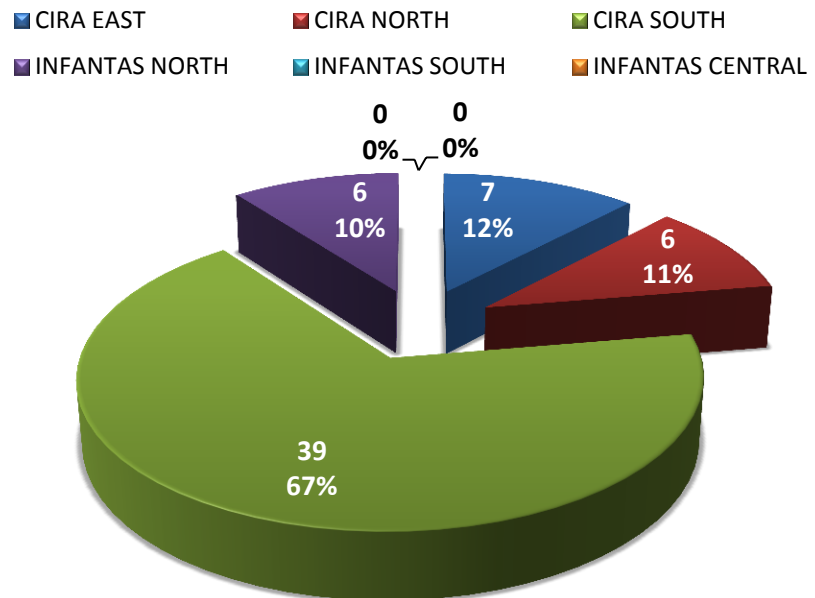
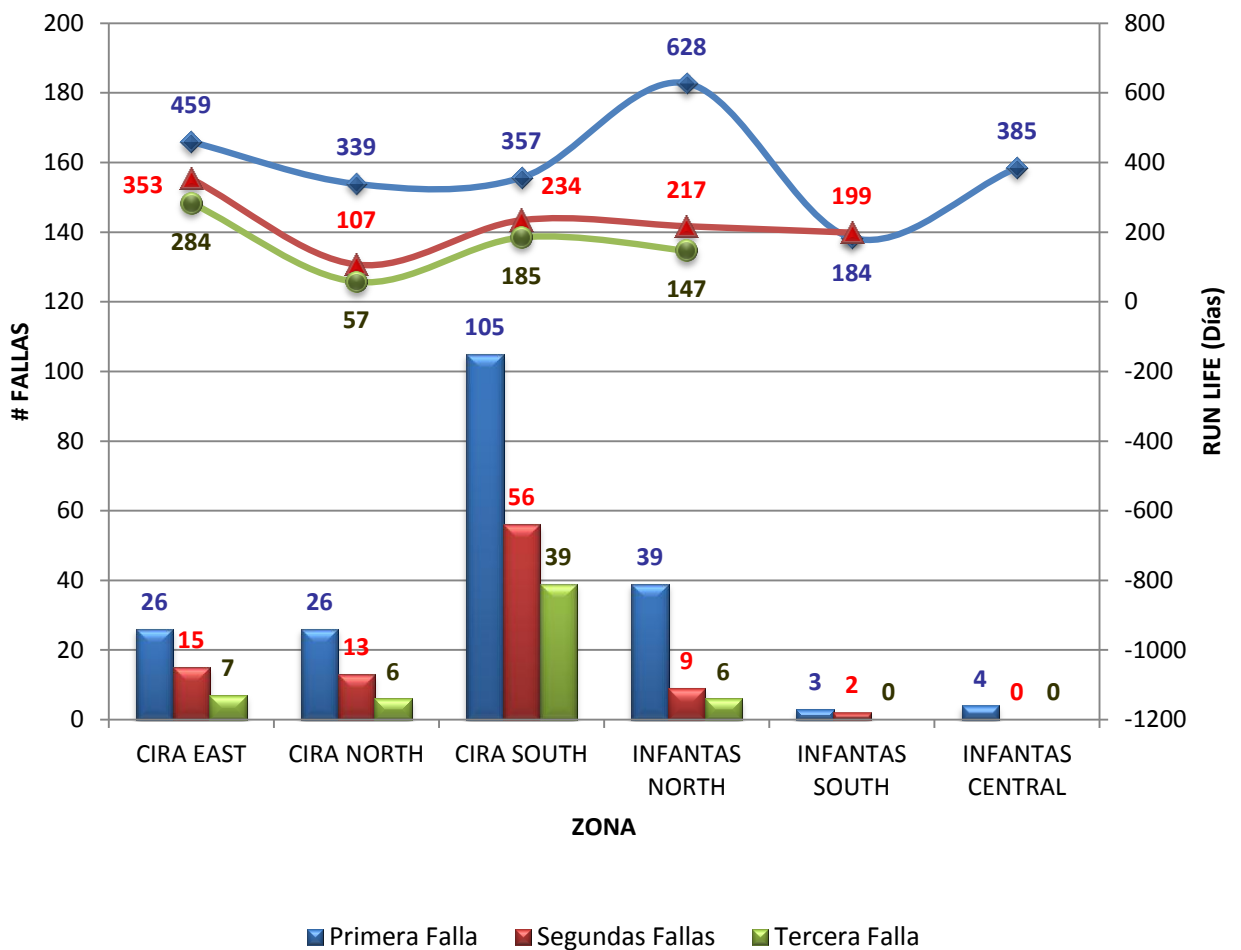


Figura 34. Distribución de Terceras Fallas para cada Zona.



En la Figura 35 se observa la distribución de las fallas, tanto primeras como segundas y terceras de acuerdo a la zona en la que se encuentran ubicados los pozos con su respectivo promedio de *Runlife*.

Figura 35. Distribución de Primeras, Segundas y Terceras Fallas por Zona con *Runlife* Promedio.

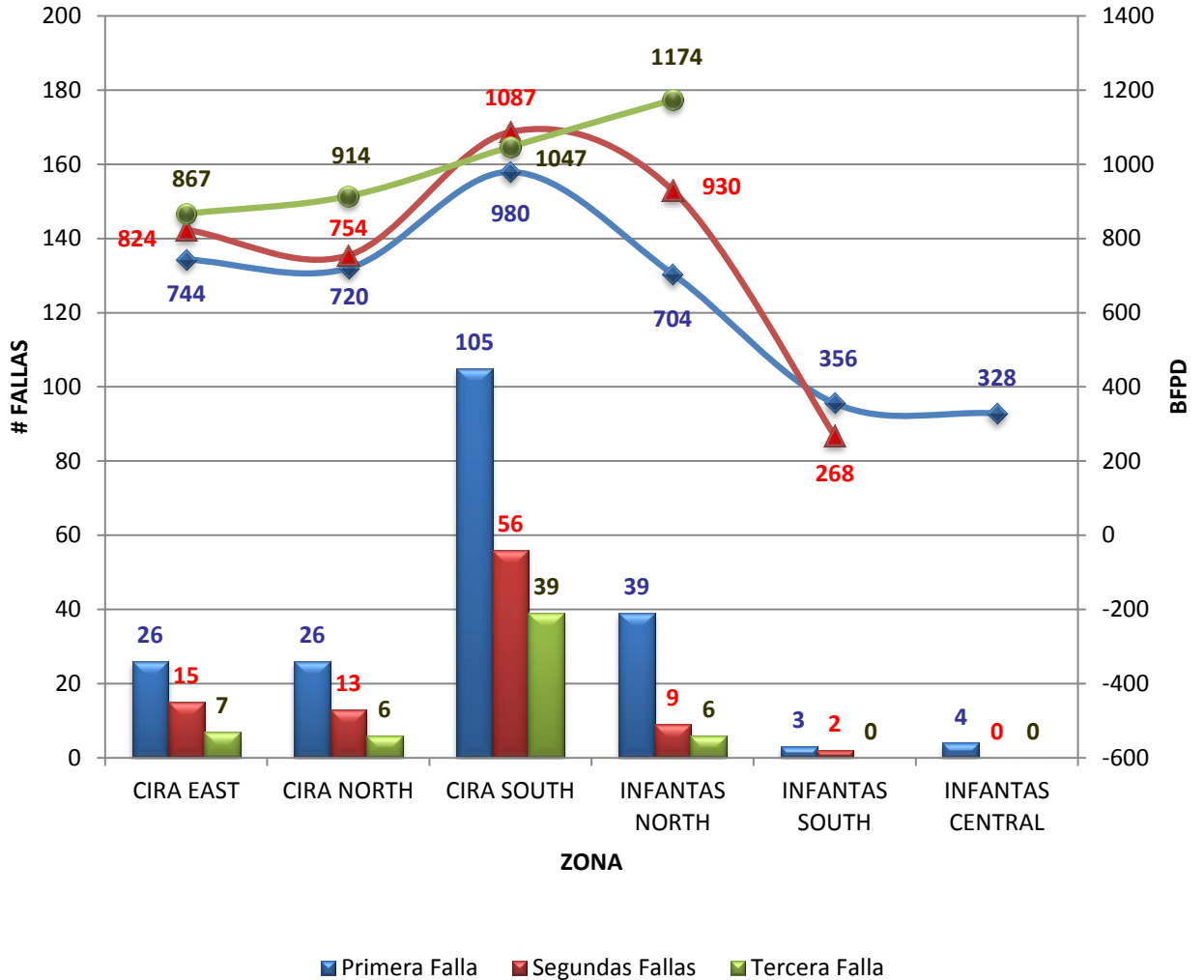


Estas últimas graficas nos muestran que la zona que mayor proporción de fallas tuvo fue CIRA SOUTH, sin embargo, es proporcional a la cantidad de pozos que se encuentran allí, teniendo esta zona la mayor población y la mayor producción. Lo contrario se observa en INFANTAS CENTRAL, la cual tiene pocas fallas pero su proporción de pozos ubicados allí es mucho menor, por lo que se puede afirmar que el número de fallas coincide con la población de cada zona.

También se puede observar que los valores de promedios de *Runlife* son mucho menores para las segundas y terceras fallas, teniendo estos valores consecuencia, puesto que se pudo haber realizado una inspección visual muy regular, causando así una falla prematura luego de haber fallado por primera vez.

En la Figura 36 se observa la distribución de caudales para cada zona, en las primeras, segundas y terceras fallas, teniendo en cuenta el mayor valor de caudal para cada pozo hasta el momento de la falla, esto con el fin de conocer cuál fue la mayor carga soportada por la sarta de varillas.

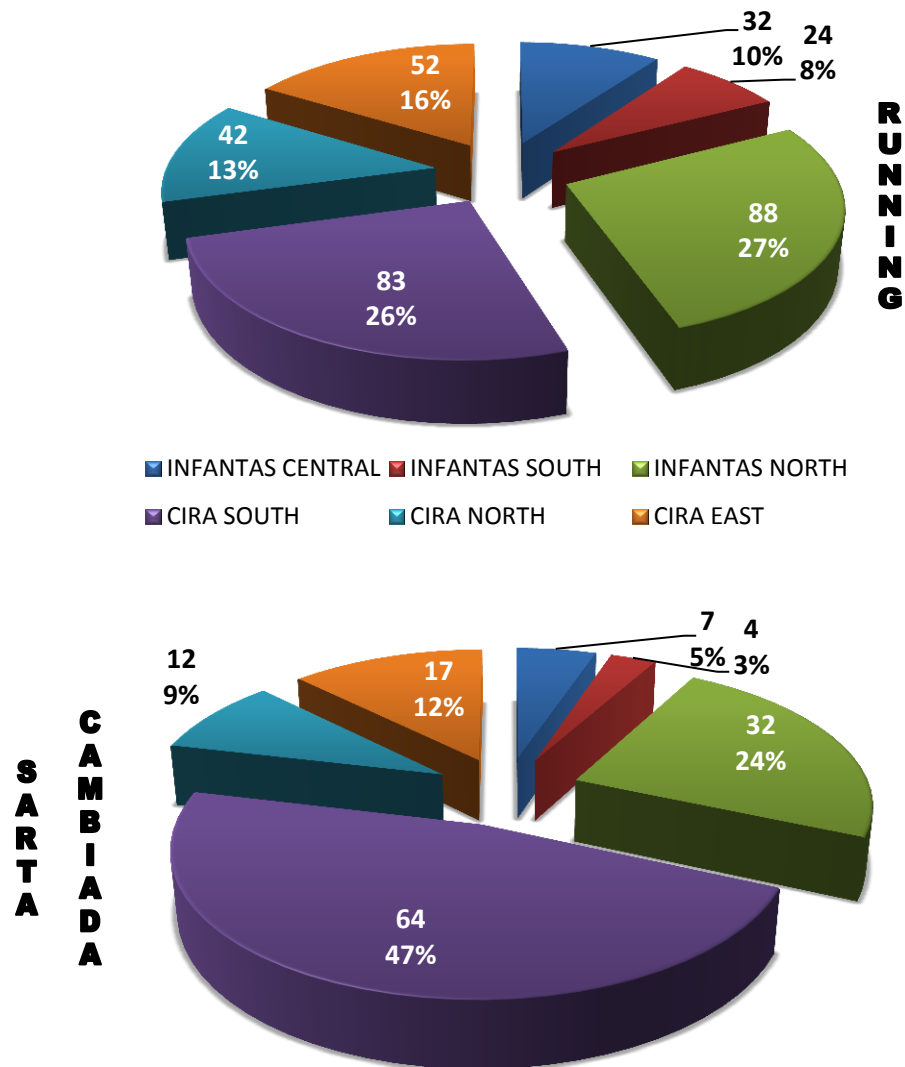
Figura 36. Distribución de Primeras, Segundas y Terceras Fallas por Zona con Caudales Promedio.



En la grafica se nota claramente como el caudal promedio aumenta para cada zona a medida que pasa de la primera a la segunda falla y de la segunda a la tercera, esto es consecuente con la historia del campo, puesto que en los últimos años se han implementado métodos de recuperación secundaria en el, como la inyección de agua, lo cual ha generado un aumento en la producción diaria.

Para los pozos sin fallas, podemos observar la distribución de estos por zonas en la Figura 37.

Figura 37. Distribución de Pozos *Running* y con Sarta Cambiada por Zona.



En las Figura 38 y 39 observamos dos graficas para los pozos *Running* en comparación con las fallas, la primera es una comparación del *Runlife* de las fallas con el *Runtime* de los pozos *Running*; la

segunda es una comparación de los caudales de fallas y los pozos *Running*.

Figura 38. Comparación de *Runlife* (*Runtime*) para Pozos *Running* y Pozos Fallados.

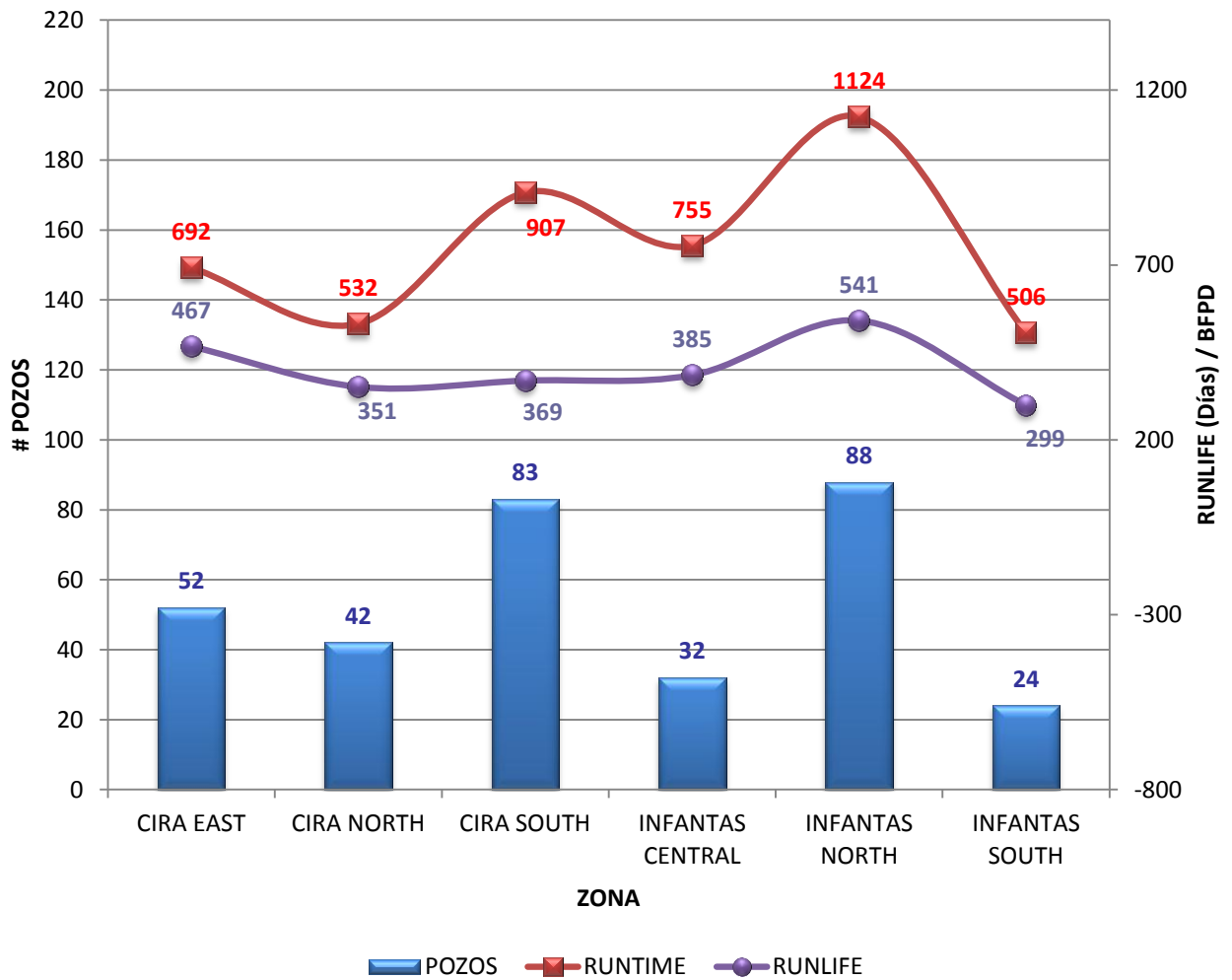
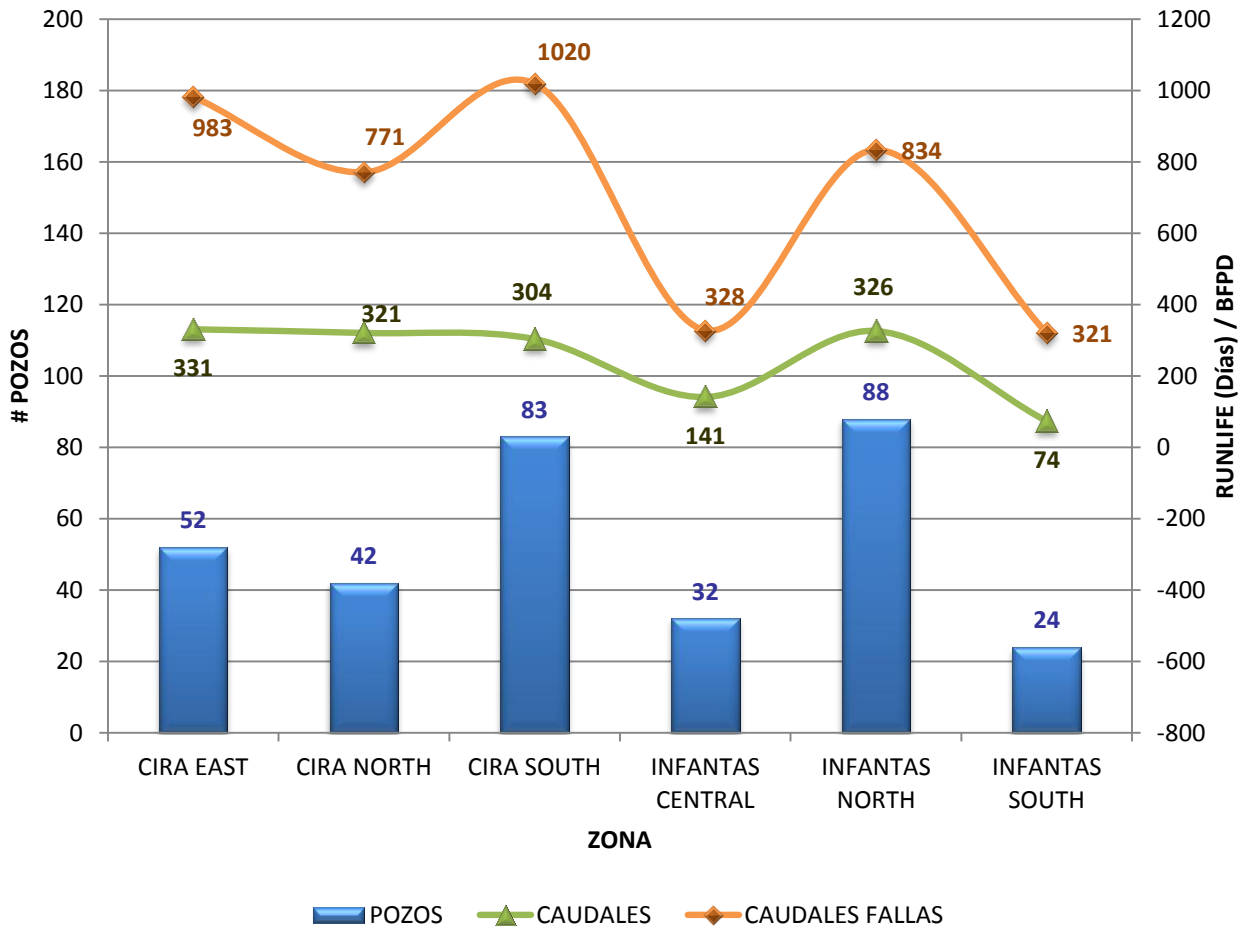


