

**EVALUACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE AISLAMIENTO DE ZONAS
INTERMEDIAS MEDIANTE TRABAJOS DE CEMENTACIÓN REMEDIAL EN
LA ZONA DE LLANOS NORTE.**

DANIEL ORLANDO HIGUERA ROA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

**EVALUACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE AISLAMIENTO DE ZONAS
INTERMEDIAS MEDIANTE TRABAJOS DE CEMENTACIÓN REMEDIAL EN
LA ZONA DE LLANOS NORTE.**

DANIEL ORLANDO HIGUERA ROA

Trabajo de Grado Modalidad Practica Empresarial Presentado Como Requisito
Parcial Para Optar al Título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

Ing. RICARDO RESTREPO

Occidental de Colombia, Inc

Co-Director

Ing. Juan David Orozco

Halliburton

Tutor:

Ing. Clímaco Ortega Ch.

Universidad Industrial de Santander

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

DEDICATORIA

A Dios por guiarme siempre e iluminarme en la toma de mis decisiones.

A mi Mamá por todos sus esfuerzos que sin ellos no hubiera podido cumplir mi objetivo y por su apoyo incondicional.

A mi Papá, mis Hermanos y mi Abuelita por creer en mí y apoyarme siempre.

A Adri por su entrega y apoyo incondicional en toda mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por mi formación como Ingeniero y todo el conocimiento adquirido.

A Occidental de Colombia por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

A Ricardo Restrepo, Juan David Orozco por todo el tiempo y dedicación prestada al desarrollo del proyecto.

A Clímaco Ortega Chacón por su dedicada orientación en la culminación del proyecto.

A Juan Carlos Trujillo por permitirme desarrollar el proyecto y brindarme las herramientas necesarias para la culminación del mismo.

A la gente de Occidental por hacer de mi experiencia adquirida un rato alegre y agradable.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES	1
1.1. RESEÑA HISTÓRICA	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO	2
2. CAMPO CAÑO LIMÓN	4
2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	4
2.2. GEOLOGÍA	4
2.2.1. Ubicación Geológica	6
2.2.2. Geología Estructural	6
2.2.3. Estratigrafía	7
2.3. PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL YACIMIENTO	9
2.3.1. Porosidad	10
2.3.2. Permeabilidad	10
2.3.3. Saturación de Fluidos	11
2.4. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DEL YACIMIENTO	11
3. CEMENTACIÓN REMEDIAL	13
3.1. CLASIFICACIÓN	13
3.1.1. Reparación del Hueco	13
3.1.2. Reparación del Pozo	13
3.1.3. Reparación de la Formación	14
3.2. FUNCIONES BÁSICAS DEL CEMENTO	14
3.2.1. Deshidratación	14
3.2.2. Hidratación	14

3.3.	APLICABILIDAD DE LAS CEMENTACIONES REMEDIALES	15
3.4.	TIPOS DE CEMENTACIÓN REMEDIAL	16
3.4.1.	Cementación Forzada a Alta Presión	16
3.4.2.	Cementación Forzada a Baja Presión	17
3.5.	TÉCNICAS DE CEMENTACIÓN FORZADA	18
3.5.1.	Método “Bullehead”	18
3.5.2.	Método “Bradenhead” o Tapón Balanceado	20
3.5.3.	Forzamiento Usando Herramientas de Aislamiento Mecánicas.	21
3.6.	DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO	22
3.6.1.	Tipo de Cemento	22
3.6.2.	Control de Filtrado	24
3.6.3.	Cantidad de Cemento	25
3.6.4.	Resistencia a la Compresión	26
3.6.5.	Resistencia a la Tracción	26
3.6.6.	Fuerza de Adherencia	27
3.7.	TIEMPO DE ESPERA PARA FRAGÜE DE CEMENTO	27
3.8.	PRUEBA DEL TRABAJO DE AISLAMIENTO	27
3.9.	FORMULAS DE AYUDA PARA CEMENTACIONES REMEDIALES	28
4.	ESTADISTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS	31
4.1.	DEFINICIONES	31
4.1.1.	Experimento	31
4.1.2.	Poblaciones y Muestras	32
4.1.3.	Tipo de Datos	33
4.1.4.	Medidas de Tendencia Central	34
4.1.5.	Medidas de Dispersión	36
4.1.6.	Forma	39

4.2.	ANÁLISIS DE DATOS CUALITATIVOS	41
4.2.1.	Tabla de Contingencia	42
4.2.2.	Estadísticos	46
4.2.2.1.	CHI Cuadrado	47
4.2.2.2.	Correlaciones	48
4.2.2.3.	Coeficiente de Correlación de Pearson	52
4.2.2.4.	Coeficiente de Correlación de Spearman	52
4.3.	REGRESIÓN LOGISTICA	53
5.	ANALISIS DE TRABAJOS RECIENTES DE CEMENTACIÓN REMEDIAL EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN	58
5.1.	POZO A-76	58
5.2.	POZO A-62	60
5.3.	POZO A-58	63
5.4.	POZO A-99	66
5.5.	POZO A-91	68
5.6.	POZO A-21	69
5.7.	POZO B-16	72
5.8.	POZO C-16	75
6.	ANALISIS ESTADISTICO	77
6.1.	ANALISIS MEDIANTE ESTADISTICA DESCRIPTIVA	77
6.2.	ANALISIS BIVARIANTE	81
6.2.1.	Formación	82
6.2.2.	Espesor	83
6.2.3.	Permeabilidad	85
6.2.4.	Producción Acumulada	87
6.2.5.	Tasa de Producción	90
6.2.6.	Arena	92

6.2.7. Días de completamiento	93
6.2.8. Porosidad	95
6.3. EVALUACIÓN DE POSIBLES INTERACCIONES	95
6.3.1. Zona	95
6.3.2. Permeabilidad	96
6.3.3. Producción Acumulada	97
6.3.4. Tasa De Producción	99
6.4. REGRESIÓN LOGISTICA	100
6.4.1. Bloque Inicial	103
6.4.2. Bloque 1: Método “Enter” ó Introducir	106
6.5. EVALUACIÓN DEL MODELO	115
7. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO A SEGUIR	124
7.1. TIPO I	126
7.2. TIPO II	129
7.3. TIPO III	131
8. CONCLUSIONES	136
9. RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFIA	142
ANEXO A	143
ANEXO B	145
ANEXO C	146

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1. Localización de los campos Caño Limón, Pastora, La yuca Este, y Matanegra Oeste	5
Figura N°2. Ubicación de los campos del área de Cravo norte y Chipirón	5
Figura N°3. Técnica “Bullhead	19
Figura N°4. Esquema del procedimiento de un forzamiento realizado con tapón balanceado	21
Figura N°5. Cementación remedial utilizando herramientas de aislamiento mecánico	23
Figura N°6. Distribución de un grupo de alumnos según las notas obtenidas	40
Figura N°7. Diagramas de dispersión expresando diferentes tipos de relación	50
Figura N°8. Diagramas de dispersión representando relación lineal e independencia lineal.	51
Figura N°9. Historia de producción del pozo A-76	59
Figura N°10. Historia de producción de arena del pozo A-76	61
Figura N°11. Historia de producción del pozo A-62	62
Figura N°12. Historia de producción de arena del pozo A-62	62
Figura N°13. Historia de producción del pozo A-58	64
Figura N°14. Historia de producción de arena del pozo A-58	65
Figura N°15. Historia de producción del pozo A-99	66
Figura N°16. Historia de producción de arena del pozo A-99	67
Figura N°17. Historia de producción del pozo A-21	71