Figura 39. Comparación de Caudales para Pozos *Running* y Pozos Fallados.



Para estas graficas se observa que el *Runlife* de los pozos fallados se encuentra muy por debajo de la curva de *Runtime* de los pozos *Running*, siendo consistente con la información de la siguiente grafica, ya que los caudales de los pozos fallados se encuentra por encima de la curva de caudales de los pozos *Running*, corroborando la hipótesis que se trabajaba en campo, que a mayor caudal, menor *Runlife*.

Ahora, en las Figuras 40 y 41 se observan las mismas graficas de comparación para los pozos con Sarta Cambiada, que se hicieron para los pozos *Running* anteriormente.

Figura 40. Comparación de *Runlife (Runtime)* para Pozos con Sarta Cambiada y Pozos Fallados.

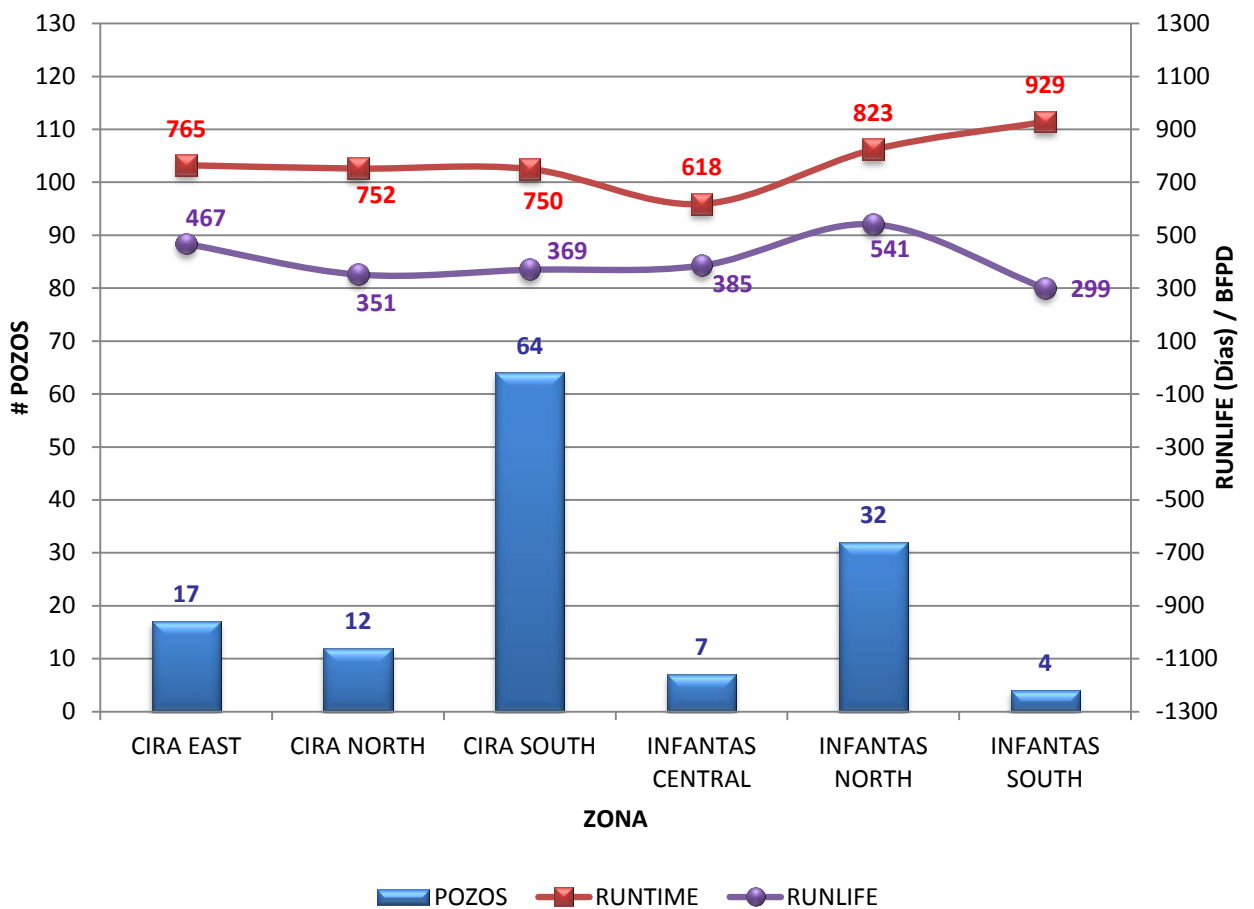
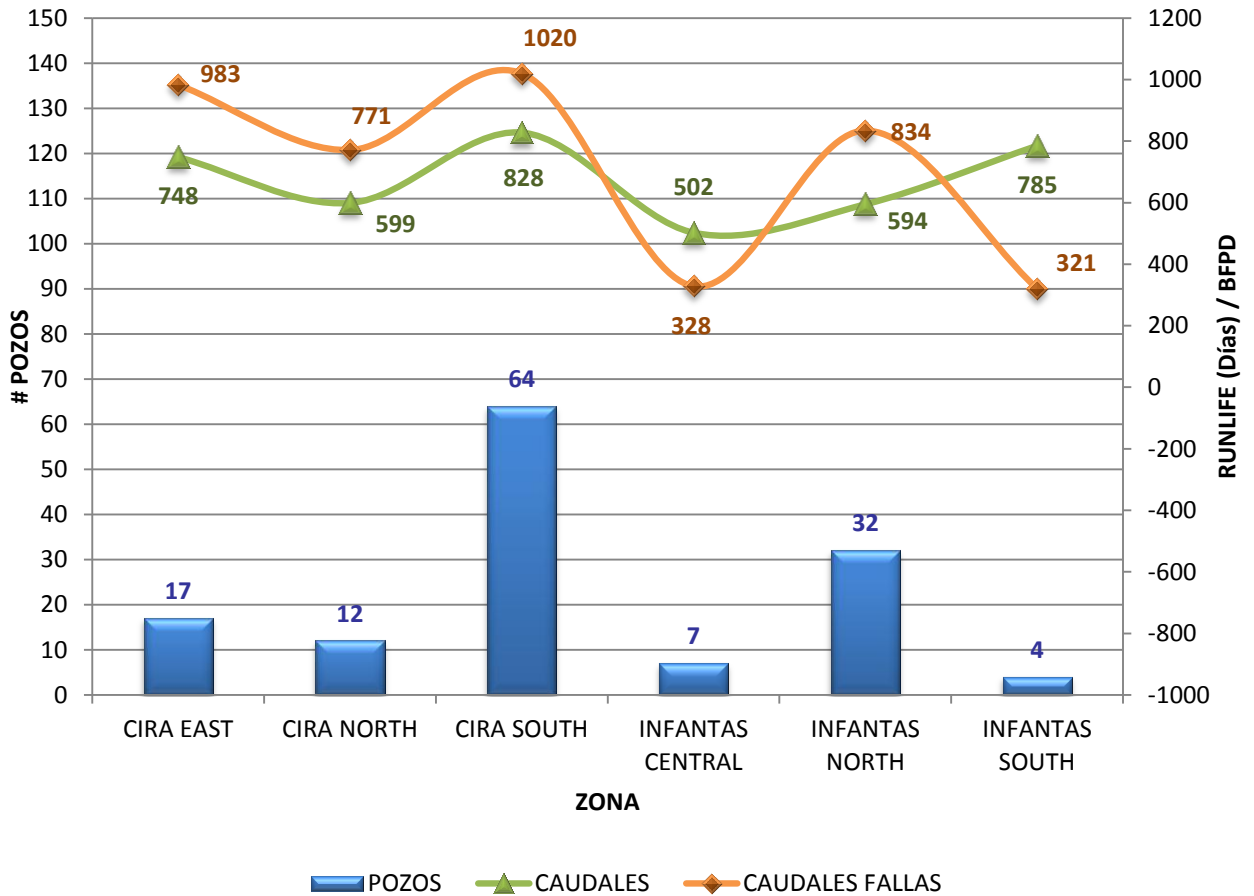


Figura 41. Comparación de Caudales para Pozos con Sarta Cambiada y Pozos Fallados.



Para estos pozos observamos que los valores tanto de Runlife como de caudales se encuentran cercanos a los de los pozos fallados esto significando, que si la sarta no se hubiera cambiado, estos pozos hubieran fallado muy pronto.

5.1.2. Análisis por Razón de Falla

Ya se habían especificado las razones por las que se clasifican las fallas y en las Figuras 42, 43 y 44 se observa la distribución de las para primeras, segundas y terceras falla, de las razones de falla.

Figura 42. Distribución de Razones para Primeras Fallas.

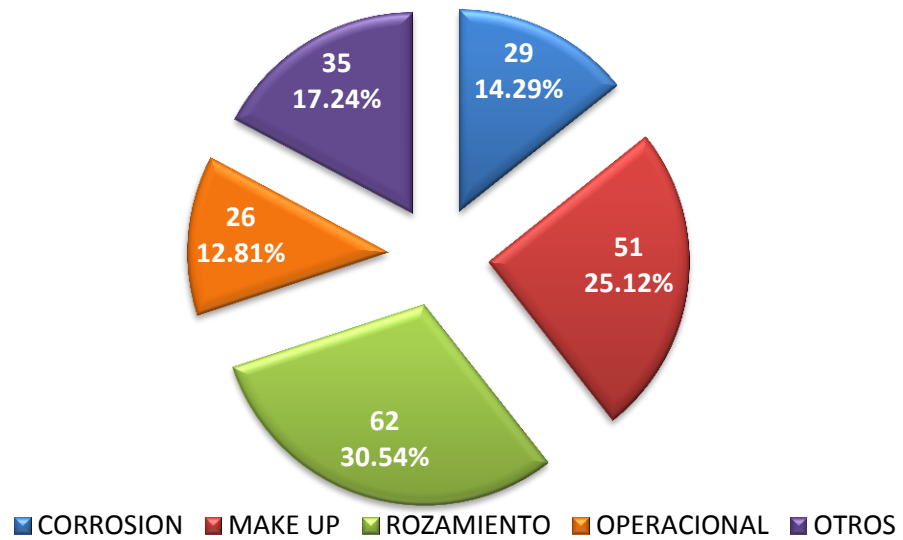


Figura 43. Distribución de Razones para Segundas Fallas.

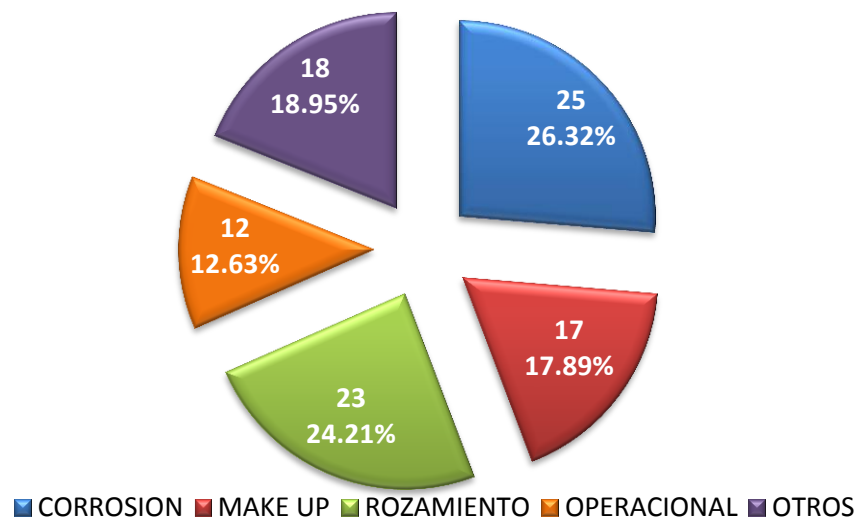
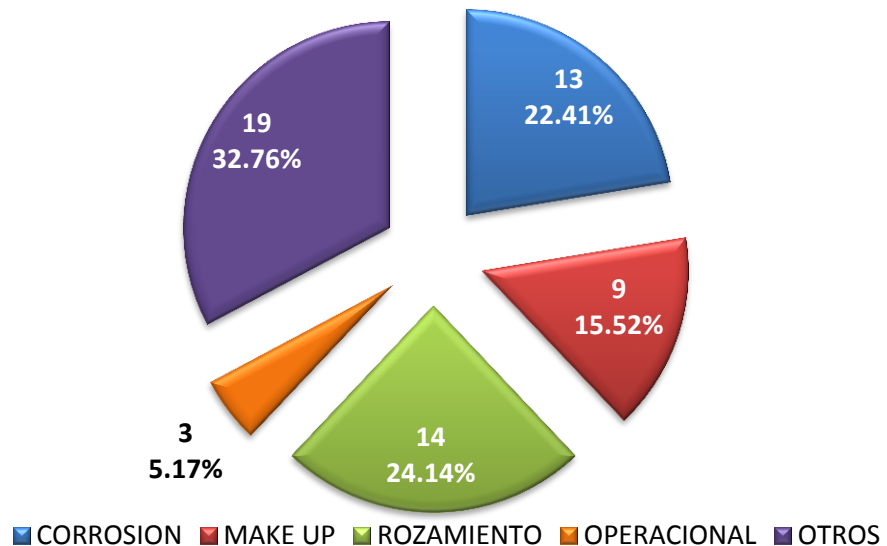
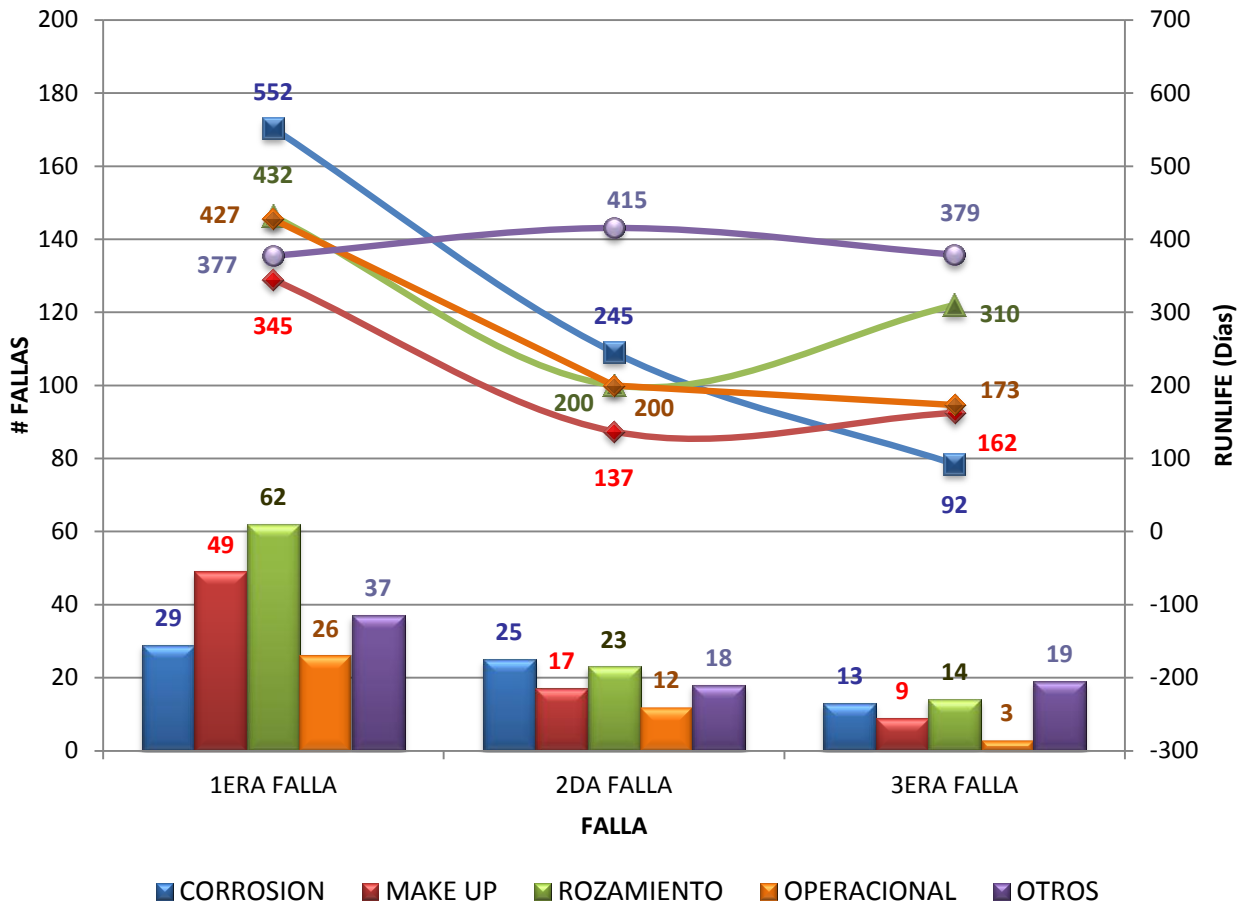


Figura 44. Distribución de Razones para Terceras Fallas.

Según las graficas que se presentan, la razón de fallas más frecuente es el rozamiento, esto es debido a que la mayoría de los pozos del campo poseen desviación.

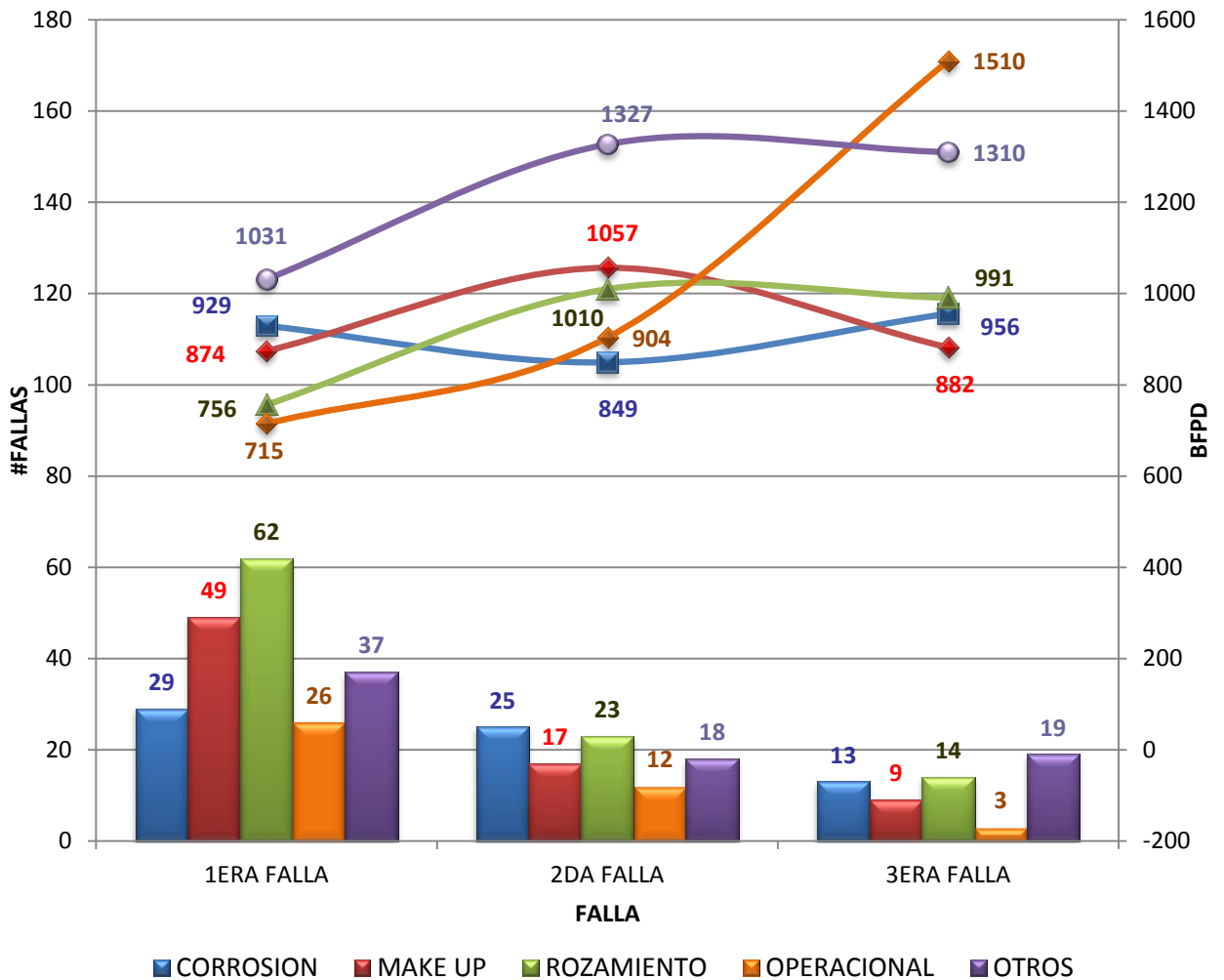
En la Figura 45 se observan los diferentes promedios de caudales para cada razón de falla, separándolos para primeras, segundas y terceras fallas. Luego, en la Figura 46 se observan los promedios de caudales para cada razón de falla, separando los datos también para primeras, segundas y terceras fallas.

Figura 45. Distribución de Razones para Primeras, Segundas y Terceras Fallas con *Runlife*.



En esta grafica se evidencia como para la mayoría de las razones de fallas, el promedio de *Runlife* disminuye significativamente desde la primera falla a la segunda y tercera. De las razones de falla que mayor promedio de *Runlife* tiene es la Corrosión ya que esta toma su tiempo en hacer efecto y en los últimos años ha ido aumentando ya que la inyección de agua en el campo es cada vez más frecuente como método de recobro.

Figura 46. Distribución de Razones para Primeras, Segundas y Terceras Fallas con Caudales.



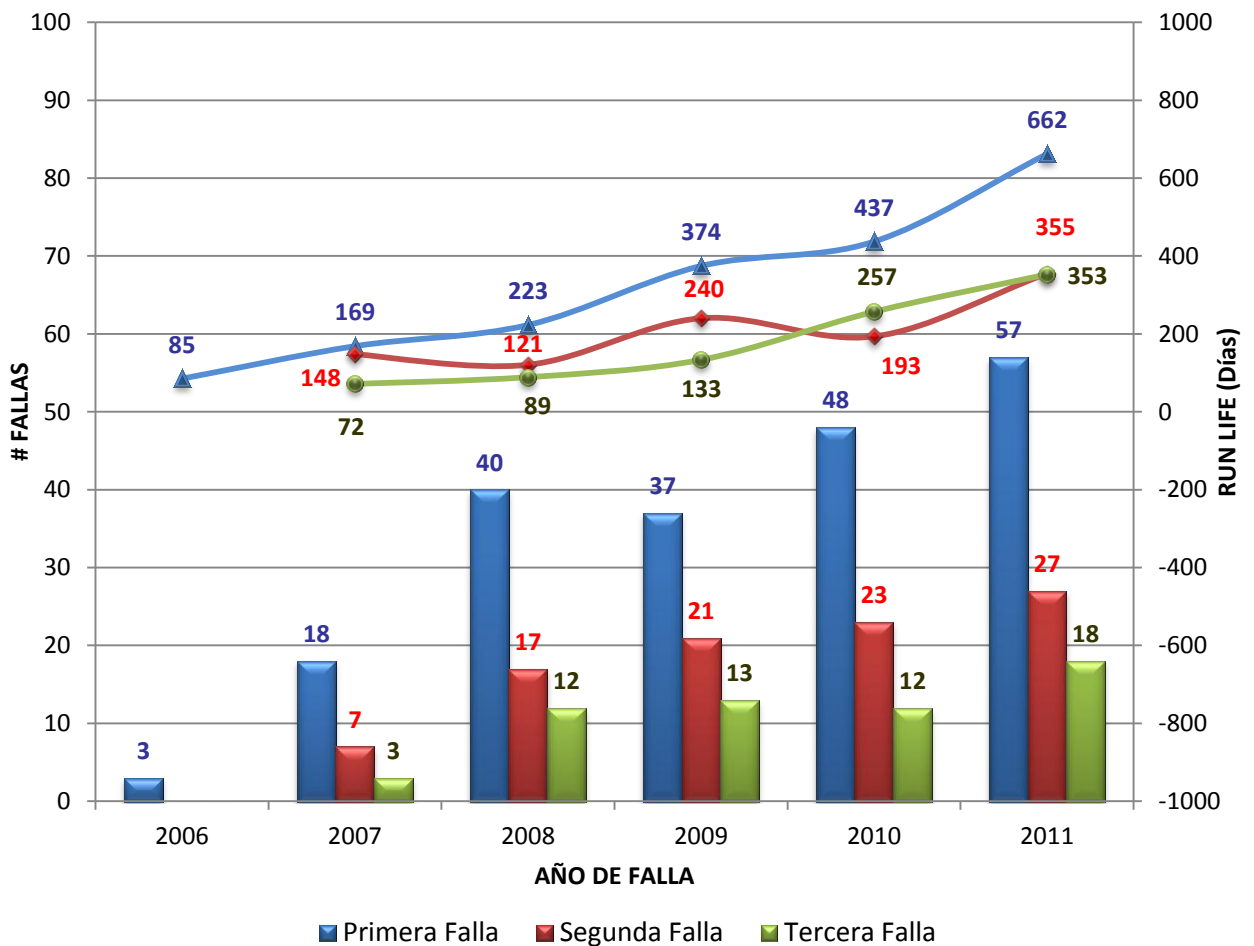
En estas últimas graficas se evidencia una buena gestión por parte del equipo de campo, el cual nos muestra la disminución en proporción de las fallas tanto por rozamiento como por *Make Up* y las demás, entre falla y falla.

5.1.3. Análisis por Año de Falla

La finalidad de evaluar las fallas por el año en el que sucedieron, es conocer si a medida que va pasando el tiempo, se ha mejorado la eficiencia de las intervenciones.

En la Figura 47 se muestra una grafica de distribución en el tiempo a partir del año de falla, con su respectivo promedio de *Runlife*.

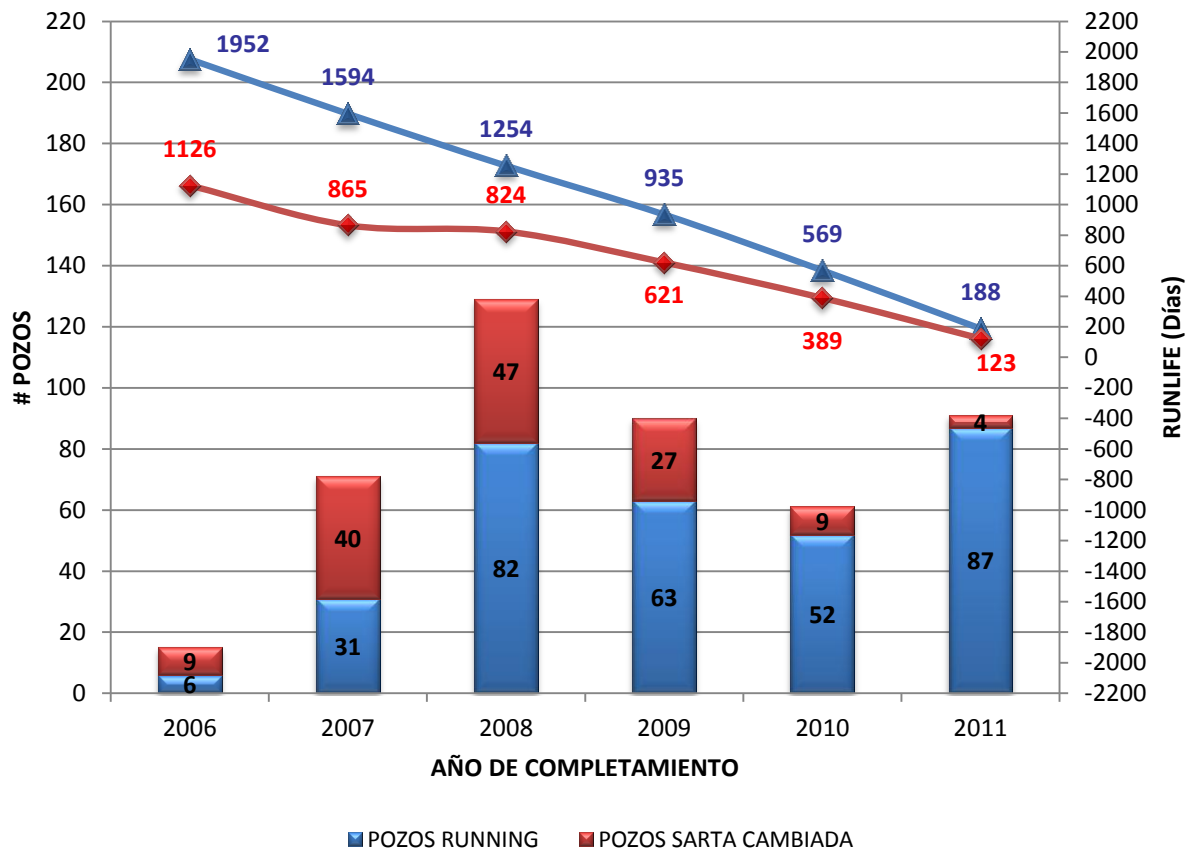
Figura 47. Distribución por Años de Falla con *Runlife*.



La grafica muestra el aumento del *Runlife* año a año, y sin embargo se sigue notando que los promedios para segundas y terceras están por debajo de los valores de *Runlife* de primeras fallas, lo que indica se debe hacer una mejor inspección visual en campo para los eventos, con el fin de prevenir que una segunda falla prematura suceda.

Para los pozos sin fallas, en vez de clasificarse por fecha de falla, se clasifica por fecha de completamiento. En la Figura 48 se muestra el *Runtime* para los pozos *Running* y con *Sarta Cambiada* por año.

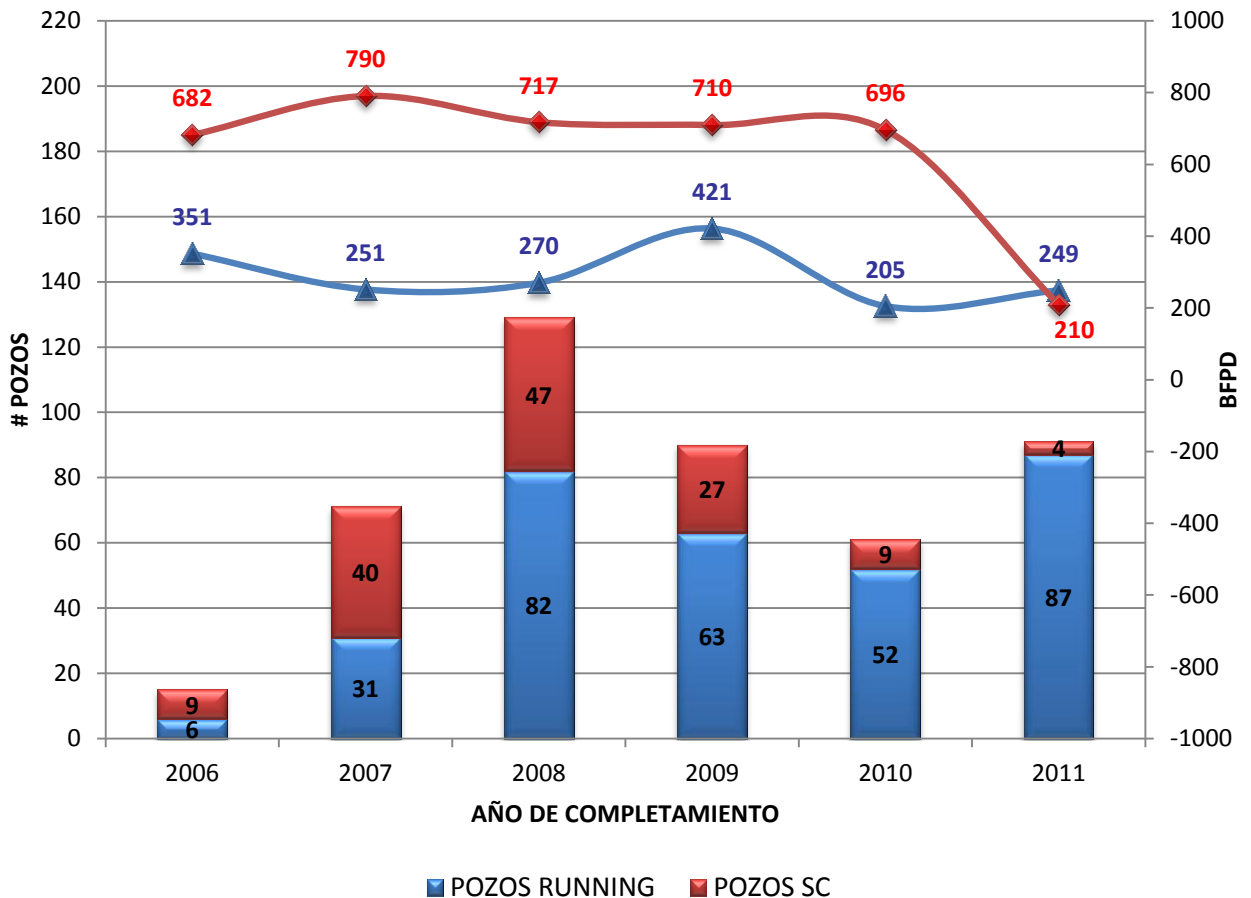
Figura 48. Pozos *Running* y con *Sarta Cambiada* por Año de Completamiento (*Runtime*).



En esta figura se puede observar como el *Runtime* de los pozos *Running* siempre se encuentra por encima de la curva de los pozos con sarta cambiada.

En la Figura 49 se muestra la grafica con los caudales para pozos *Running* y con sarta cambiada para cada año de completamiento.

Figura 49. Pozos Running y con Sarta Cambiada por Año de Completamiento (Caudales).



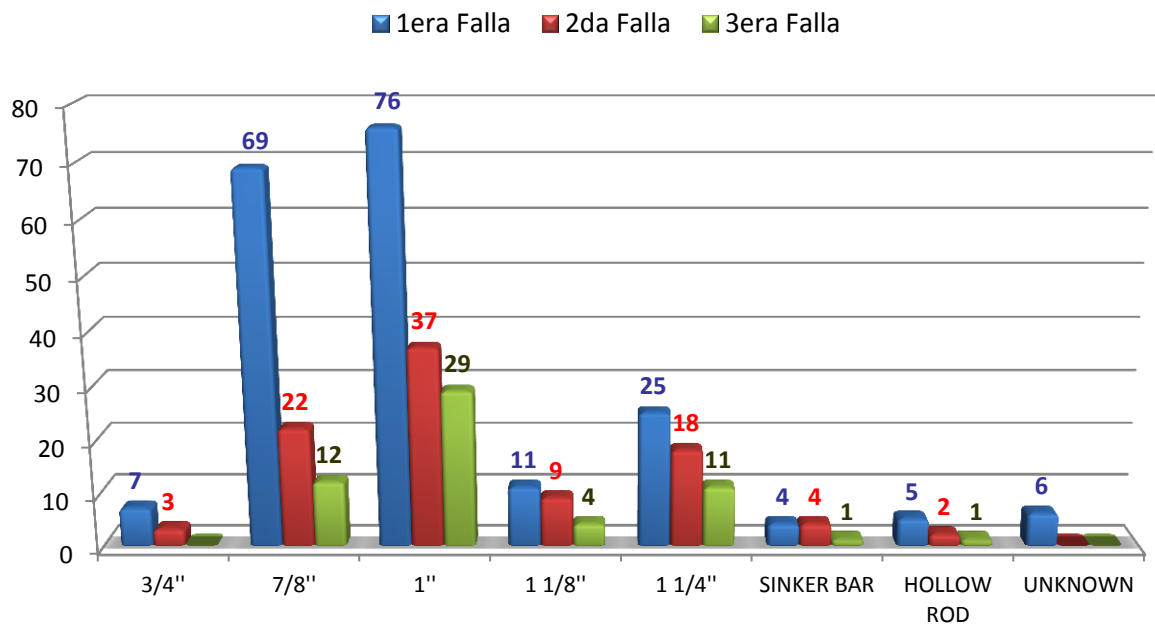
En esta grafica se observa que los caudales siempre son mayores para los pozos con sarta cambiada, exceptuando para el año 2011, sin

embargo la población de pozos con sarta cambiada es mucho menor que para pozos *Running*.