Figura N°18. Prueba de inyektividad del pozo B-16.	74
Figura N°19. Trabajo de cementación remedial del pozo B-16.	74
Figura N°20. Trabajo de cementación remedial del pozo C-16.	76
Figura N°21. Distribución de porcentaje éxito/fracaso por Zona.	83
Figura N°22. Distribución de frecuencias Operación*Espesor.	85
Figura N°23. Distribución de frecuencias Operación*Permeabilidad.	87
Figura N°24. Distribución de frecuencias Operación*Producción acumulada.	89
Figura N°25. Distribución de frecuencias Operación*Tasa de Producción.	91
Figura N°26. Ventana de SPSS del paquete de regresión logística.	101
Figura N°27. Selección de las variables categóricas para el modelo de regresión logística.	102
Figura N°28. Grupos observados y probabilidades predichas por SPSS.	117
Figura N°29. Curva ROC obtenida en SPSS.	120
Figura N°30. Esquema de la metodología de los trabajos de cementación remedial.	133
Figura N° 31. Árbol de decisión para la planeación del diseño de la operación.	135

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1. Subdivisión estratigráfica de las zonas productoras	9
Tabla N°2. Porosidades y saturaciones promedio para el campo Caño Limón	10
Tabla N°3. Propiedades promedio de las formaciones y fluidos en Caño Limón.	12
Tabla N°4. Aplicaciones de los cementos API	24
Tabla N°5. Ejemplo de una tabla de contingencia	43
Tabla N°6. Tabla de contingencia. Enfermedad / Factor de riesgo.	45
Tabla N°7. PLT corrido en el pozo A-21 en 1987.	69
Tabla N°8. PLT corrido en el pozo A-21 en 1997.	70
Tabla N°9. Estadística descriptiva de los parámetros del intervalo a asilar.	79
Tabla N°10. Continuación de la estadística descriptiva de los parámetros de estudio.	80
Tabla N°11. Estadística descriptiva de las condiciones operacionales del trabajo de cementación remedial.	81
Tabla N°12. Operación*zona. Tabla de contingencia	82
Tabla N°13. Operación*zona. Prueba Chi-Cuadrado.	83
Tabla N°14. Discretización de la variable “espesor”.	84
Tabla N°15. Tabla de contingencia Espesor*Operación.	84
Tabla N°16. Operación*Espesor. Prueba Chi-Cuadrado.	85
Tabla N°17. Discretización de la variable “permeabilidad”.	86
Tabla N°18. Tabla de contingencia Permeabilidad * Operación.	86
Tabla N°19. Operación*Permeabilidad. Prueba Chi-Cuadrado.	87
Tabla N°20. Discretización de la variable “Producción acumulada”.	87

Tabla N°21. Tabla de contingencia Producción acumulada * Operación.	89
Tabla N°22. Operación*Producción Acumulada. Prueba Chi-Cuadrado.	90
Tabla N°23. Discretización de la variable “Tasa de Producción”.	90
Tabla N°24. Tabla de contingencia Tasa de Producción * Operación.	91
Tabla N°25. Operación*Tasa De Producción. Prueba Chi-Cuadrado.	92
Tabla N°26. Tabla de contingencia Arena * Operación.	93
Tabla N°27. Operación*Arena. Prueba Chi-Cuadrado.	93
Tabla N°28. Discretización de la variable “Días de completamiento”.	94
Tabla N°29. Tabla de contingencia Días de Completamiento * Operación.	94
Tabla N°30. Operación*Días De Completamiento. Prueba Chi-Cuadrado.	95
Tabla N°31. Operación*Zona*Numero De Intentos. Tabla De Contingencia.	96
Tabla N°32. Operación*Permeabilidad*Numero de Intentos. Tabla de Contingencia.	97
Tabla N°33. Operación*Prod. Acumulada*Numero de Intentos. Tabla de Contingencia.	98
Tabla N°34. Operación*Tasa de producción*Núm. de intentos. Tabla de contingencia.	99
Tabla N°35. Resumen del procesamiento de los casos.	102
Tabla N°36. Codificación de la variable dependiente.	103
Tabla N°37. Salida de SPSS de la regresión logística binaria. Código de las categorías de las variables.	104

Tabla N°38. Tabla de clasificación	105
Tabla N°39. Variables en la ecuación.	106
Tabla N°40. Resumen del modelo.	106
Tabla N°41. Tabla de clasificación del modelo.	108
Tabla N°42. Variables en la ecuación.	109
Tabla N°43. Salida de SPSS de la regresión logística binaria con la variable formación incluida. Código de las categorías de las variables.	110
Tabla N°44. Resumen del modelo teniendo en cuenta el parámetro “zona”.	110
Tabla N°45. Tabla de clasificación del modelo incluyendo el parámetro formación.	111
Tabla N°46. Tabla de clasificación del modelo incluyendo otros parámetros.	112
Tabla N°47. Variables en la ecuación con los parámetros definitivos.	113
Tabla N°48. Nomenclatura de coeficientes en la ecuación con sus respectivos rangos.	115
Tabla N°49. Tabla de clasificación del modelo incluyendo el parámetro formación tomando como punto de corte 0.7.	118
Tabla N°50. Tabla resumen de clasificación del modelo tomando varios puntos de corte.	119
Tabla N°51. Área bajo la curva ROC.	121
Tabla N°52. Test de Hosmer-Lemeshow.	122
Tabla N°53. Parámetros del trabajo de cementación remedial en el pozo D-03.	123
Tabla N°54. Parámetros del trabajo de cementación remedial en el pozo D-55.	123
Tabla N°55. Definición de los rangos para trabajos Tipo I.	126

Tabla N°56. Definición de los rangos para trabajos Tipo II.	129
Tabla N°57. Definición de los rangos para trabajos Tipo III.	131
Tabla A1. Resumen de los trabajos de cementación remedial realizados en Caño Limón.	143
Tabla B. Historia de Iteración del modelo de Regresión Logística.	145
TABLA C1. Análisis descriptivo – Días de Completamiento.	147
TABLA C2. Análisis descriptivo – Espesor Intervalo a Aislar.	148
TABLA C3. Análisis descriptivo – Permeabilidad.	150
TABLA C4. Análisis descriptivo – Porosidad.	152
TABLA C5. Análisis descriptivo – Producción Acumulada.	154
TABLA C6. Análisis descriptivo – Tasa de Producción.	155

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE AISLAMIENTO DE ZONAS INTERMEDIAS MEDIANTE TRABAJOS DE CEMENTACIÓN REMEDIAL EN LA ZONA DE LLANOS NORTE.*

AUTOR: DANIEL ORLANDO HIGUERA ROA**

PALABRAS CLAVES: Forzamiento, Lechada de Cemento, Aislamiento, Cementación Remedial, Análisis Estadístico, Regresión Logística, Tablas de Contingencia, Caño Limón, Matanegra, La Yuca, Llanos Norte.

RESUMEN

Llanos Norte es un campo que tiene características muy especiales, alta permeabilidad y un acuífero activo infinito, esto conlleva a altas tasas de producción y gran volumen de fluido producido, lo que en la mayoría de las veces genera cavernas entre la tubería de revestimiento y la formación. Al querer hacer aislamiento de zonas ya depletadas, se puede realizar de varias formas según la necesidad, si se quiere recompletar en arenas de menor profundidad se sienta un empaque tapón, si es a mayor profundidad se requiere de un aislamiento con cemento. En el primer caso no se presentan inconvenientes, sin embargo cuando se requiere aislar con cemento se presentan problemas en zonas de bastante producción.