5.1.4. Análisis por Diámetro y Grado de Varilla Fallada

Anteriormente se había mostrado la distribución de los grados y diámetros instalados en completamientos iniciales y reactivaciones en el campo, siendo Grado D (Carbon) y Grado *Special High Strength*, los grados con mayor porcentaje de instalación; y siendo los diámetros de 7/8" y 1", los diámetros más usados. Ahora se mostrará la distribución de estos en las fallas ocurridas en el campo. La Figura 50 muestra la distribución de los diámetros en las primeras, segundas y terceras fallas.

Figura 50. Distribución Diámetros de Primeras, Segundas y Terceras Fallas.

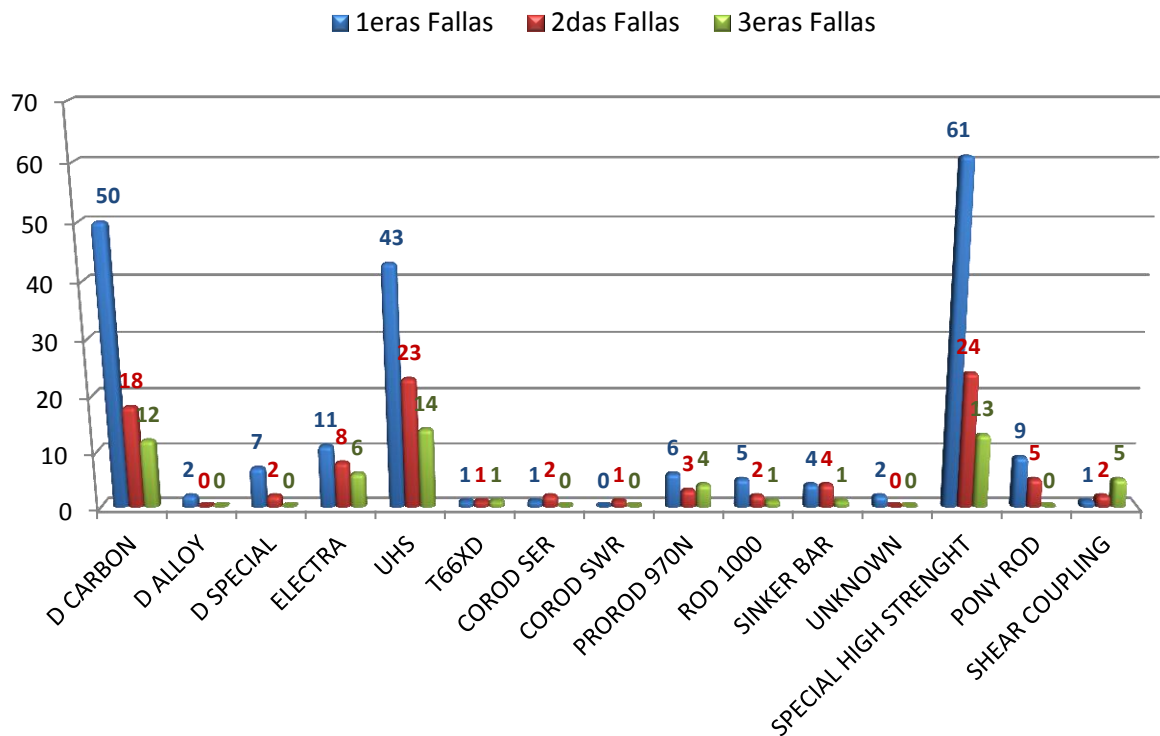


Los diámetros clasificados como "UNKNOWN", se debe a que son eventos muy antiguos y no se especifica en el evento ninguna información de la varilla. Se comprueba que los diámetros de mayor

porcentaje de fallas son de 7/8” y 1”, pero esto debido a que sus porcentajes de instalación también son los de mayor proporción.

En la Figura 51 se muestra la distribución de grados para las primeras, segundas y terceras fallas.

Figura 51. Distribución Grados de Primeras, Segundas y Terceras Fallas.

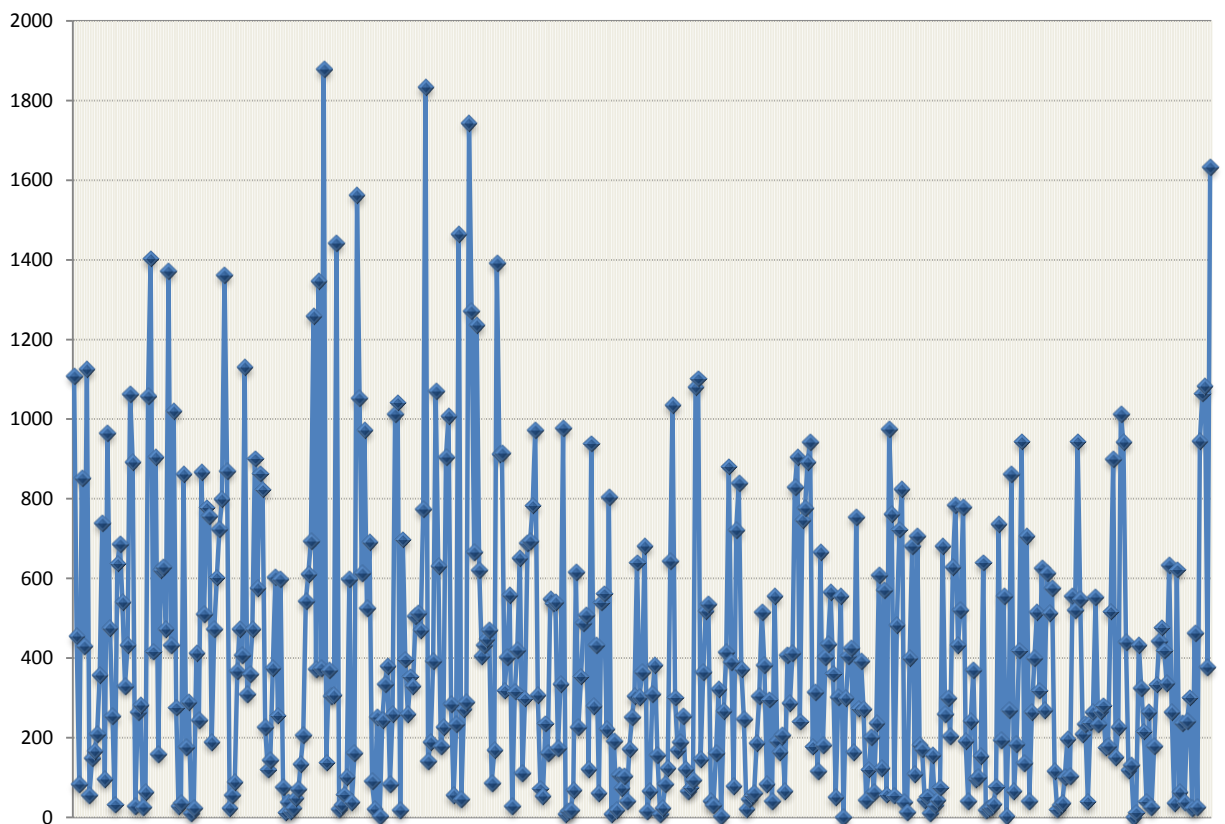


Al igual que en la grafica de diámetros, la mayor proporción de fallas en los grados, están en los que tuvieron mayor porcentaje de instalación (D Carbon y *Special High Strength*).

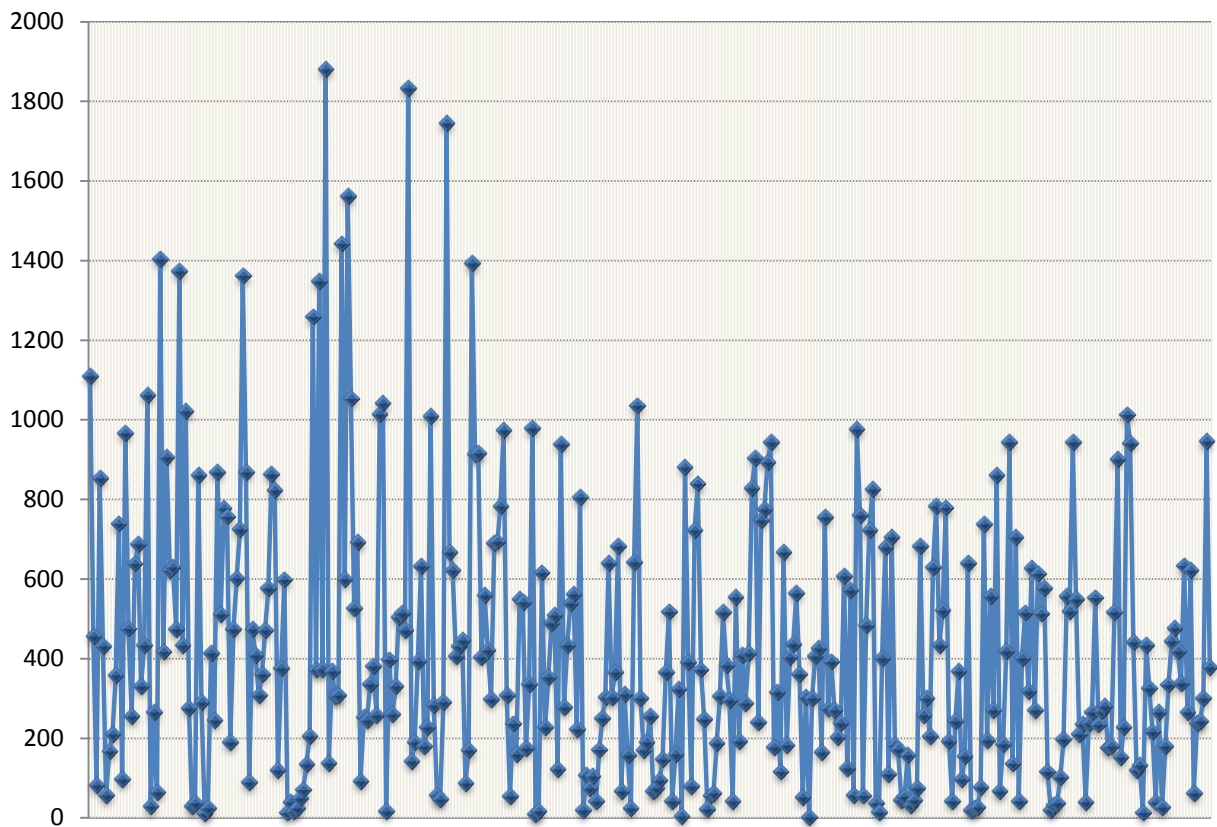
5.2. ANALISIS DE LAS FALLAS TOTALES DEL CAMPO

Este análisis incluye todas las fallas del campo que se habían mencionado anteriormente, las 434 fallas de pozos del proyecto y las 13 fallas de los pozos de la básica, para un total de 447 fallas que se deben tener en cuenta en los cálculos. En la Figura 52 se muestra una grafica de la distribución de los valores de *Runlife*.

Figura 52. Grafica de *Runlife* para Fallas Totales del Campo.



Resultando como promedio de *Runlife*, un valor de 405 días. La Figura 53 muestra la misma grafica, sin tener en cuenta los valores de *Runlife* para las fallas por *Make Up* o por Accesorios.

Figura 53. Grafica de *Runlife* para Fallas Totales del Campo Censurada.

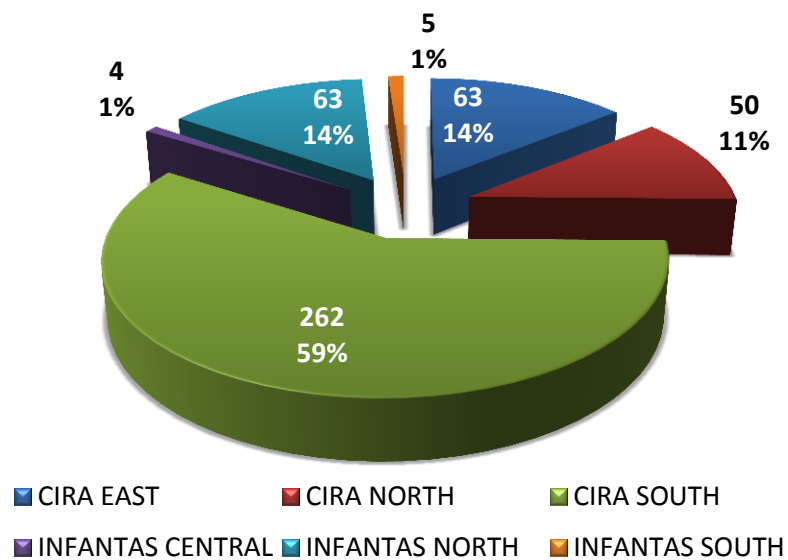
Obteniendo un valor de *Runlife* promedio de 431 días.

Para las primeras, segundas y terceras fallas se hicieron diversos análisis, a partir de ciertas clasificaciones o agrupaciones. Para las fallas totales también se hicieron esos análisis, además se incluyó un análisis por sistema de levantamiento, un análisis por rango de *Runlife* y un análisis por rango de caudales.

5.2.1. Análisis por Zona

Al igual que para solo primeras, segundas y terceras fallas, se agruparon las fallas totales del campo, clasificándolas por la zona en la que se encuentran ubicados los pozos fallados. En la Figura 54 se muestra la distribución general de fallas por zonas.

Figura 54. Distribución de Fallas por Zona.



En las Figuras de la 55 a la 60 se muestran las distribuciones de las fallas para cada una de las zonas del campo, por año de falla, con sus respectivos promedios de *Runlife* y caudales.

Figura 55. Distribución por Año para la Zona CIRA EAST.

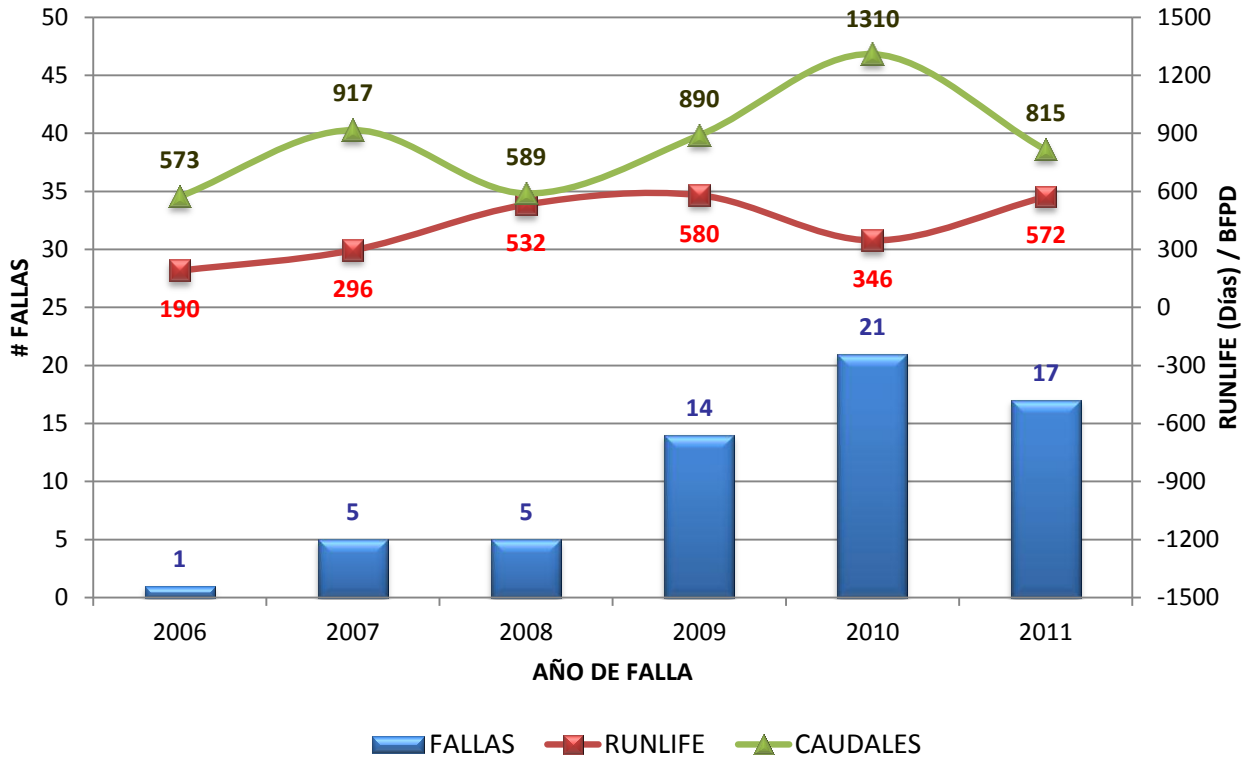


Figura 56. Distribución por Año para la Zona CIRA NORTH.

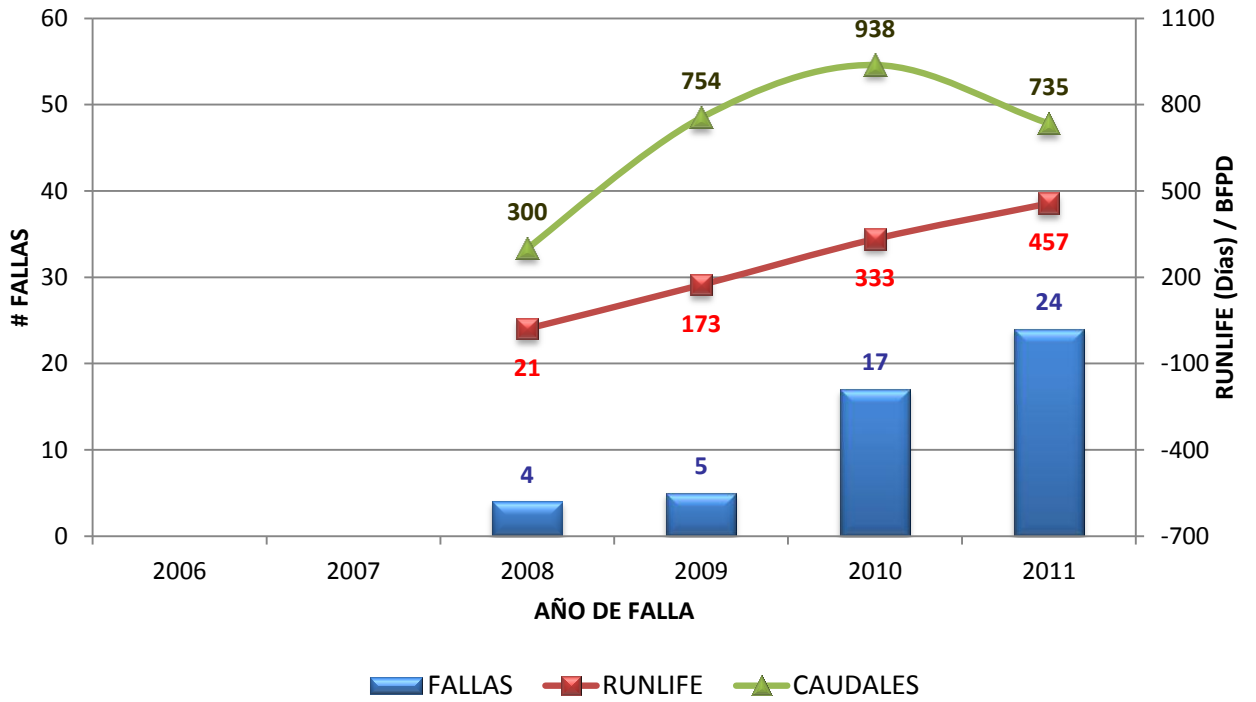


Figura 57. Distribución por Año para la Zona CIRA SOUTH.

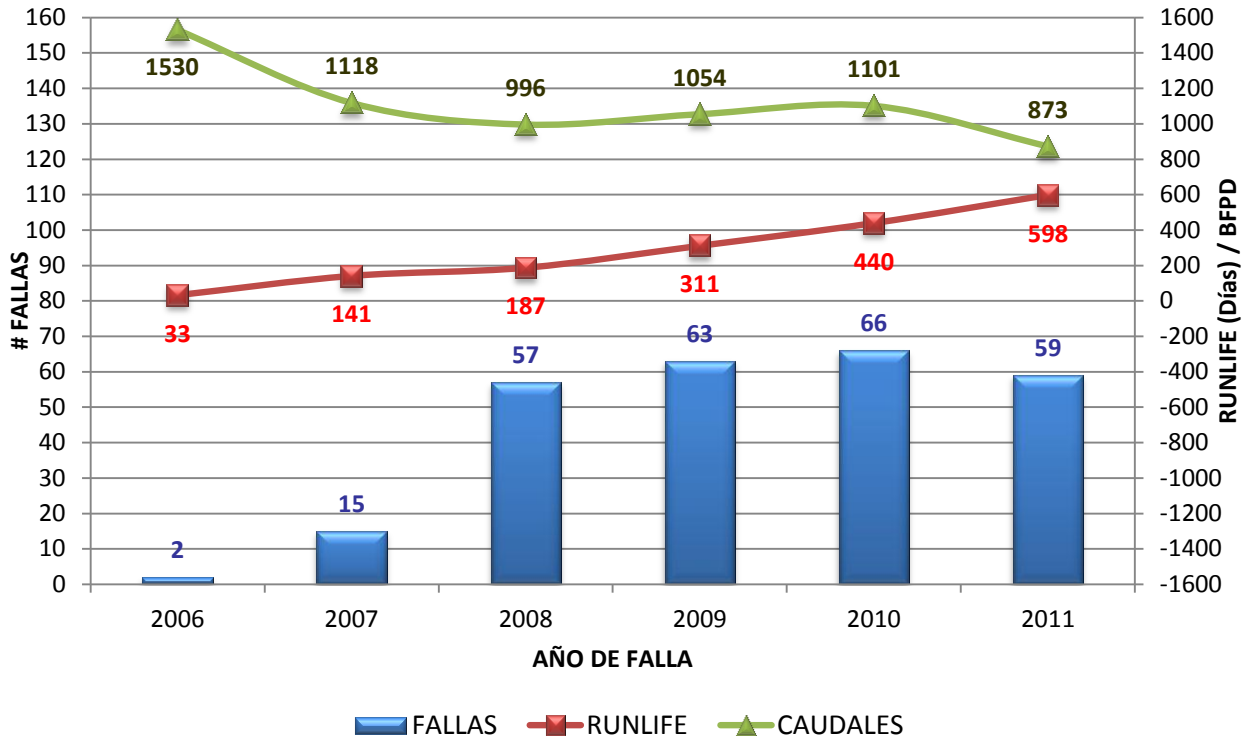


Figura 58. Distribución por Año para la Zona INFANTAS NORTH.

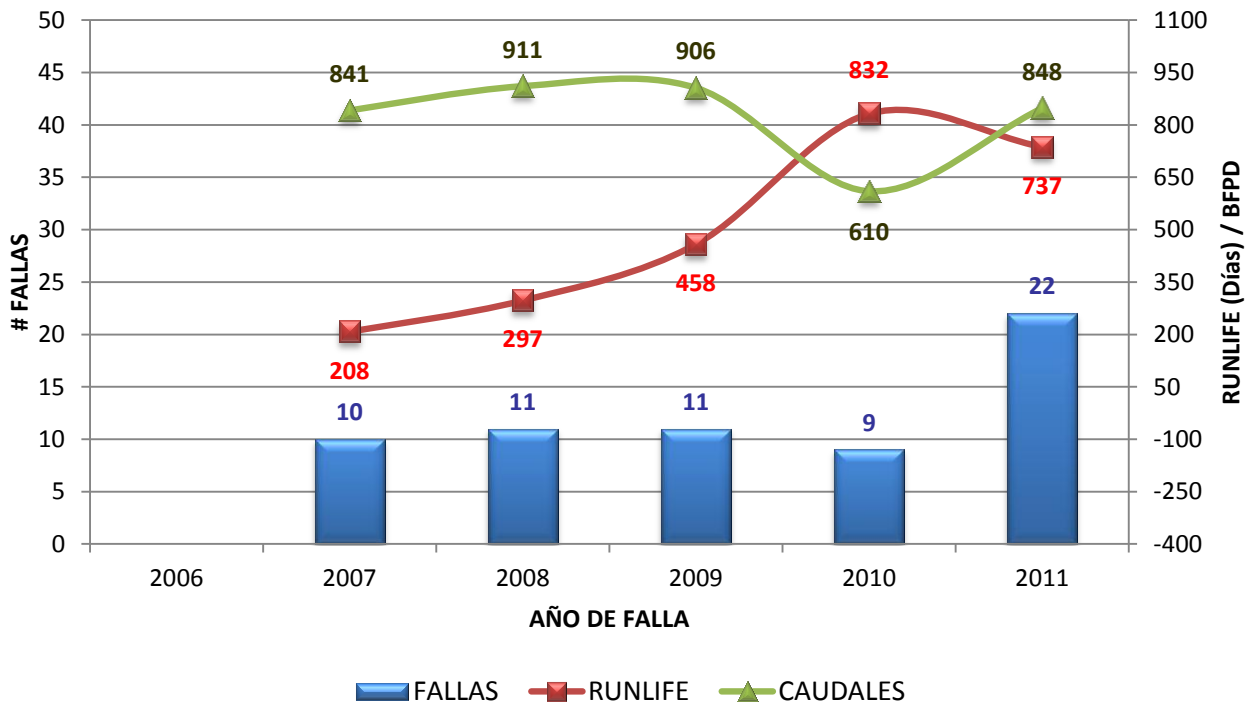


Figura 59. Distribución por Año para la Zona INFANTAS CENTRAL.

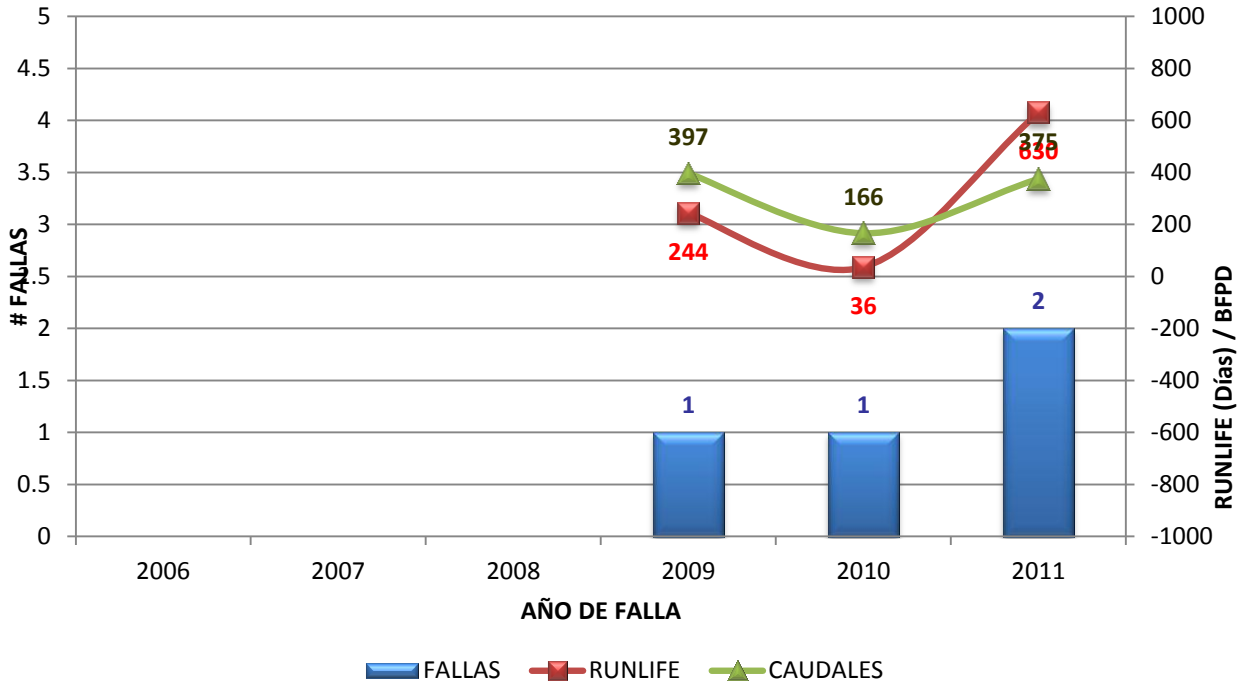
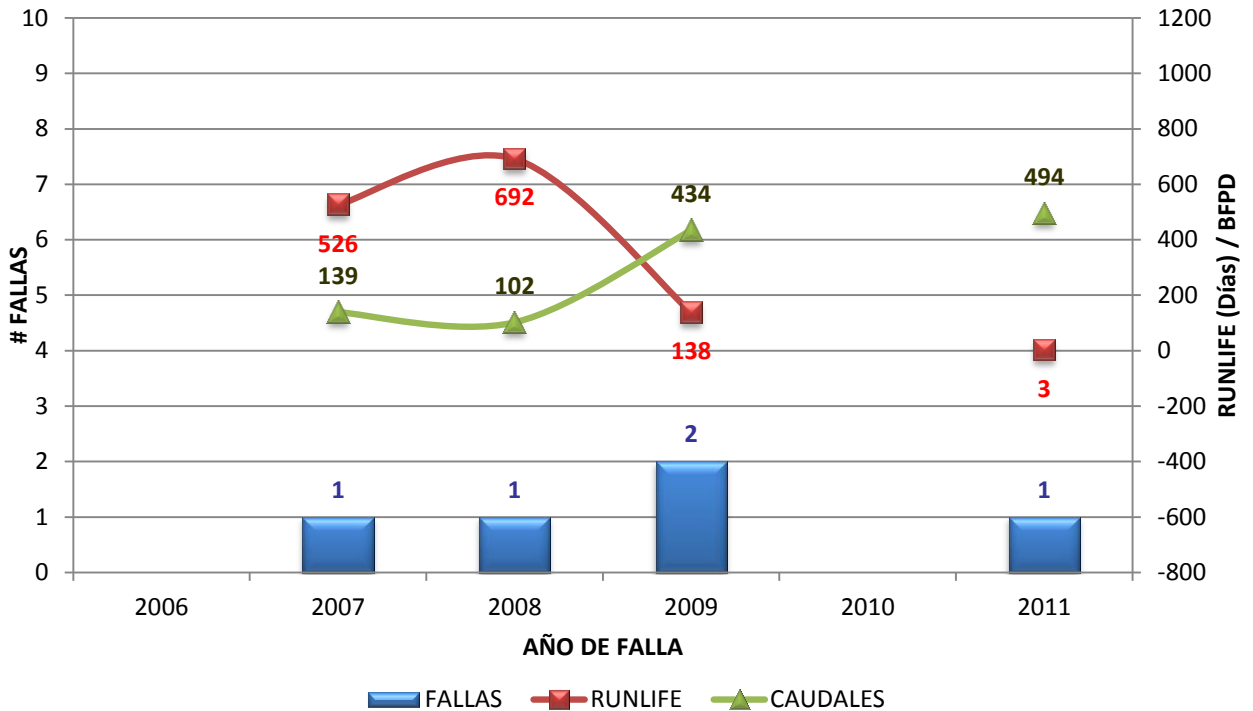


Figura 60. Distribución por Año para la Zona INFANTAS SOUTH.

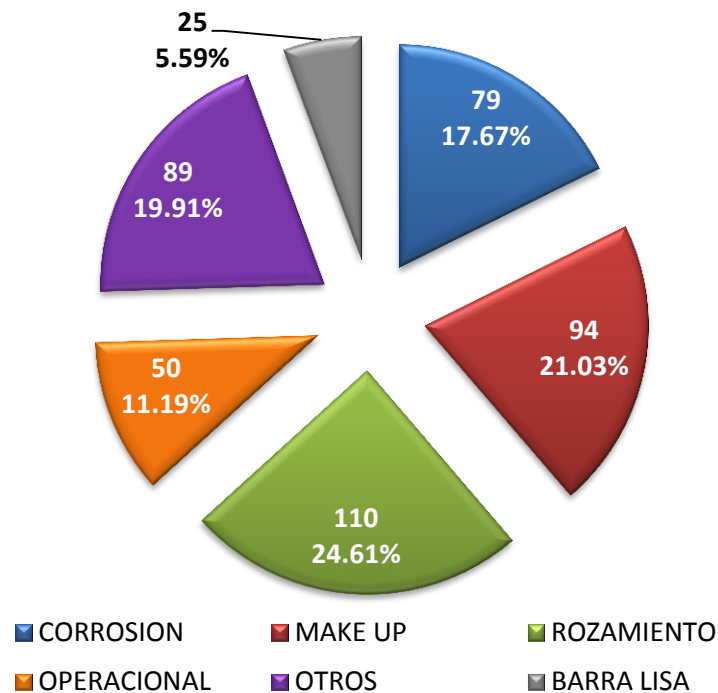


Debido a la poca población de fallas en las áreas de INFANTAS CENTRAL e INFANTAS SOUTH, son poco significativos los valores que se obtienen de estas graficas; por el contrario, para las zonas de CIRA SOUTH, CIRA NORTH, INFANTAS NORTH y hasta CIRA EAST, se puede apreciar, como va aumentando el *Runlife* con el pasar del tiempo y mejorando.

5.2.2. Análisis por Razón de Falla

Ya teniendo un conocimiento previo de las clasificaciones que se usan para las razones de falla, es necesario aclarar que para las fallas totales también se incluyen las fallas por Barra Lisa, siendo esta varilla la que se encuentra al inicio de la sarta en superficie. En la Figura 61 se muestra la distribución general de las fallas totales por razones.

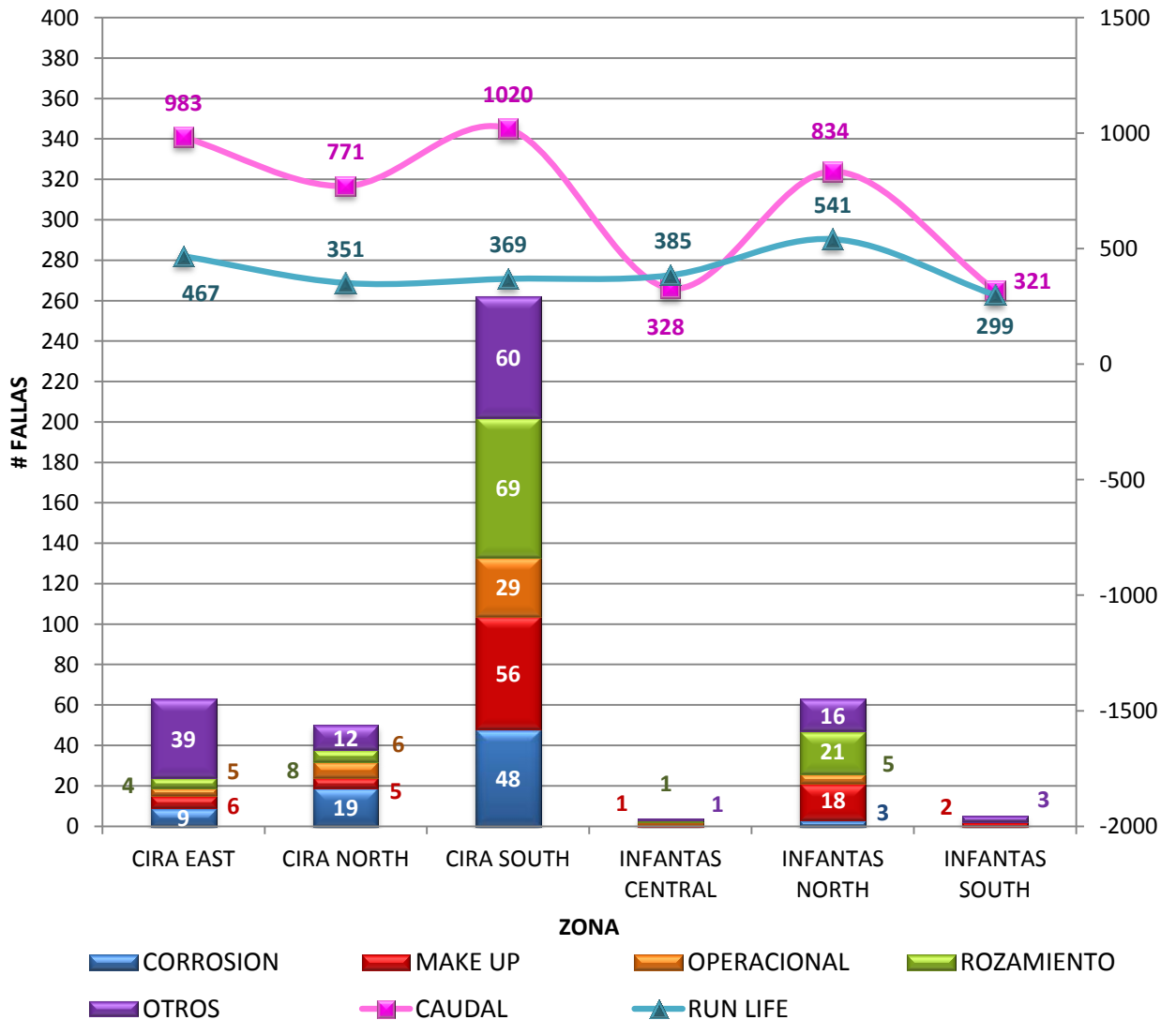
Figura 61. Distribución de Razones para Fallas Totales.