Los trabajos de cementación remedial vienen en aumento debido a la declinación del campo, por lo tanto se realizó la evaluación de los parámetros que influyen en las cementaciones remediales como tasa de producción, días de producción, producción de arena, producción acumulada, entre otros, por medio de un análisis estadístico a través de tablas de contingencia, el cual permitió identificar los parámetros más influyentes e identificar rangos que asocien el éxito o fracaso de la operación.

Se definieron tres tipos de situaciones que se presentaba en fondo del pozo, ya que no todos los trabajos de cementación remedial presentaban las mismas condiciones, es decir, no en todos los trabajos había problemas, pues depende de los parámetros anteriormente descritos. Se definieron: Tipo I para zonas depletadas con grandes cavernas, Tipo II para zonas depletadas con cavernas pequeñas y el Tipo III para zonas sin cavernas. El tamaño de las cavernas nos lo dan los parámetros enunciados anteriormente. Así mismo, se desarrolló un modelo de Regresión Logística con el fin de calcular la probabilidad de éxito de un trabajo de cementación remedial según las condiciones dadas.

* Tesis de Grado modalidad Practica Empresarial

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ing. Ricardo Restrepo, Ing. Juan David Orozco, Ing. Clímaco Ortega Chacón.

TITLE: EVALUATION OF ISOLATION PRACTICES OF INTERMEDIATE ZONES THROUGH REMEDIAL CEMENTING WORKS IN LLANOS NORTE AREA.²

AUTHOR: DANIEL ORLANDO HIGUERA ROA**

KEYWORDS: Squeeze, Cement Slurry, Isolating, Remedial Cementing, Stastic Analysis, Logistic Regression, Caño Limón, Matanegra, La Yuca, Llanos Norte.

ABSTRACT

Llanos Norte is a field with very special characteristics, high permeability and an infinite active aquifer involving high production rates and great volumes of fluid produced, that most of times generates caverns between casing and the formation. Isolating depleted zones could be done by different ways according to requirements, if there is not a productive zone above the sand to be isolated, bridge plug is used isolating the lower interval; if exists a productive zone above the sand to be isolated, the remedial cementing must be used. However in zones with a big volume of fluid production, problems may appear at moment of performing the isolation job.

The remedial cementing jobs are increasing due to the field declination, because of that was performed the evaluation of parameters that affect the remedial cementing, like production rate, production days, sand production, etc. Statistic analysis was done through 2X2 charts, reaching the most influent parameters and identifying ranges associated to the success or failure of the operation.

Three kinds of situations were defined: type I for depleted zones with a big void space or caverns between the formation and casing; type II for depleted zones with a small void space between the formation and casing; type III to zones without caverns. A logistic regression model was performed to calculate success probabilities in a remedial cementing job according to the given conditions of the formation and wellbore production parameters.

* Bachelor degree dissertation in the modality of business internship.

** Physical – Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Eng. Ricardo Restrepo, Eng. Juan David Orozco, Eng. Clímaco Ortega Chacón.

INTRODUCCIÓN

Caño Limón es un campo que ha venido produciendo desde hace más de 20 años en Colombia. Dadas sus propiedades petrofísicas, es un campo con condiciones inigualables para la extracción del hidrocarburo, su alta permeabilidad y su acuífero activo, el cual es considerado infinito, permiten altas tasas de producción. No obstante, Caño Limón es un campo que ya está declinando y por lo tanto los trabajos de cementación remedial para aislar zonas depletadas son cada vez más requeridos, pasando de cero trabajos realizados en el 2005 a once trabajos realizados tanto en el 2006 como en el 2007.

Es por esto la importancia del presente trabajo, ya que con el aumento de trabajos de cementación remedial, también viene aumentando el número de intentos para aislar con cemento la zona deseada, haciendo muy costoso este tipo de operación. La explicación es sencilla, a medida que pasa el tiempo las zonas a aislar son cada vez más depletadas ya que son arenas con gran producción de agua, altas tasas de producción y por lo tanto, en la mayoría de los casos, alta producción de arena, lo que puede generar posibles cavernas y espacios vacíos en la formación productora.

Debido a la problemática que se venía presentando, se decidió adelantar un proyecto el cual permitiera asegurar en un 100% el aislamiento de zonas a través de cementación remedial disminuyendo al mínimo el número de intentos por operación.

Como primera medida se recomendó recopilar la información de todos los trabajos de cementación remedial realizados en el campo de Caño Limón desde el año 1990 hasta la actualidad con el fin de observar la evolución que se ha venido dando y los métodos que se han utilizado. Una vez identificado los

trabajos, se organizó y se clasificó toda la información según el resultado de la operación. Posteriormente se realizó un análisis estadístico descriptivo con el fin de identificar las variables que más influyen sobre el resultado de la operación para luego ser utilizadas en el desarrollo de un modelo estadístico el cual permitirá predecir el éxito de un trabajo de cementación remedial. Por último, se generó una matriz que sirva de guía en la planeación de los trabajos de aislamiento de zonas con cementaciones remediales, de acuerdo a su estadística de producción y propiedades del yacimiento y condición mecánica del pozo.

1. GENERALIDADES

1.1. RESEÑA HISTÓRICA

OCCIDENTAL DE COLOMBIA, INC. Es una división de la compañía multinacional Occidental Oil & Gas dedicada a la exploración, explotación y producción de recursos energéticos e hidrocarburos en varias partes del mundo, además de la industria química.

El 1 de Junio de 1980 ECOPETROL Y OCCIDENTAL DE COLOMBIA firmaron el contrato de Asociación Cravo Norte para la exploración de petróleo sobre los bloques Cravo Norte, Cinaruco, Rondon, Orocue y Guarrojo de un millón de hectáreas, ubicados en el departamento de Arauca, iniciando así uno de los proyectos más ambiciosos de la industria petrolera en Colombia.

El campo Caño Limón fue descubierto el 1 de Julio de 1983 por el pozo direccional Caño Limón 1 produciendo de la formación Mirador Inferior 10,900 barriles de petróleo por día (BOPD); y en julio de ese mismo año se declaró la comercialidad del yacimiento.

En 1984 el contrato de asociación contaba con la participación de Occidental con un 25% y operando el campo, Royal Dutch Shell con otro 25% y Ecopetrol con el 50%. En 1998 SHELL intercambia activos con Occidental, quedando esta compañía como único socio privado del contrato.

La duración del contrato inicialmente era de 28 años que se dividen en dos periodos: el de la exploración que tiene una duración máxima de 6 años y desarrollo, de 22 años. Al finalizar este periodo todas las instalaciones, equipos y producción restante pasan a ser propiedad de ECOPETROL sin ningún costo.

Las condiciones económicas del Contrato de Asociación Cravo Norte le aseguran al estado Colombiano el 82% de las utilidades netas generadas por el proyecto petrolero. Esta participación mayoritaria la recibe el Estado a través de ECOPETROL en el proyecto.

En 1984 fue declarado campo comercial y a partir de esta fecha ECOPETROL participa en la producción y comparte la inversión en un 50%. El 5 de diciembre de 1985 se inicio la producción comercial con 19 pozos perforados con una producción promedio de 8,000 barriles de fluido por día (BFPD).

En el año 2004 Occidental y Ecopetrol firmaron Otrosí al contrato Asociación Cravo Norte para extensión del mismo hasta el límite económico del campo.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL YACIMIENTO

Caño Limón es un yacimiento de aceite negro, cuya energía está constituida por un empuje frontal de agua ó acuífero activo, el cual le da soporte y mantenimiento de presión a la estructura.

Se caracteriza por ser un yacimiento con alta heterogeneidad, en donde no se encuentra una arena productora continua, sino que por el contrario, se tiene una distribución de canales que hacen más compleja su explotación; sin embargo produce principalmente de la arenisca Mirador, a una profundidad promedio de 7,600 pies.

Según estudios iniciales se creía que el campo Caño Limón estaba conformado por una sola estructura, no obstante gracias a la ayuda de tecnología sísmica y con la perforación de nuevos pozos, se identificó la existencia de tres cierres estructurales que hoy en día corresponden a las áreas productivas del Campo; Caño Limón, La Yuca y Matanegra.

Con el pasar de los años, la perforación de pozos en la parte sur occidental de la estructura del Campo, llevó a la comercialidad en junio de 1987 al Campo Redondo, con los pozos Redondo – 01 y Caño Verde – 01; de igual forma en 1989 se inició la producción de otro campo descubierto denominado Caño Yarumal, adyacente al Campo Matanegra al norte del Campo Caño Limón.

En los últimos años con la perforación de nuevos pozos exploratorios en estructuras cercanas al bloque Cravo Norte, se cuenta con 3 campos pequeños, La Yuca Este, Redondo Este, Jiba, Caricare y Cosecha.

2. CAMPO CAÑO LIMÓN

2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA^{3 4}

El campo Caño Limón se encuentra ubicado dentro del área del contrato de Asociación Cravo Norte, el cual abarca una extensión de 260.000 hectáreas localizadas en el extremo Norte de los Llanos Orientales de Colombia, en el departamento de Arauca entre la población de Arauquita y el caserío de La Yuca. Geográficamente el sector Cravo Norte está limitado al norte y al oeste por el río Arauca, al sur con el río Casanare y al oeste con la Cordillera (figura 1). Dicha área está localizada en el extremo este de la cuenca de los Llanos Orientales.

El área productiva comprende seis campos petrolíferos: Caño Limón, Caño Yarumal, Matanegra, Caño Verde, La Yuca y Redondo (Figura 2).

2.2. GEOLOGÍA⁵

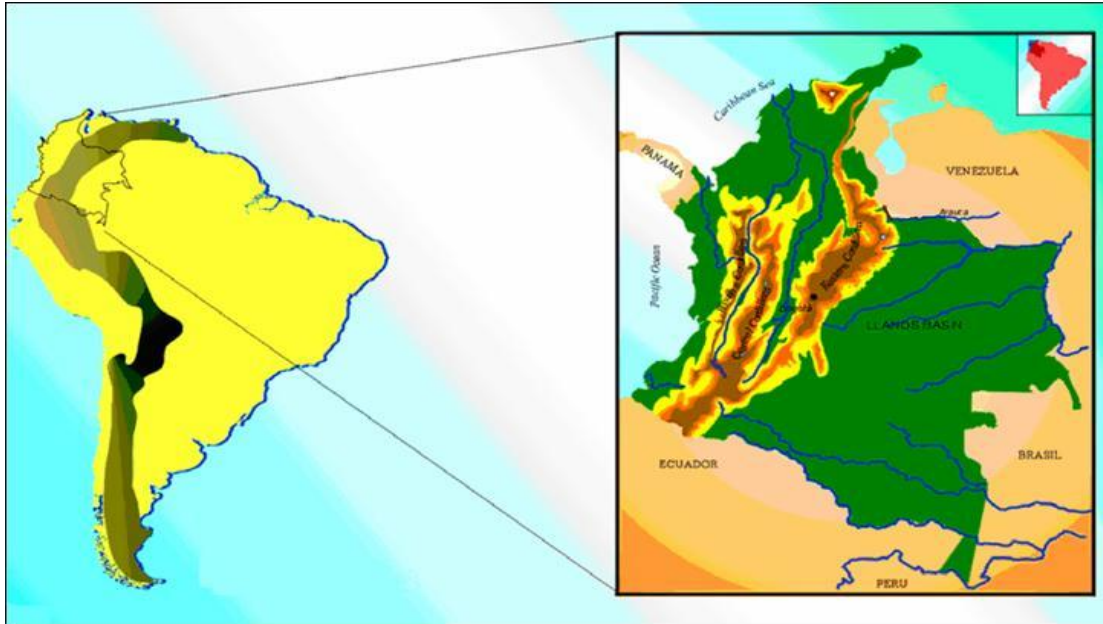
Los yacimientos comprenden rocas del Cretáceo, Eoceno y Oligoceno, son arenas Deltaicas pobremente consolidadas, con una profundidad promedio de 7,600 pies (2,315 metros) El mecanismo de producción es un fuerte y activo empuje hidráulico natural.

³ GABELA, Víctor H, Asociación ECOPEL-Occidental Campo Caño Limón. Llanos Orientales de Colombia. II Simposio Exploración de Cuencas Subandinas. Bogotá Agosto de 1985.

⁴ RIVERO RT y DOMINGUEZ JG Caño Limón Field Colombia: The latest giant oil reservoir in South America

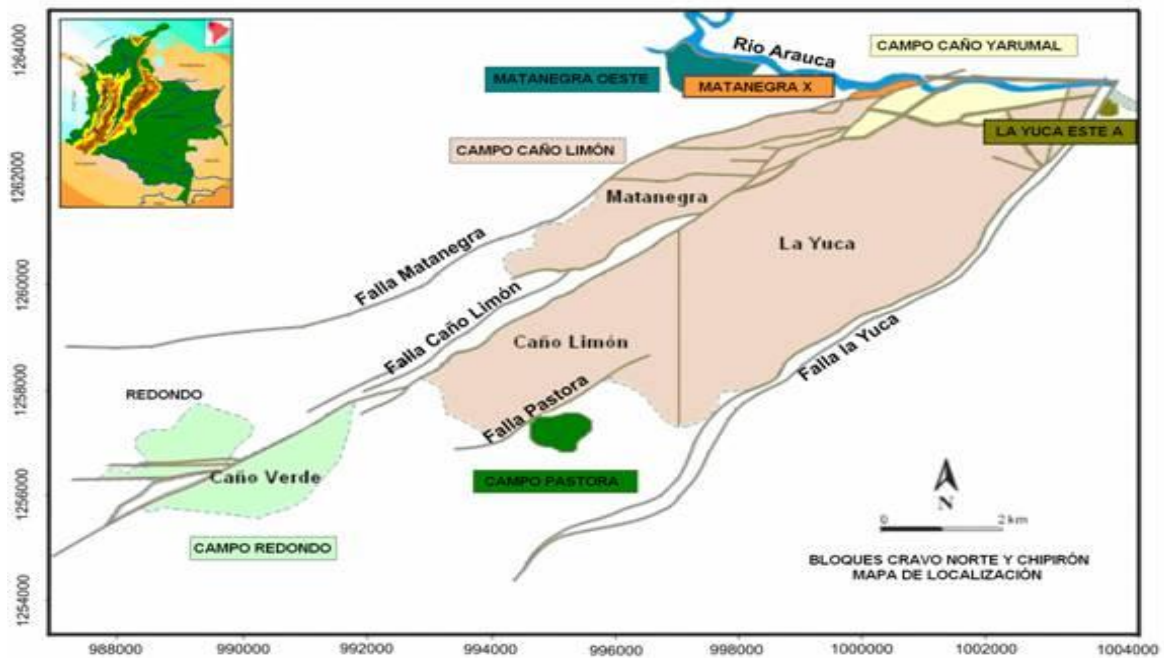
⁵ CLEVELAND, M.N y MOLINA, J Deltaic Reservoir of the Caño Limón Field, Colombia, South America. Casebook in East Science, 1990.

Figura 1. Localización de los campos Caño Limón, Pastora, La Yuca Este, y Matanegra Oeste.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc

Figura 2. Ubicación de los campos del área de Cravo norte y Chipirón.