Se puede observar que, consistentemente con el análisis anterior de primeras, segundas y terceras fallas, la razón que más frecuentemente se presenta en el campo es el Rozamiento.

Clasificando las fallas por razones para cada zona, sacando un promedio de *Runlife* y caudales para cada una, se obtiene la grafica que se muestra en la Figura 62.

Figura 62. Runlife y Caudales por Zona y Razón de Falla.



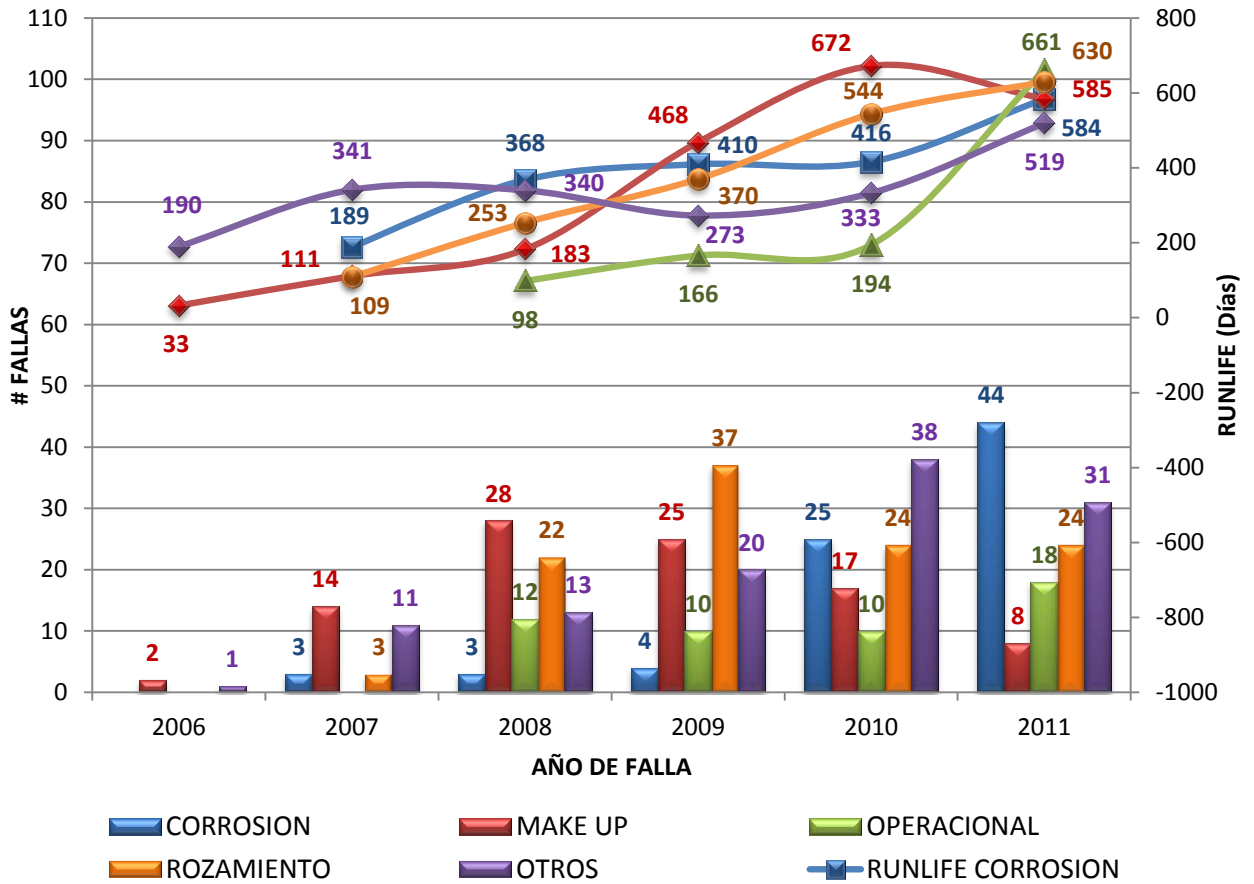
Como ya se había mencionado antes, se observa que CIRA SOUTH es la zona que mayor distribución de fallas posee y su mayor porcentaje como para INFANTAS NORTH es el de Rozamiento; en las otras zonas su porcentaje no es el mayor pero se encuentra entre los más altos, sin incluir a INFANTAS CENTRA o INFANTAS SOUTH, puesto que sus fallas son muy pocas, por lo tanto despreciables con respecto a los valores de las otras zonas.

5.2.3. Análisis por Año de Falla

Se procede a analizar las fallas totales dependiendo del año en el que sucedió la falla. La Figura 63 ilustra la distribución de falla a lo largo de los años con sus respectivas razones de fallas y promedios de *Runlife*.

Una de las principales razones por la que se realizó este estudio fue verificar la buena gestión que hace OXY en el campo desde el comienzo del contrato de asociación, y eso es justo lo que se observa en la siguiente gráfica, ya que a medida que va pasando el tiempo, el *Runlife* de las varillas va en incremento, lo que quiere decir, que la gestión ha mejorado incrementalmente, que las nuevas tecnologías y que los nuevos equipos tanto técnicos como de trabajo están haciendo un buen trabajo al minimizar el índice de fallas.

Figura 63. Runlife y Razones de Falla para cada Año.



5.2.4. Análisis por Diámetro y Grado de Varilla Fallada

Tomando el total de fallas en el campo, se sacó una distribución de diámetro y grados para ese total de fallas. En la Figura 64 se muestra la distribución para los diámetros y en la Figura 65 se muestra la distribución de grados.

Figura 64. Distribución de Diámetros para el Total de Fallas del Campo.

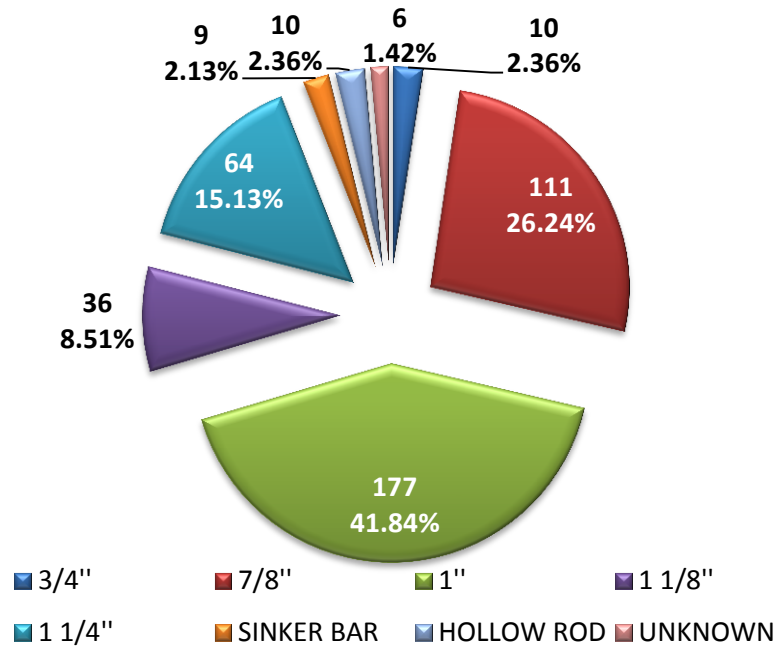
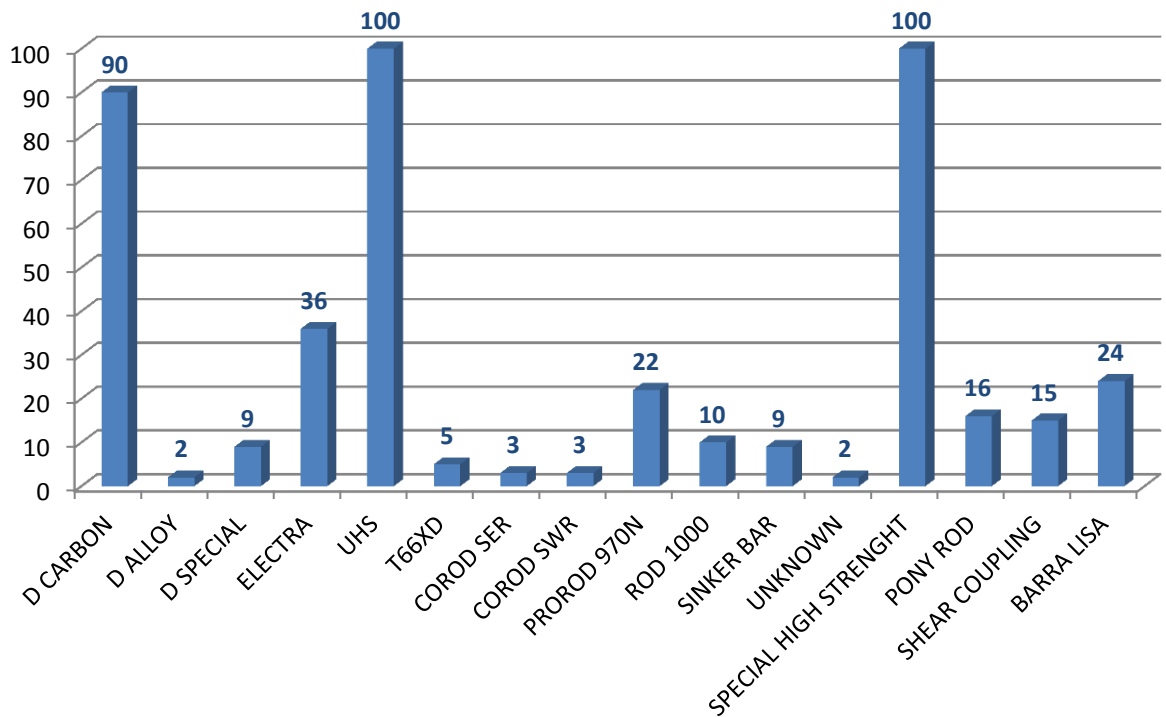
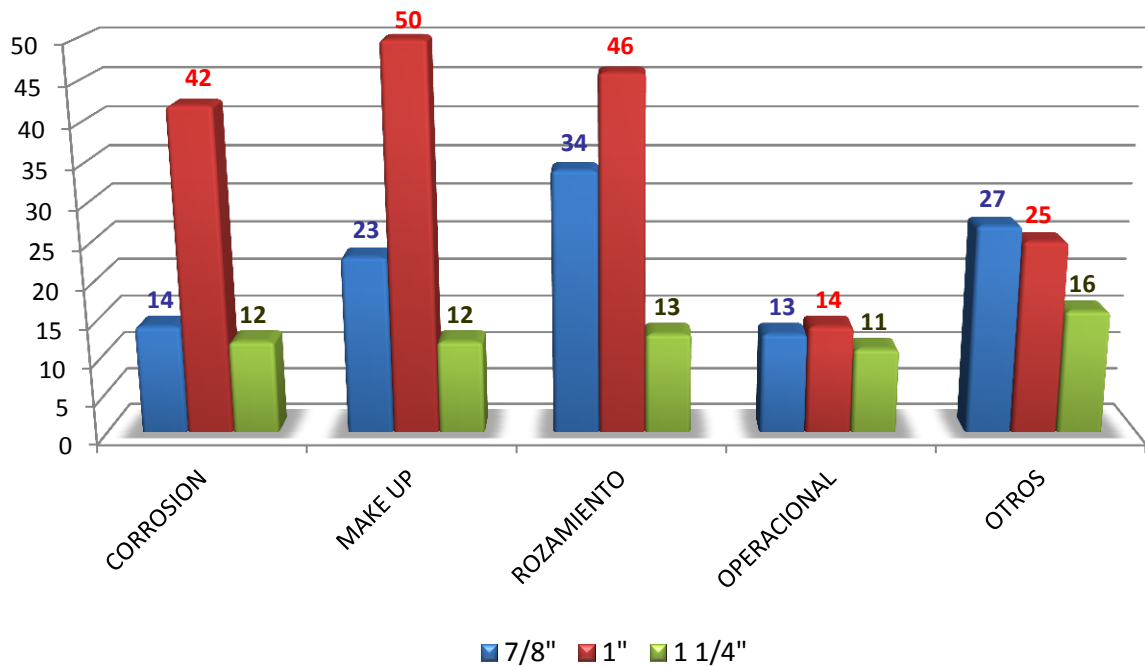


Figura 65. Distribución de Grados para el Total de Fallas del Campo.

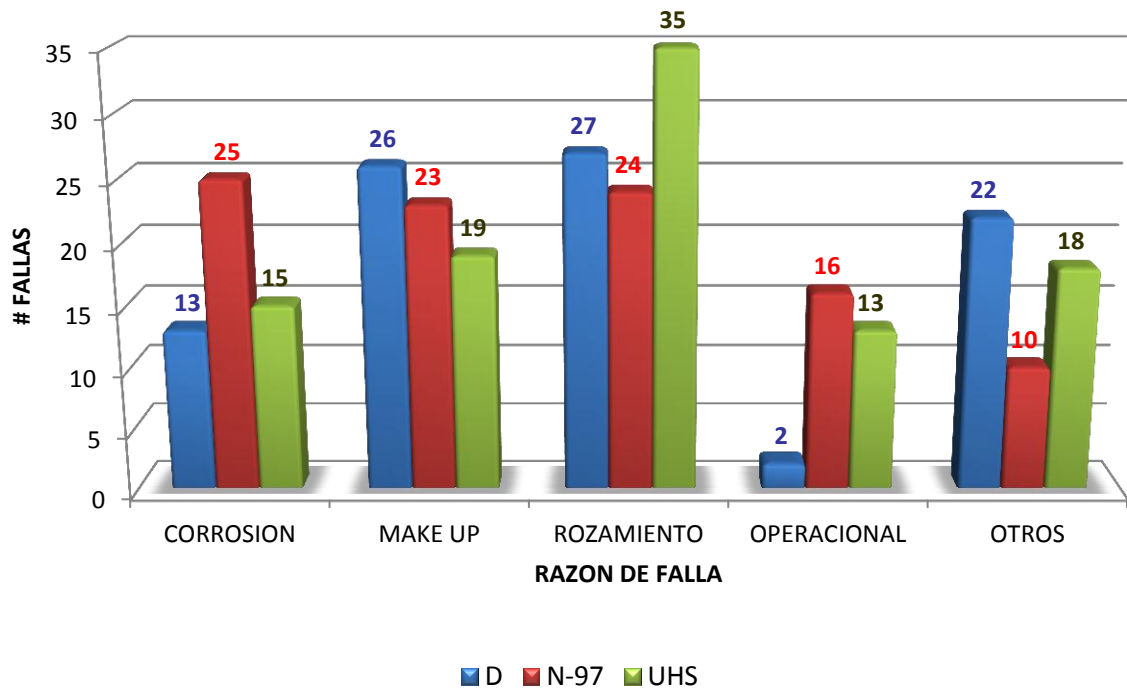


Tomando los 3 grados y 3 diámetros con mayor cantidad de fallas, se elaboraron graficas para identificar las principales razones de falla para estas varillas.

Figura 66. Razones de Falla para los 3 Diámetros con Mayor Numero de Fallas.



La mayor cantidad de falla se encuentra concentrada en las razones de Corrosión, Rozamiento y *Make Up*.

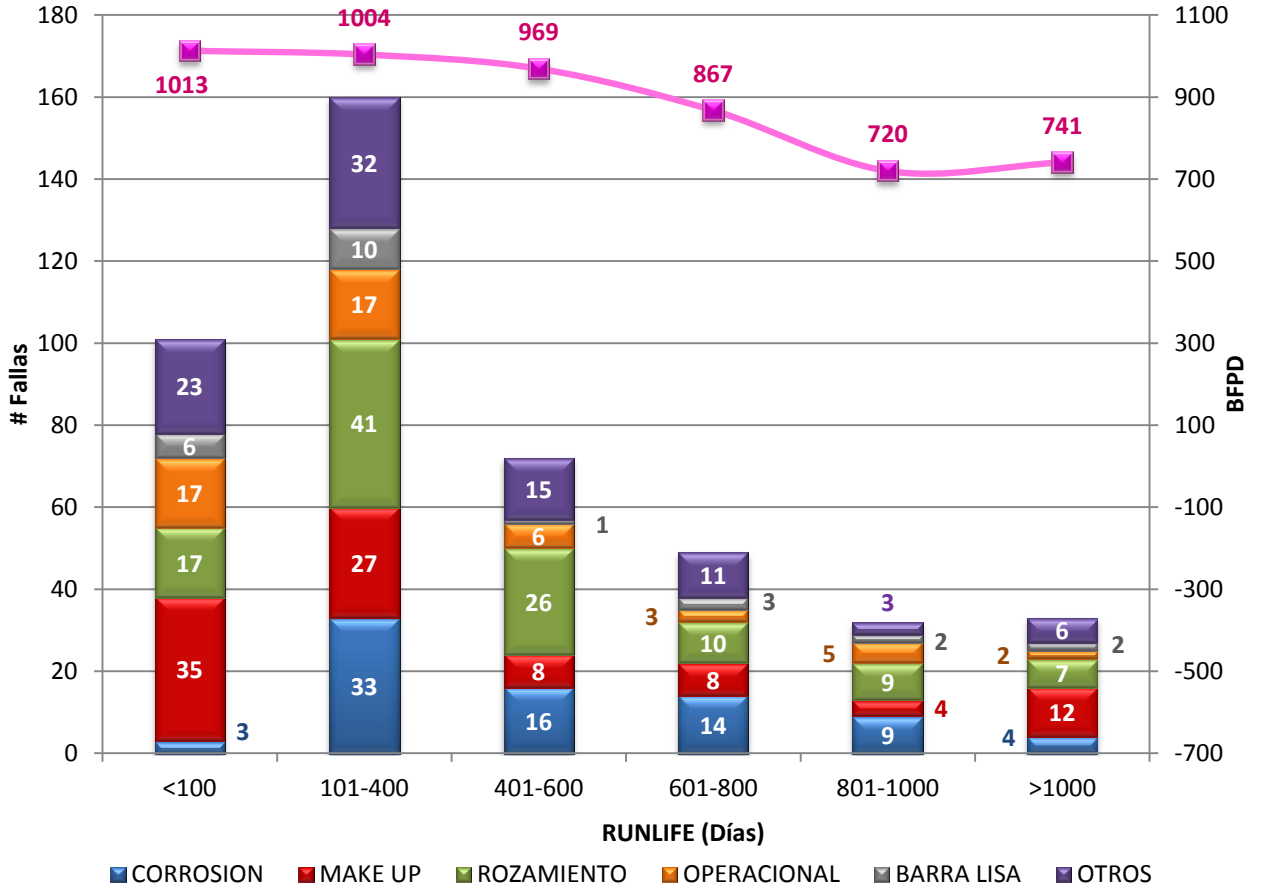
Figura 67. Razones de Falla para los 3 Grados con Mayor Número de Fallas.