Fuente: Occidental de Colombia, Inc

2.2.1. Ubicación Geológica

El campo está situado sobre el arco de Arauca en el flanco Norte de la Cuenca de los Llanos Orientales. Al este del arco de Arauca se encuentran las cuencas de Barinas y Apure (Venezuela). Al este del campo se encuentra el escudo granítico de Guyana y al oeste la cordillera de los Andes.

La región norte de los Llanos es un flanco monoclinal de cuenca que desciende en dirección oeste con buzamientos muy leves. La formación estructural general consiste principalmente en fallamiento de tipo normal con dirección noreste-suroeste cuyo origen parece ser paleozoico con reactivaciones subsiguientes que involucran hasta sedimentos Terciarios. Adicionalmente el área de Caño Limón está afectada por un fallamiento significativo de tipo transcurrente orientado en dirección noreste-suroeste. El origen de este fallamiento no ha sido aun determinado pero se estima que puede estar relacionado con el desarrollo estructural del Arco de Arauca, que es un alto de basamento que separa el sector norte de la cuenca de los Llanos, de las cuencas de Barinas y Apure de Venezuela. La cuenca de los Llanos se caracteriza también por una historia tectónica estable lo que ha favorecido una sedimentación cíclica relativamente constante.

2.2.2. Geología Estructural

El Campo comprende tres cierres estructurales, cada uno de ellos asociado a un área productiva, denominados Caño Limón, Matanegra y La Yuca. Estas estructuras parecen haber sido formadas por el movimiento lateral de la Falla Caño Limón, que secciona el Campo de noreste a suroeste y por el desplazamiento asociado a las fallas convergentes de Matanegra y La Yuca. Adicionalmente el Campo Caño Limón está relacionado con la Falla de Arauca que es de corta extensión y corre paralela al río Arauca en la parte norte del Campo. Las fallas Matanegra, Arauca y La Yuca circundan el campo definiendo sus límites noroeste, norte y sureste respectivamente.

Las Fallas Caño Limón, Matanegra y la Yuca dividen el Campo en dos bloques productores de petróleo. El bloque más grande está limitado por las fallas de Caño Limón y la Yuca y se denomina bloque Caño Limón – La Yuca; el bloque adicional denominado Matanegra está limitado por las fallas de Caño Limón y Matanegra, estas tres fallas son consideradas sellantes. Sin embargo el bloque Cravo Norte está compuesto por tres campos a saber: Campo Caño Yarumal, Campo Caño Limón y Campo Redondo.

2.2.3. Estratigrafía

La sección estratigráfica del Campo se extiende desde el oligoceno al Cretáceo reciente, comprendidos en 820 pies de columna sedimentaria (Tabla 1); donde se encuentran los estratos productores de Caño Limón, en donde la formación más importante es la Carbonera inferior/Mirador que contiene el 80% del aceite total in situ del Campo, las otras formaciones son el K1, el K2A de edad Cretácica y la Carbonera Superior del Oligoceno, que son una serie de canales aislados del soporte del acuífero.

- **Pre - cretáceo:** esta sección comprende en general areniscas y lutitas arenosas, de posible edad paleozoica. En el Campo Caño Limón, las secuencias estratigráficas con interés petrolífero se analizan a partir del Cretáceo Superior y son denominadas de cobertura productiva.
- **Cretáceo:** esta sección está compuesta principalmente por areniscas finas, con intercalaciones de arcillolitas de alto contenido de cuarzo. Su espesor es superior a 400 pies. En el Campo Caño Limón esta edad geológica se ha dividido en cuatro unidades productivas limitadas entre sí por discordancias y corresponden a la base del K3, K2A, K2B y K1.
- **Terciario:** En el Campo Caño Limón esta sección se encuentra formada por cuatro formaciones a saber: Carbonera Inferior, Carbonera Superior, León y Guayabo; compuestas generalmente por areniscas arcillosas,

areniscas arcósicas, cuarcíticas, por arcillolitas y algunas intercalaciones de lutitas. Su espesor promedio aproximado es de 7,600 pies.

Análisis geoquímicos realizados en muestras de petróleo del Campo Caño Limón indican que la Roca Generadora proviene principalmente de sedimentos marinos ricos en materia orgánica, a diferencia de los crudos producidos por otros campos ubicados en áreas cercanas en la misma cuenca.

La fuente de generación del petróleo producido en el área de Caño Limón aún no ha sido definida, se cree que esta fuente pudo ubicarse en sedimentos profundos hacia el oeste de la cuenca, es decir en el Piedemonte Llanero, o en las cuencas vecinas de Venezuela.

Por el contrario la definición de las unidades K1 y K2 del Cretáceo y Carbonera Inferior, Mirador y Carbonera Superior del terciario está dada para las rocas almacenadoras del Campo.

En la siguiente tabla se muestra la Columna estratigráfica de los Campo Caño Limón, Caño Yarumal y Redondo.

Tabla 1. Subdivisión estratigráfica de las zonas productoras. Occidental de Colombia. Inc.

EDAD	FORMACIÓN	MIEMBRO	BLOQUES	ESPESOR	
				mt	ft
Oligoceno Temprano a Mioceno Medio	Carbonera Superior	C4	CL-LY	9	30
		C5	CL-LY-MN	10	30
Cretáceo Superior a Eoceno Tardío	Carbonera Inferior (Mirador)	M1A	CL-LY-MN	80	260
		M1B	CL-LY-MN		
		M1C1	CL-LY-MN		
		M1C2	CL-LY-MN		
		M2A	CL-LY-MN		
		M2B	CL-LY-MN		
		M3A	CL-LY-MN		
		M3B	CL-LY-MN		
		M3C	CL-LY-MN		
		M4A	CL-LY-MN		
		M4B	CL-LY-MN		
Cretácico	Cretáceo	K1A	MN	76	250
		K1B	MN-LY		
		K1C	MN-LY		
		K1D	MN-LY		
		K1E	MN-LY	76	250
		K2A1	MN		
		K2A2	MN		
		K2A3	MN		
K2A4	MN				

Las abreviaciones C, A, B significan Caño Limón, La Yuca y Matanegra respectivamente. A, B, C, D, E: Arenas pertenecientes al miembro K1. 1, 2, 3, 4: Arenas pertenecientes al miembro K2A. K1 y K2A son dos miembros del Cretáceo superior.

2.3. PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL YACIMIENTO

La evaluación de las propiedades petrofísicas de las áreas Matanegra, La Yuca y Caño Limón se ha llevado a cabo con un minucioso análisis de un completo set de perfiles eléctricos tomados a los diferentes pozos de estas áreas. Adicionalmente, en los corazones disponibles se han realizado pruebas de rutina para obtener porosidad y permeabilidad de las arenas, así como análisis especiales para determinar las propiedades dinámicas del yacimiento.

2.3.1. Porosidad

Los valores de porosidad de las áreas productivas del Campo Caño Limón son altos observándose los mayores valores en la Formación Carbonera Inferior, los cuales oscilan entre 23% y 26% en todo el campo. Las arenas C5 de la Formación Carbonera y el miembro cretáceo K2 siguen a Carbonera Inferior en los valores de la porosidad.

La tabla 2, resume las porosidades promedio, ponderando por espesor para cada uno de los yacimientos del campo; estos valores han sido determinados a partir de la correlación establecida entre las porosidades medidas en los núcleos y las calculadas de los registros eléctricos.

Tabla 2 Porosidades y saturaciones promedio para el campo Caño Limón. Occidental de Colombia. Inc.

BLOQUE	FORMACION	POROSIDAD%	SATURACIÓN DE ACEITE %
CAÑO LIMON	Carbonera Superior	20.6	67
	Carbonera Inferior/Mirador	23.8	76.9
LA YUCA	Carbonera Superior	21.3	74.9
	Carbonera Inferior/Mirador	23.8	76.9
	K1	19.9	37.3
MATANEGRA	Carbonera Superior	25.1	50
	Carbonera Inferior/Mirador	26.8	70.4
	K1	19.9	37.3
	K2	24.6	73.2

2.3.2. Permeabilidad

Los valores de permeabilidad se han determinado con base en análisis de presiones obtenidos en pruebas de formación, de producción y análisis de corazones. Las permeabilidades más altas corresponden a las arenas de la Formación Carbonera Inferior, las cuales tienen un valor promedio de cinco

darcs. Para las arenas K1 los valores promedio de permeabilidad son de un darcy, y las arenas del K2 presentan valores promedio de dos darcs.

2.3.3. Saturación de los Fluidos

Los análisis de las muestras indican que las formaciones petrolíferas se encuentran a una presión superior a la presión de burbuja y por consiguiente sólo fluidos líquidos, petróleo y agua, pueden estar contenidos en ellas.

Las saturaciones de agua y petróleo se determinan con base en la evaluación de registros eléctricos y en la utilización de programas que incorporan parámetros de porosidad y arcillosidad de los reservorios.

Una saturación residual de petróleo (S_{or}) promedio del 18% ha sido determinada para la Formación Carbonera Inferior/Mirador con base en permeabilidades relativas para el sistema de drenaje. En la tabla 2 se relaciona los valores de saturación de petróleo promedio para cada formación, estos han sido ponderados por porosidad y espesor neto productivo.

2.4. Propiedades de los Fluidos del Yacimiento

Análisis PVT muestran que los fluidos se encuentran a una presión superior a la presión de saturación (50 lpca), lo que indica la presencia solo de fases líquidas en la producción. Por ésta razón el yacimiento de Caño Limón es subsaturado y no se presentará gas libre en el yacimiento. El gas en solución medido en el laboratorio (R_s) es inferior a 15 PCN/BN. El bajo contenido de gas contribuye a la baja compresibilidad del petróleo por lo cual se espera un mínimo aporte de energía al yacimiento por expansión del petróleo.

La viscosidad del petróleo a condiciones iniciales del yacimiento (3,200 lpca, 200° F) ha sido obtenida en el laboratorio determinándose un rango de valores de 2.4 a 6.9 cp. En cuanto a la gravedad API, se determinó que varía entre 26.9 y 32.4° API a condiciones de superficie. La tabla 3, muestra las propiedades promedio de las rocas y los fluidos de Caño Limón.

Tabla 3. Propiedades promedio de las formaciones y fluidos en Caño Limón⁶.
Occidental de Colombia, Inc.

PROPIEDADES PROMEDIAS DE LOS YACIMIENTOS			
Características de las Formaciones		Características de los Fluidos	
Profundidad promedio	7600 pies	Gravedad API del petróleo	29 °API
Área	8900 acres	Presión de burbuja	50 PSI
Espesor neto con petróleo	150 pies		
Presión inicial (7100' BNM)	3213 PSI	Gas en solución	8 PCS/BF
Temperatura (7100' BNM)	207 °F		
Permeabilidad	5000 mD	FVF a 207 °F y 3200 PSI	1.05 BN/BF
Porosidad	25%	Viscosidad del petróleo a 207 °F y 3200 PSI	4 cp
Saturación de agua	25%		

⁶ AHUMADA, R y BERNAL, M. Plan Integral para manejo y control de los yacimientos en Cravo Norte. Sexto Congreso Colombiano del Petróleo, memorias, tomo II.

3. CEMENTACIÓN REMEDIAL^{7 8}

Se define cementación remedial como cualquier práctica de cementación ejecutada en el pozo que no haga parte de la cementación primaria o este envuelta en la cementación primaria de un nuevo Liner. La reparación inmediata de una pobre cementación primaria o una pobre instalación de un nuevo Liner también se incluye dentro de cementación remedial.

3.1. CLASIFICACIÓN

Existen tres tipos de cementación remedial las cuales se dividen como se muestra a continuación

3.1.1. Reparación del Hueco (“Hole Repair”)

Es el mismo trabajo de cementación forzada estándar. Este tipo de cementación remedial está caracterizado por llenar relativos espacios pequeños con cemento hasta alcanzar presión de forzamiento contra el fluido para deshidratar el cemento y formar un tapón competente de cemento en el hueco y así crear sello entre este y la formación. Limitado a espacios vacíos pequeños (zonas lavadas “wash out” durante la perforación o productoras de arena pueden crear cavernas las cuales no permiten que el cemento se deshidrate contra la formación y por lo tanto no forme el tapón de cemento).

3.1.2. Reparación del Pozo (“Wellbore Repair”)

Se refiere básicamente a reparación de canales de cemento durante la cementación primaria. Cualquier corrección a un trabajo de cementación primaria, un canal producido a través del tiempo por la erosión que ejerce el flujo de fluido ya sea en la formación o en el Casing o inclusive la reparación de un

⁷ SMITH, D. y HARRIS, K. Remedial Cementing Practices Manual. OXY Permian. 2005.

⁸ Smith, D. “CEMENTING, Monograph Volume 4 SPE”. SPE, 1987.

micro-anulo, se encuentran dentro de esta categoría. Casi siempre se refieren a áreas anulares cercanas a la cara de la formación.

3.1.3. Reparación de la Formación (“Formation Repair”)

Este tipo de cementación remedial está caracterizado por largos sistemas de espacios vacíos o cavernas que se presentan detrás del hueco revestido, inclusive fracturas naturales o inducidas, intervalos erosionados e intervalos de grandes producciones de arena. La clave para estas situaciones de cementación es que no se puede formar un tapón deshidratado de cemento y por lo tanto va a permitir comunicación entre el fluido y la formación. Este sistema puede ser muy grande y por lo tanto es muy difícil estimar la cantidad de cemento necesario para llenar el espacio.

3.2. FUNCIONES BÁSICAS DEL CEMENTO

Existen 2 procesos básicos a la cual se somete el cemento, la cual es importante distinguir. La primera es deshidratación y la segunda es hidratación.

3.2.1. Deshidratación

Cuando el cemento es deshidratado, físicamente se está sacando las moléculas de agua fuera de la lechada de cemento formando un tapón de cemento. Esto ocurre cuando el cemento es sometido a un diferencial de presión contra un medio permeable y el agua es forzada dentro de este, que para nuestro caso sería a los espacios porosos de la roca, concentrándose el material de cemento restante en la cara de la formación. La rata de deshidratación de la lechada de cemento, la cual es clave, es usualmente cuantificada por las pruebas de pérdida de filtrado.

3.2.2. Hidratación

La hidratación del cemento se presenta cuando ocurre una reacción química en la lechada de cemento. Esta reacción bloquea el agua dentro del cemento y es

igual a lo que comúnmente se observa en la industria de la construcción. Debido a que el cemento debe ser bombeado debe tener más agua que la necesaria para desarrollar una resistencia a la compresión óptima. Lo importante de estos dos procesos es que el cemento deshidratado desarrolla resistencia a la compresión mucho más rápido que un cemento hidratado.

3.3. APLICABILIDAD DE LAS CEMENTACIONES REMEDIALES

La aplicación de la cementación remedial ha aumentado considerablemente y se ha logrado un mejor entendimiento de la mecánica de fractura de la roca y de las propiedades de filtrado de las lechadas de cemento las cuales son presurizadas contra un medio permeable.