Lo mismo se observa para los grados, la mayor concentración de fallas se encuentra entre las razones Corrosión, Rozamiento y *Make Up*.

5.2.5. Análisis por Rango de *Runlife* y Rango de Caudales

Para este análisis se tomaron 7 rangos de *Runlife* para los cuales se tomaran los valores de caudales (el mayor hasta el momento de falla) y se tomara un promedio para hacer comparación. Estos rangos son: 1) Valores menores a 100 días; 2) Valores entre 100 y 400 días; 3) Valores entre 400 y 600 días; 4) Valores entre 600 y 800 días; 6) Valores entre 800 y 1000 días; y 7) Valores mayores a 1000 días. En la Figura 68 se muestra la grafica para dicha clasificación, además de mostrar una subdivisión por razones.

Figura 68. Distribución Caudales para Rangos Definidos de *Runlife* y Razones de Falla.

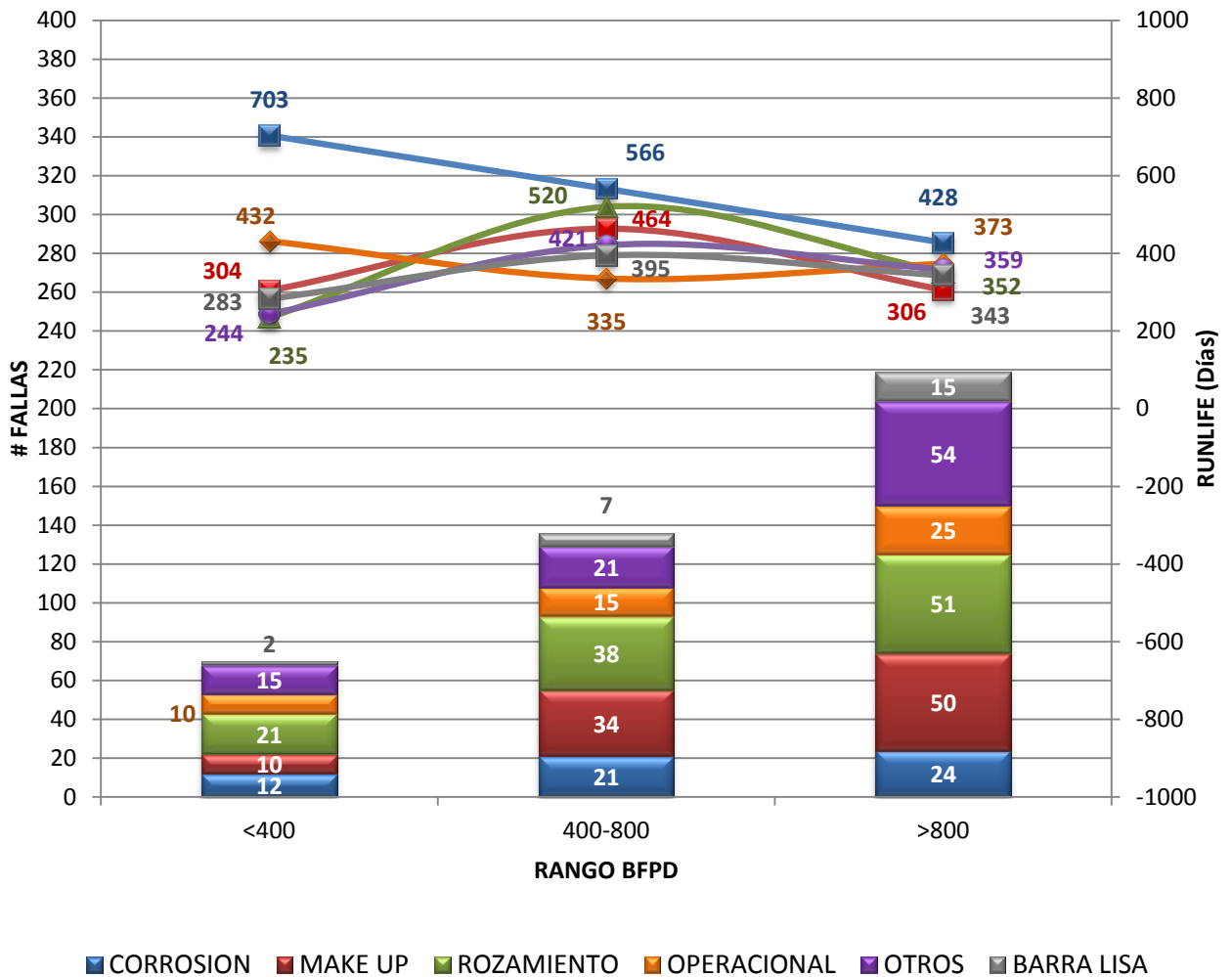


Esta grafica relaciona el *Runlife* con la cantidad de barriles diarios producidos, mostrando que la mayoría de la población de las fallas se encuentra en el rango de 100 a 400 días y a medida que el rango de *Runlife* aumenta, el caudal disminuye, siendo, en parte lógico, puesto que a mayor caudal, mayor carga en la varilla y mayor fatiga.

Para la grafica de la Figura 69 se invierten los ejes y se grafican los valores de *Runlife* por rango de caudales, siendo estos rangos distribuidos de la siguiente manera: 1) Valores menores de 400 BFPD;

2) Valores entre 400 y 800 BFPD; y 3) Valores mayores a los 800 BFPD. Estos son los rangos que se trabajan en el campo es por eso que se utilizan así.

Figura 69. Distribución *Runlife* para Rangos Definidos de Caudales y Razones de Falla.



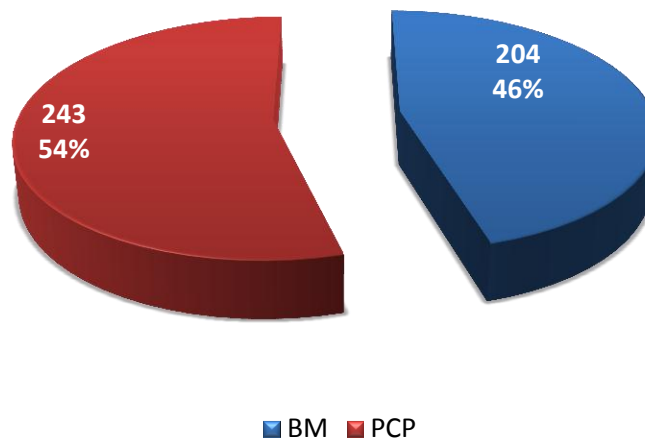
Ahora se puede observar como la mayoría de las fallas se encuentran en el rango de caudales mayores de 800 BFPD, lo que indica que las

cargas en las varillas influyen enormemente en la aparición de las fallas.

5.2.6. Análisis por Sistema de Levantamiento

En el campo La Cira – Infantas, los sistemas de levantamiento que más se encuentran implementados son Bombeo Mecánico (BM) y Bombeo por Cavidades Progresivas (PCP), es por esto, que el siguiente análisis se hace separando las fallas para BM y PCP, teniendo en cuenta el sistema de levantamiento con el que se encontraba produciendo el pozo al momento de la falla.

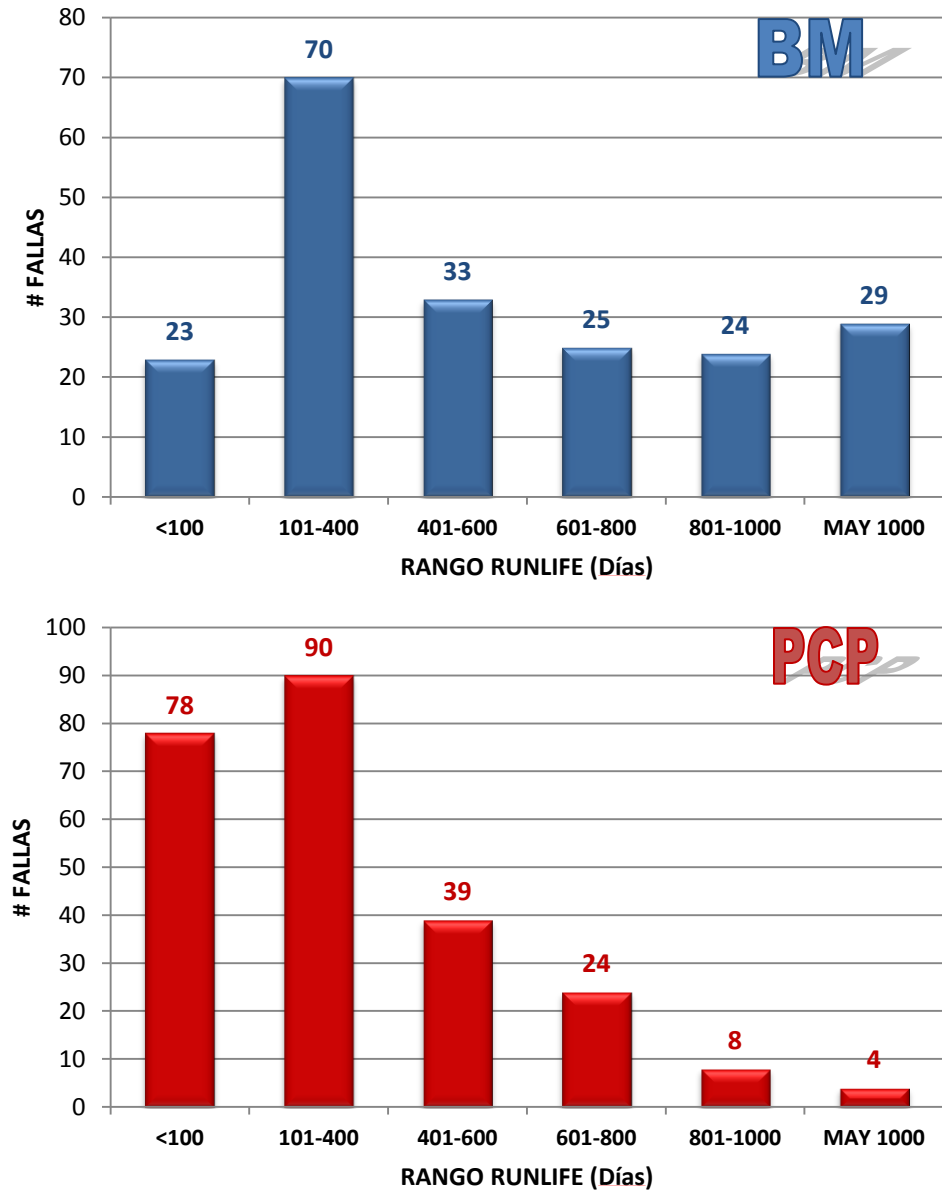
Figura 70. Distribución de Fallas para cada Sistema de Levantamiento.



En la Figura anterior se puede apreciar, la cantidad de fallas que ocurrieron en cada Sistema de Levantamiento. Es mucho mayor la proporción de pozos que tienen instalado sistema por bombeo mecánico que por sistema de bombeo por cavidades progresivas; aun así, se encontro que para PCP es mayor el porcentaje de fallas en el campo con un 54% sobre un 46% de bombeo mecánico.

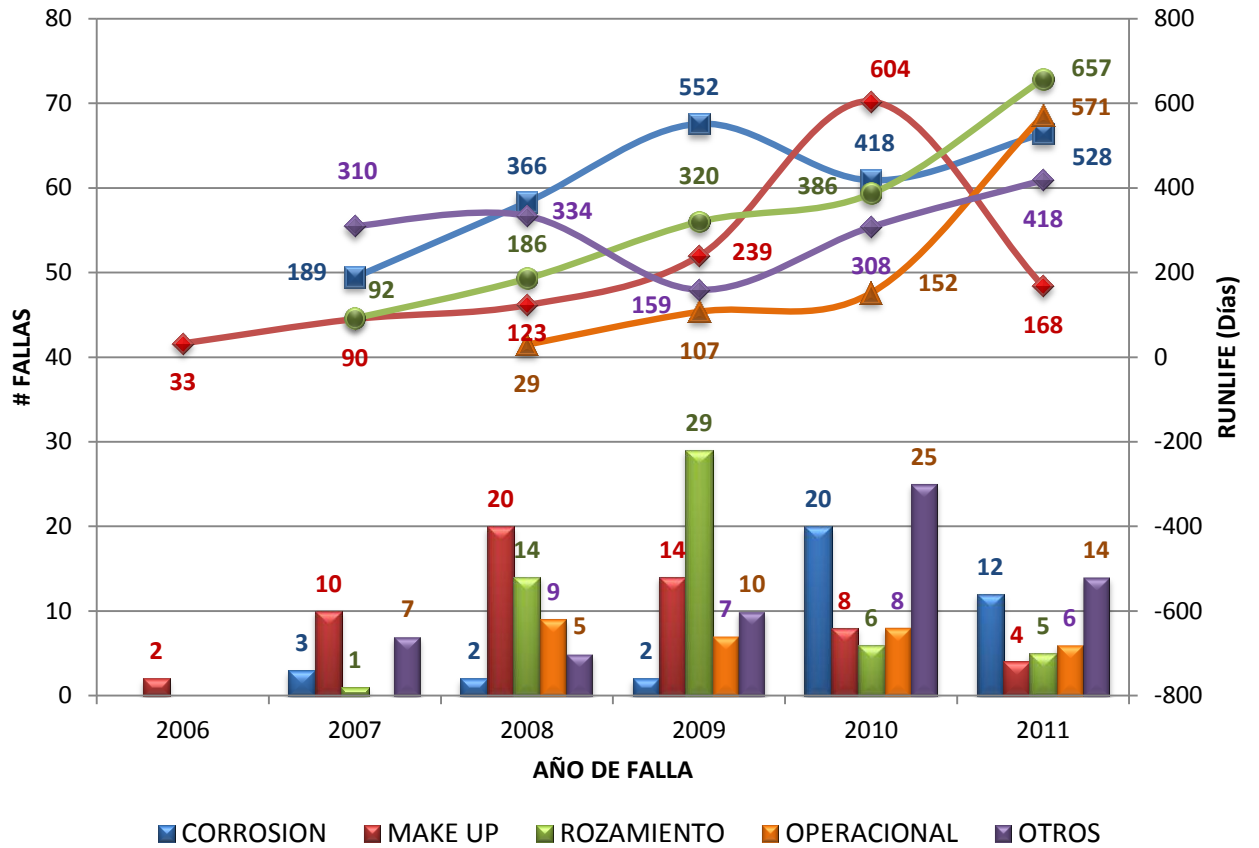
Al realizar una distribución de fallas por rango de *Runlife*, se obtuvo la siguiente figura.

Figura 71. Distribución de Fallas por Rango de *Runlife* para BM y PCP.



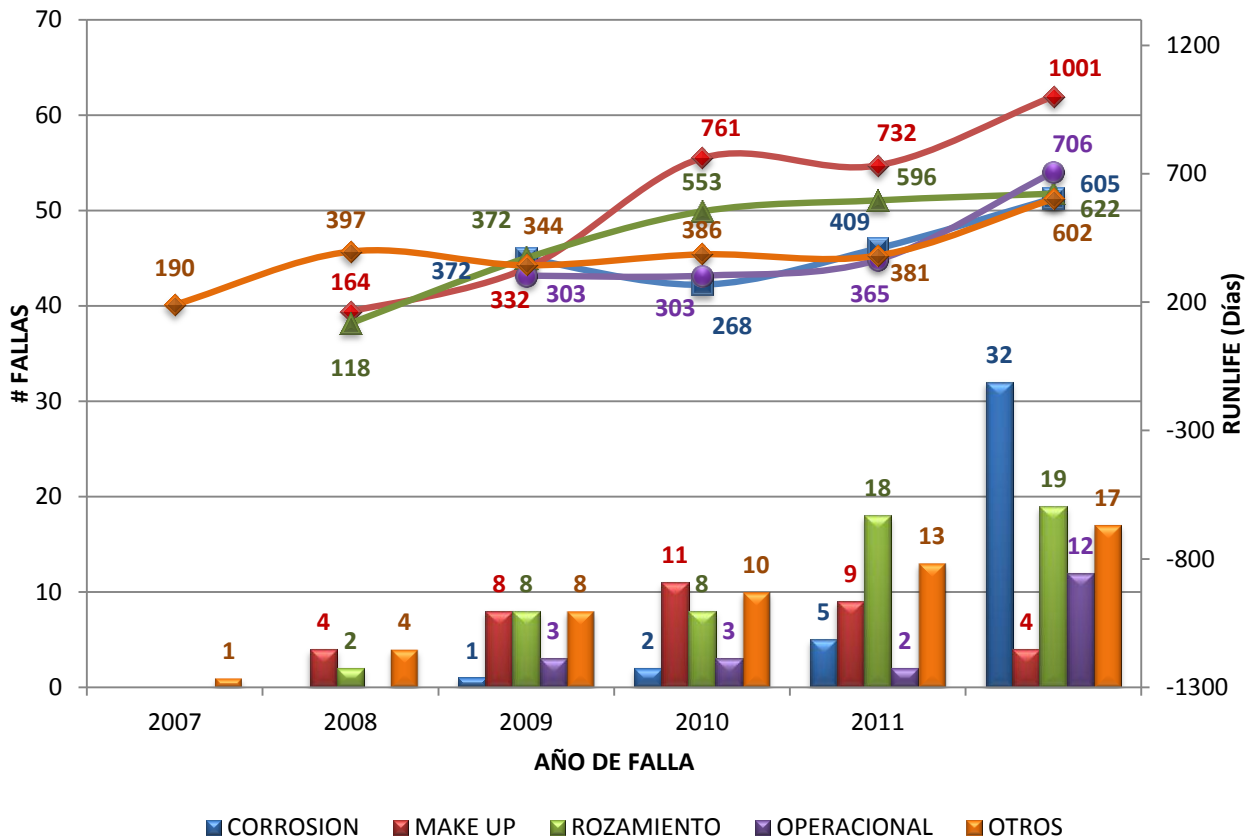
Seguidamente se procedió a graficar por años y razones de falla, los valores de *Runlife*.

Figura 72. Distribución de Fallas para PCP por Año y Razón.



De la grafica anterior y la próxima grafica, se observa que el Runlife, aunque no cumple ninguna tendencia, va aumentando año a año.

Figura 73. Distribución de Fallas para BM por Año y Razón.



A manera comparativa, se construyeron dos graficas que mostraran tanto los valores de *Runlife* como los valores de caudales para las fallas de BM y PCP. Estas graficas se muestran en las Figuras 74 y 75 respectivamente, incluyendo las cantidades de fallas para cada sistema.

Se observa como el *Runlife* para BM está ligeramente por encima de la curva de *Runlife* de PCP. Y para la grafica de caudales, es evidente que la curva de PCP se encuentra por encima de la curva de BM.

Figura 74. Comparación de Runlife entre BM y PCP.

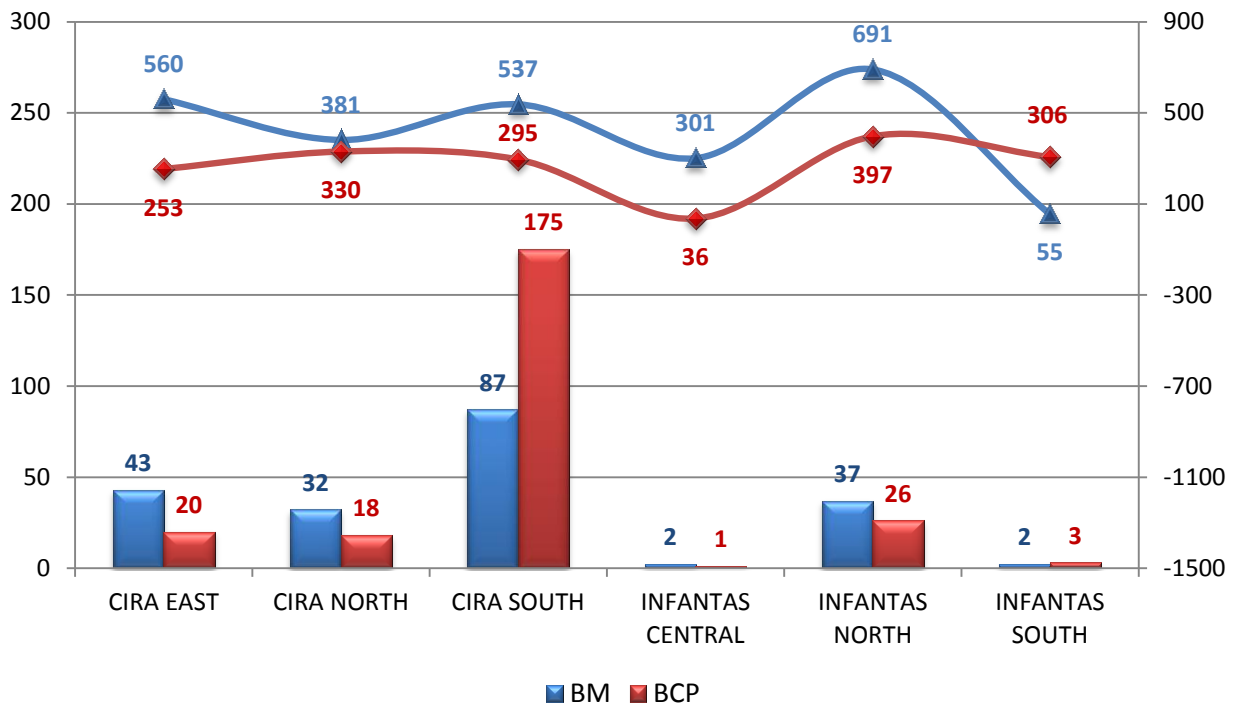
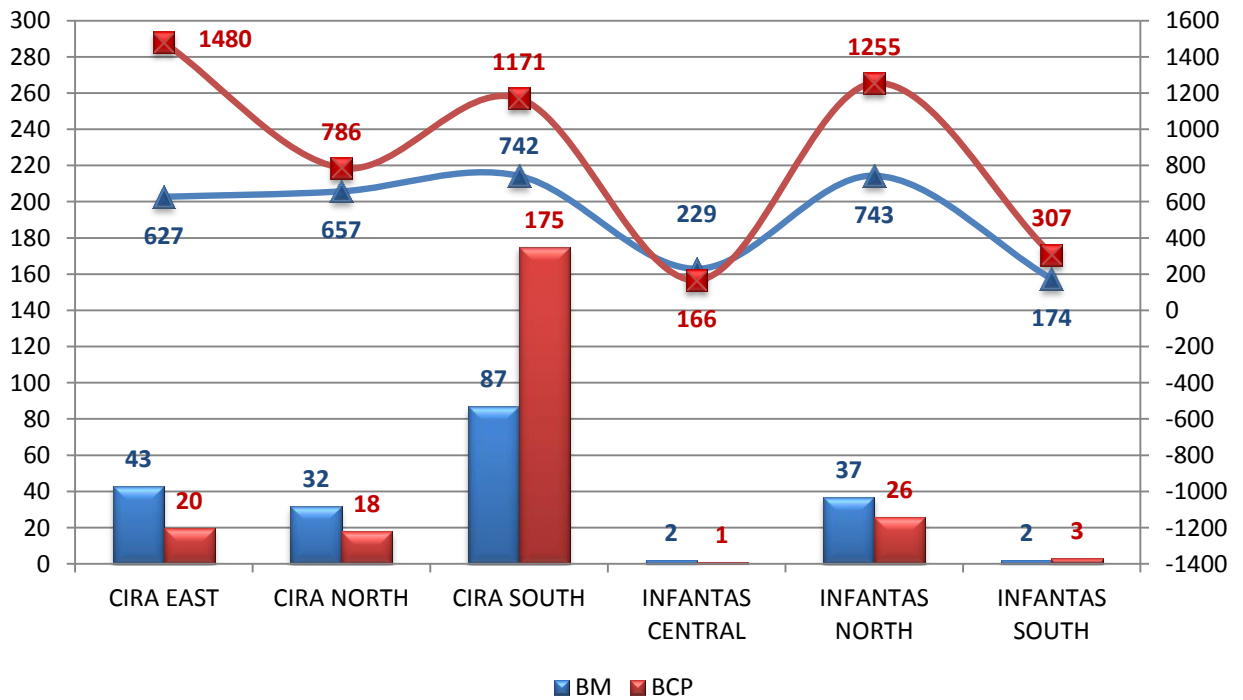


Figura 75. Comparación de Caudales entre BM y PCP.



5.3. TABLAS RESUMEN

Agrupando toda la información obtenida a partir de los análisis hechos de los datos de fallas que se recopilaron, se crearon unas tablas en las cuales se incluyen diferentes promedios para las diferentes zonas.

En la Tabla 13 se muestran los promedios de los *Runtime* para los pozos *Running* y pozos con sarta cambiada y en la Tabla 14 se muestran los promedios de los caudales para estos mismos pozos.

Tabla 13. Promedios de *Runtime* para Pozos *Running* y con Sarta Cambiada.

		SIN FALLAS	
		RUNNING	SARTA CAMBIADA
# POZOS		321	95
RUNTIME TOTAL		837	768
RUNTIME	CIRA EAST	692	765
	CIRA NORTH	532	752
	CIRA SOUTH	907	750
	INFANTAS CENTRAL	755	618
	INFANTAS NORTH	1124	823
	INFANTAS SOUTH	506	929

En las tablas 15, 16 y 17 se muestran los promedios de los *Runlife* para las primeras, segundas y terceras fallas respectivamente.

Tabla 14. Promedios de Caudales para los Pozos *Running* y con Sarta Cambiada.

		SIN FALLAS	
		RUNNING	SARTA CAMBIADA
# POZOS		321	95
CAUDAL TOTAL		283	725
CAUDAL	CIRA EAST	331	765
	CIRA NORTH	321	752
	CIRA SOUTH	304	750
	INFANTAS CENTRAL	141	618
	INFANTAS NORTH	326	823
	INFANTAS SOUTH	74	929
PROMEDIO TOTAL		249	773

Tabla 15. Promedios de *Runlife* para Primeras Fallas de los Pozos del Proyecto.

		1ERAS FALLAS	
		# FALLAS	RUNLIFE
# POZOS		111	
RUNLIFE TOTAL	SIN CENSURA	204	417
	CENSURADO	126	450
RUNLIFE	CIRA EAST	26	459
	CIRA NORTH	26	339
	CIRA SOUTH	105	357
	INFANTAS CENTRAL	4	385
	INFANTAS NORTH	39	628
	INFANTAS SOUTH	3	184

Tabla 16. Promedios de *Runlife* para Segundas vallas de los Pozos del Proyecto.

		2DAS FALLAS		
		# FALLAS	FALLAS	ACUMULADO
# POZOS		37		
RUNLIFE TOTAL	SIN CENSURA	96	233	386
	CENSURADO	60	252	418
RUNLIFE	CIRA EAST	15	353	441
	CIRA NORTH	13	107	339
	CIRA SOUTH	56	234	343
	INFANTAS CENTRAL	0	0	0
	INFANTAS NORTH	9	217	614
	INFANTAS SOUTH	2	199	473

Tabla 17. Promedios de *Runlife* para Terceras Fallas de los Pozos del Proyecto.

		3ERAS FALLAS		
		# FALLAS	FALLAS	ACUMULADO
# POZOS		28		
RUNLIFE TOTAL	SIN CENSURA	53	180	412
	CENSURADO	39	166	396
RUNLIFE	CIRA EAST	7	284	503
	CIRA NORTH	6	57	410
	CIRA SOUTH	39	185	392
	INFANTAS CENTRAL	0	0	0
	INFANTAS NORTH	6	147	443
	INFANTAS SOUTH	0	0	0

En las Tablas 18, 19 y 20 se muestran los promedios de los caudales para primeras, segundas y terceras fallas respectivamente para cada zona.

Tabla 18. Promedios de Caudales para Primeras Fallas de los Pozos del Proyecto.

		1ERAS FALLAS	
		# FALLAS	CAUDAL
# POZOS		111	
CAUDAL TOTAL	SIN CENSURA	204	841
	CENSURADO	126	834
CAUDAL	CIRA EAST	26	744
	CIRA NORTH	26	720
	CIRA SOUTH	105	980
	INFANTAS CENTRAL	4	328
	INFANTAS NORTH	39	704
	INFANTAS SOUTH	3	356
PROMEDIO TOTAL		695	

Tabla 19. Promedios de Caudales para Segundas Fallas de los Pozos del Proyecto.

		2DAS FALLAS	
		# FALLAS	CAUDAL
# POZOS		37	
CAUDAL TOTAL	SIN CENSURA	96	968
	CENSURADO	60	927
CAUDAL	CIRA EAST	15	824
	CIRA NORTH	13	754
	CIRA SOUTH	56	1087
	INFANTAS CENTRAL	0	0
	INFANTAS NORTH	9	930
	INFANTAS SOUTH	2	268
PROMEDIO TOTAL		899	

Tabla 20. Promedios de Caudales para Terceras Fallas de los Pozos del Proyecto.

		3ERAS FALLAS	
		# FALLAS	CAUDAL
# POZOS		28	
CAUDAL TOTAL	SIN CENSURA	53	1025
	CENSURADO	39	1015
CAUDAL	CIRA EAST	7	867
	CIRA NORTH	6	914
	CIRA SOUTH	39	1047
	INFANTAS CENTRAL	0	0
	INFANTAS NORTH	6	1174
	INFANTAS SOUTH	0	0
PROMEDIO TOTAL		1000	

En la Tabla 21 se muestran los promedios de *Runlife* y caudales para las fallas totales del campo La Cira – Infantas.

Tabla 21. Promedios de *Runlife* y Caudales para Fallas Totales del Campo.

		FALLAS TOTALES	
		VALOR	# FALLAS
RUNLIFE	CIRA EAST	467	63
	CIRA NORTH	351	50
	CIRA SOUTH	369	262
	INFANTAS CENTRAL	385	4
	INFANTAS NORTH	541	63
	INFANTAS SOUTH	299	5
	PROMEDIO	402	
CAUDAL	CIRA EAST	983	63
	CIRA NORTH	771	50
	CIRA SOUTH	1020	262
	INFANTAS CENTRAL	328	4
	INFANTAS NORTH	834	63
	INFANTAS SOUTH	321	5
	PROMEDIO	709	

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se analizaron los datos de varilla para todos los pozos con completamientos iniciales y reactivaciones dentro del contrato de asociación entre Ecopetrol S.A. y Occidental Andina LLC y se encontró que los diámetros de varillas más usados en el Campo la Cira – Infantas son 7/8” y 1”, y los grados más usados son grado D Carbon y *Special High Strength*.
- Se observa que a pesar de que los grados de mayor porcentaje de falla son los de grado *Special High Strength*, UHS y D Carbon con porcentajes de 22.42%, 22.42% y 20,18% respectivamente, los porcentajes de instalación de estos mismo se encuentran muy por encima de los valores de falla (42.63% para *Special High Strength*, 10,99% para UHS y 29,82% para D Carbon), exceptuando el porcentaje del grado UHS el cual es obviamente menor en las instalaciones, lo que indica que son las varillas de este grado las que tiene un índice de falla mayor.
- Se observó que para los diámetros de fallas, los mayores porcentajes son de los diámetros de 1”, 7/8” y 1 ¼” con porcentajes de 41.84%, 26.24% y 15.13% respectivamente, siendo los valores de instalación de los diámetros de 1” Y 7/8” mayores a los de falla, con porcentajes de 48.67% y 36.84%, por el contrario el porcentaje de instalación para el diámetro de 1 ¼” es casi un tercio del porcentaje de falla (5.36%), clasificando este diámetro como el de mayor índice de fallamiento en el campo.
- Se calcularon los valores de *Runlife*, a partir del momento en el que se instaló la sarta de varilla, completamente nueva, hasta el momento de la falla, y se obtuvo un valor de *Runlife* promedio de 441 días para primeras fallas, 254 días para segundas fallas y de 224 días para las terceras fallas.

- Se analizaron los datos de la zona CIRA SOUTH, ya que esta figura con el mayor porcentaje de fallas en el campo, llegando a la conclusión que es debido a su alta población de pozos y por supuesto también a los altos valores de caudales que se trabajan en esta zona (siempre por encima de los 900 BFPD), gracias a las campañas de inyección que se presentaron en la zona.
- Realizando las estadísticas y efectuando comparaciones entre los pozos fallados y los pozos sin fallas del campo, se concluyó que los pozos que no han tenido fallas tienen valores de caudales proporcionalmente menores a los pozos fallados. Todos los pozos *Running* tienen valores de caudales que no sobrepasan los 350 BFPD, mientras que los pozos fallados tienen caudales que comienzan desde los 750 BFPD que se elevan hasta valores por encima de 1000 BFPD. Los pozos sin fallas pero con sarta cambiada, tienen promedio de caudales entre los valores de 500 y 700 BFPD, estando estos muy cercanos a los valores de los pozos fallados e indicando que posiblemente pudieron haber fallado de no haber hecho el reemplazo de la sarta.
- Se comprobó la poca efectividad que tiene las inspecciones visuales en campo gracias al cálculo de los valores de *Runlife* entre fechas de falla, lo cual, ayudara a mejorar las inspecciones que se realizan en campo.
- Al observar la gráfica por años de las fallas totales, se puede apreciar que para el último año, 2011, los valores de *Runlife* se encuentran muy cercanos, entre 520 y 660 días, con esto se concluye que el valor real del *Runlife* se encuentra entre el rango de los 414 días (Valor hallado con el promedio total de fallas) y los 600 días (promedio aproximado de los valores de *Runlife* para el año 2011).
- Se comprobó que al pasar el tiempo, y gracias a las mejoras que ha implementado la empresa Occidental Andina LLC en el campo, se ha disminuido el índice de fallas y se ha aumentado el valor del *Runlife* para las varillas.

- Se observa que a pesar de que el campo tiene instalado solo un 15,8% de sistemas por Cavidades Progresivas, estos sistemas tienen el 54% del total de las fallas del campo y la mayoría de estas se encuentran en el rango de los 100 a 400 días de Runlife (90 fallas de un total de 243 fallas en PCP)
- Debido a que la mayor proporción de fallas se deben al Rozamiento, se recomienda seguir incluyendo en los diseños, centralizadores para las varillas a profundidades donde el Dog Leg Severity sea mayor a 1, además de implementar el uso de rotadores de varillas para evitar el desgaste localizado en las varillas. Se recomienda también la toma de *Surveys* para los pozos que aún no lo tienen, ya que este es indispensable al momento de elaborar un diseño.
- Siendo la corrosión otro de los principales problemas y por ende una razón influyente de falla, se recomienda el continuo uso de inhibidores de corrosión, ya que el campo aún se encuentra en etapas de inyección y la corrosión ha ido aumentando con el transcurrir de los años. También se recomienda realizar pruebas de compatibilidad entre los fluidos del campo y los inhibidores de corrosión.
- Se recomienda realizar un estudio que abarque el cálculo de desgaste de varillas, teniendo en cuenta las propiedades del yacimiento (profundidades, cargas, presencia de agentes corrosivos, etc.), el estado mecánico y las condiciones operativas de los pozos, con el fin de obtener un promedio más cercano al real.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTA OIL TOOL, A Dover Company, Sucker Rods & Drive Rods[®], Calgary, Canada, 2008.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), Spec 11B; Specification for Sucker Rods, Edición 26, Enero 1998
- CHACIN, Nelvy; Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnostico, Análisis de Falla y Trouble Shooting; ESP OIL Engineering Consultants; El Tigre, Venezuela; Septiembre 2003.
- ESPEJO, Edgar; Curso Análisis de Falla en Sistemas Mecánicos [diapositivas], OXY, Marzo 2012.
- NIND, T.E.W.; Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros, Editorial Limusa; Ontario, Canadá, 1987.
- NORRIS, A Dover Comany; Análisis de las Fallas de las Varillas de Bombeo: Un Informe Especial; 2003.
- NORRIS, A Dover Company, Steel Sucker Rods & Pony Rods, Specification Guide, 2011.
- OCCIDENTAL ANDINA LLC, Archivo Modelado H₂S, Campo La Cira – Infantas, Marzo 2012.
- OCCIDENTAL ANDINA LLC, Peer Review PCP Final [diapositivas], La Cira – Infantas, Agosto 2010.
- SANCHEZ NAVARRO, Yoel Salvador; Evaluación del Comportamiento de Producción en Pozos con Unidad de Bombeo Hidráulico CORLIFT; Universidad del Zulia, Trabajo de Grado, Marzo de 2010.
- SOLANO DIAS, Álvaro Andres; Análisis de Información Obtenida de Registros de Pozos y del Modelo Petrofísico y su Integración con la Geología del Yacimiento para Soportar el Plan de Desarrollo del Campo La Cira – Infantas, Trabajo de Grado, Escuela de Geología, UIS, 2011.

- TAKACS, Gábor; Sucker Rod Pumping Manual; PennWell Books; Tulsa, Oklahoma; 1993.
- TENARIS SIDERCA, Catalogo de Fallas PCP, 2009.
- TENARIS, PCPRod[®] Varillas Huecas para Bombeo por Cavidades Progresivas, Mayo 2009.
- TENARIS, Sucker Rods General Catalogue, Febrero 2012.
- URIETA SIERRA, Yeison Alberto; Ajuste de un Modelo Analítico para la Estimación del Desgaste en Tubería de Producción en el Campo La Cira – Infantas en Pozos Productores, Trabajo de Grado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] D-Grade Carbon Steel (D/DR) Continuous Rod, COROD[®] Continuous Rod and Flushbys, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] DWR Regular-Strength Continuous Rod, COROD[®] Continuous Rod and Flushbys, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] High-Strength (SE/SER) Continuous Rod, COROD[®] Continuous Rod and Flushbys, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] Regular-Strength (DE/DER) Continuous Rod, COROD[®] Continuous Rod and Flushbys, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] Specification Chart, Artificial Lift Systems, 2011.
- WEATHERFORD, COROD[®] SWR High-Strength Continuous Rod, COROD[®] Continuous Rod and Flushbys, 2011.
- WEATHERFORD, PRO/KC[™] Sucker- Rod Connection and Makeup Services, The Lift Experts, 2009.