Las cementaciones remediales son ampliamente usadas en los pozos para los siguientes casos:

1. Para controlar altos GOR. Aislando la zona de producción de gas de la de aceite, se puede obtener un GOR que mejore la producción de aceite.
2. Para controlar agua o gas excesivos. Arenas con agua o gas pueden ser aisladas por debajo o por encima respectivamente de la arena productora de aceite para disminuir la relación agua/aceite o gas/aceite. Aislar zonas que producen agua o gas pueden evitar futuras conificaciones.
3. Para reparar fallas o grietas en el Casing o tubería de revestimiento. El cemento puede ser forzado a través de los huecos generados por la corrosión en el Casing.
4. Para sellar zonas ladronas o zonas de pérdida de circulación.
5. Para proteger contra la migración de fluido dentro de una zona productora.
6. Para asilar zonas permanentemente. En pozos donde existen varias zonas potencialmente productoras, se deja producir una primero para posteriormente aislarla y empezar a producir otra.
7. Para corregir un trabajo de cementación primaria defectuosa. Pueden resultar problemas de canalización o insuficiente llenado en los trabajos de

cementación primaria que pueden ser solucionados a través de cementación forzada.

8. Para prevenir migración de fluidos de zonas abandonadas o pozos. La cementación forzada es usada para sellar perforaciones viejas o para taponar zonas productoras depletadas completadas en hueco abierto.

3.4. TIPOS DE CEMENTACIÓN REMEDIAL

El proceso de aislamiento de zonas intermedias normalmente es una operación donde la lechada de cemento es forzada bajo presión a un punto específico del pozo. Sus usos incluyen la exclusión o aislamiento de agua, gas o aceite de la formación productora, recompletamiento de un intervalo depletado o no deseado, reparación de la tubería de revestimiento, falla de la tubería y reparación de una falla de un trabajo de cementación primaria usualmente llamada canal.

Estudios de laboratorio combinado con prácticas de campo han clasificado las técnicas de cementación forzada en dos, forzamiento a alta presión y forzamiento a baja presión, esto debido a la diferencia de presión que es aplicada cuando el cemento está en contacto con la formación.

3.4.1. Cementación Forzada a Alta Presión

Una cementación forzada a alta presión es obligatoria cuando las perforaciones presentan torta del filtrado de lodo (Mud Cake) en el momento de la operación. En la práctica esto significa que una cementación forzada a alta presión es planeada si el fluido de Workover forma torta de lodo en la cara de la formación. La “alta presión” es la presión necesaria para fracturar la formación a aislar. Esta operación de fracturamiento remueve la torta de lodo de los perforados para que el cemento pueda entrar a la formación y deshidratarse contra esta. Una vez la fractura es iniciada, esta es llenada con cemento, evitando la entrada de fluidos al pozo. Este tipo de operación requiere mezclar grandes volúmenes de cemento, usualmente de 100 a 500 sacos. La cantidad de cemento

desplazada hacia la formación está controlada por la rata a la que la formación fue inicialmente fracturada y no tiene relación a la habilidad del intervalo de permanecer aislado.

La presión final de forzamiento es otro dato comúnmente reportado. Muchos Supervisores de Campo y Gerentes de Operación establecen como objetivo una presión final de forzamiento de 2,500 a 5,000 psi, sin embargo esta no es una medida de cuanta presión positiva o de drawdown va a soportar el intervalo aislado. Cuando la presión de forzamiento es alcanzada el cemento todavía se encuentra en forma de masilla, sin embargo la configuración de los perforados actúan como válvulas tipo check para que el cemento se pueda establecer en la cavidad de la perforación independientemente de la dirección de la presión. La presión que puede soportar el cemento utilizado es usualmente mayor a lo que la tubería o la tubería de revestimiento pueden soportar.

3.4.2. Cementación Forzada a Baja Presión

Un trabajo de cementación remedial también se puede obtener mediante la técnica de baja presión, el filtrado de cemento es depositado en la cavidad de la perforación a presiones moderadas. Cuando la cavidad de la perforación está llena de cemento, la cara de la formación esta efectivamente aislada de las presiones dentro del pozo. Esto ocurre debido a la baja permeabilidad de la torta de cemento que se forma debido a los controladores de filtrado. Numerosos trabajos de cementación forzada a baja presión han resultado con altas presiones de forzamiento.

El método de cementación forzada a baja presión esta comúnmente asociado a pequeñas cantidades de cemento circuladas contra los perforados, para así permitir que el cemento se deposite dentro de la formación a una moderada presión diferencial. La presión se mantiene baja intencionalmente para evitar cualquier fractura a la formación. Previniendo cualquier fractura, el volumen de

cemento requerido será bajo. La cantidad de cemento utilizado será solo el necesario para construir una torta de filtrado en cada perforación. En numerosas operaciones de cementación remedial se han requerido menos de un barril de cemento. Mientras el volumen involucrado sea bajo, la operación entera puede ser conducida con bombas de bajo caudal en contraste con las bombas de trabajo pesado que deben ser utilizadas en operaciones de cementación forzada normal o de alta presión. La mayor ventaja de utilizar esta técnica de cementación forzada es que se puede conducir la operación con equipos pequeños de bombeo. El rango de baja presión incluye cualquier presión por debajo de la presión de fracturamiento de la formación.

3.5. TÉCNICAS DE CEMENTACIÓN FORZADA

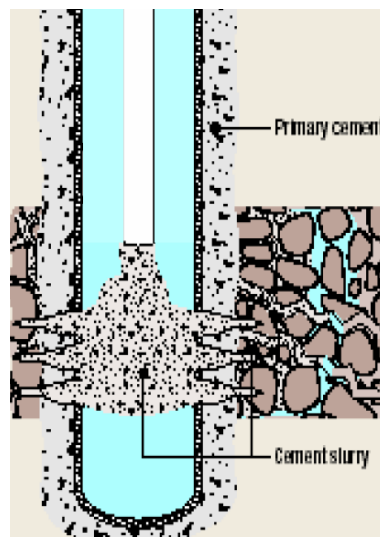
Existen varios métodos o técnicas que son utilizados en la industria, “bullhead”, “bradenhead”, tapón balanceado, forzamiento en bloque, forzamiento mediante “coiled tubing”, etc. En todos estos métodos existen solo dos cosas claves para resaltar. Primero, obtener un cemento sin contaminar donde se desee colocar y segundo, una vez que el cemento este en el sitio, mantenerlo ahí hasta que se establezca. Mantener el cemento en su lugar se puede realizar con cualquier método, sin embargo también es fundamental la presión que se aplica después del asentamiento. Para decidir que técnica va a funcionar mejor para la situación que se presenta es muy importante considerar la naturaleza del problema, ya que esta va a dictar como el cemento debe ser controlado y las consideraciones necesarias que deben ser tomadas para asegurar que se pueda colocar y mantener el cemento donde se requiera.

3.5.1. Método “BULLHEAD”

Este método es el más simple pero así mismo es del que se tiene menor control. El cemento es bombeado hasta el fondo de la tubería de trabajo, la cual está ubicada alguna distancia por encima del intervalo a aislar. El anular es cerrado para que el cemento no pueda circular hacia arriba (asumiendo que no existen

grietas o huecos en la tubería de revestimiento los cuales pueden tomar fluido). Como se puede ver en la figura 3, uno de los mayores problemas es el grado de contaminación de la lechada de cemento con los fluidos del pozo con la que pueda llegar a los perforados. Una ventaja de esta técnica es que se va a tener la misma presión a través de todo el pozo y por lo tanto el cemento que se va a desplazar hacia el anular no va a generar la suficiente presión diferencial que permita el colapso de la tubería de revestimiento. En el momento en que se realiza el forzamiento, la presión dentro de la tubería de revestimiento aumenta para mantener bajo el diferencial de presión. La única manera para mantener el cemento en el lugar con este método es la de aplicar presión. Si la presión no aumenta, la única opción es la de seguir desplazando el cemento hasta que se tenga el pozo y la tubería de revestimiento libre de cemento y luego volver a preparar el pozo para otro bache de cemento. En situaciones donde se esperan grandes volúmenes de lechada de cemento, esta técnica puede ser la apropiada, pero en la mayoría de los casos donde son usados pequeños volúmenes de cemento se debe ser más agresivo tratando de prevenir la contaminación del cemento con otros fluidos del pozo.

Figura 3. Técnica “Bullhead”.

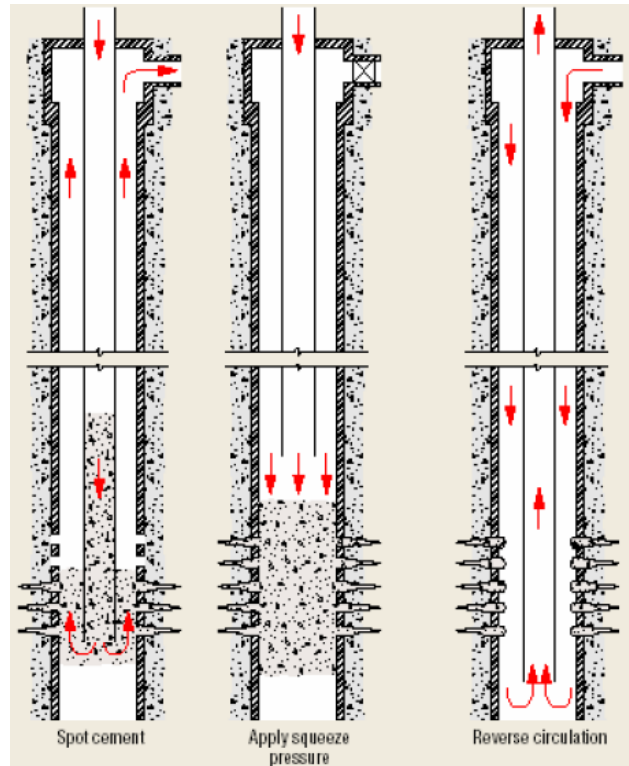


Fuente: Remedial Cementing Practices, Oxy

3.5.2. Técnica “BRADENHEAD” o Tapón Balanceado

Este método es parecido al “Bullhead” ya que bajan tubería sin ningún aislamiento mecánico, pero se diferencia en que la parte inferior de la tubería es puesta por debajo del intervalo a aislar y el cemento se va apilando de abajo hacia arriba, con el anular generalmente abierto. Esta técnica es también conocida como tapón balanceado. La clave del proceso es la de eliminar o minimizar la contaminación del cemento que ocurre a medida que el cemento de mayor densidad cae a través de los fluidos del pozo. En esta técnica el cemento es puesto de abajo hacia arriba permitiendo al cemento más pesado siempre estar en el fondo. Esta técnica es también buena para volúmenes moderados de “rathole”, ya que simplemente el cemento se coloca cinco o diez pies por debajo de los intervalos removiendo efectivamente todos los fluidos del fondo. Previamente se debió haber calculado los topes estimados de cemento para poder desplazarlo hasta la altura que se requiera en el pozo, permitiendo que salga todo el cemento de la tubería. Una vez hecho esto, se levanta la tubería de trabajo permitiendo que el cemento que aun este dentro de ella salga y busque el equilibrio con el cemento que se encuentra en el anular. La figura 4 muestra un esquema del procedimiento. Finalmente se ejerce una presión que indique que los perforados han sido empacados con cemento deshidratado. Esta presión de forzamiento necesita ser capaz de soportar la presión que se ejerce cuando se reversa el cemento remanente sin dañar el trabajo. Si la presión de forzamiento fue pequeña o no se pudo alcanzar entonces se deja el tapón de cemento para luego ser perforado.

Figura 4. Esquema del procedimiento de un forzamiento realizado con tapón balanceado.



Fuente: Remedial Cementing Practices, Oxy

3.5.3. Forzamiento Usando Herramientas De Aislamiento Mecánicas.

Los empaques de forzamiento o retenedores de cemento vienen en una variedad de modelos, algunos están diseñados para sentarse en hueco abierto, otros para ser recuperados mientras que otros están diseñados para ser perforados. El principio básico sigue siendo el mismo, no permitir la comunicación de los intervalos a ser aislados con el resto del pozo. La figura 5 muestra el procedimiento de un empaque perforable y un empaque para ser recuperado, el cual se sienta encima de los perforados para prevenir comunicación de presiones a superficie (también se puede utilizar un empaque tapón si existen zonas abiertas por debajo del intervalo que se quiera aislar). La ventaja de esta técnica es que una vez se obtenga una presión de forzamiento razonable, la válvula del empaque, la cual es una válvula retenedora, es decir,

permite el flujo en una sola dirección, puede ser cerrada con solo levantar la tubería y así poder mantener la presión dentro de la cámara hasta que el cemento se establezca. En cualquier momento se puede reversar cualquier exceso de cemento sin perturbar el intervalo aislado. Este método puede ser efectivo cuando no se conozca el volumen de cemento necesario para llenar el área por debajo del empaque y se quiera llenar lo más que sea posible sin mezclar grandes cantidades de cemento.

3.6. DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO

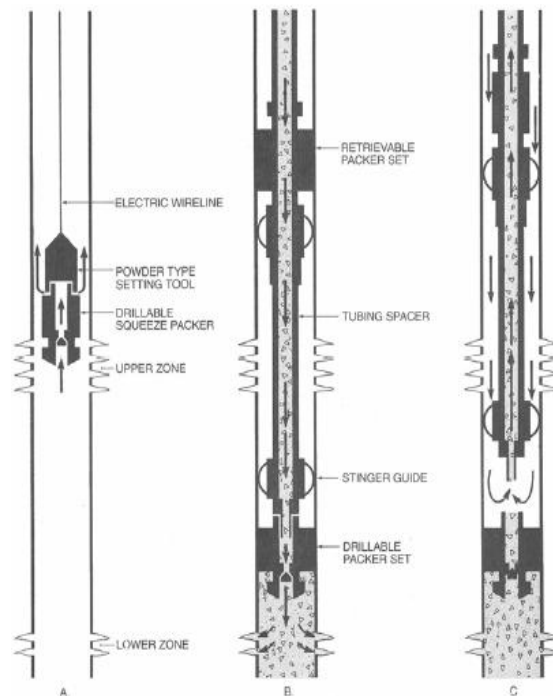
Los siguientes factores deben ser considerados en el diseño de la lechada de cemento para cualquier operación de cementación remedial.

3.6.1. Tipo de Cemento

La industria petrolera normalmente utiliza cementos fabricados en conformidad con la clasificación establecida por los estándares API. Estos estándares se han venido publicando anualmente por el Instituto Americano del Petróleo desde 1953, fecha en la cual se realizó la primera emisión. Estas especificaciones son revisadas anualmente y revisadas de acuerdo a las necesidades de la industria. Las diferentes clases de cementos API según la temperatura y presión de fondo se listan a continuación.

En las operaciones de cementación remedial usualmente se utilizan cementos API clasificados con las letras B, C, G y H. Anteriormente se utilizaban cementos API clase A y E, estos ya no son tan comunes en las prácticas de cementación. A continuación se hace una breve descripción por tipo de cemento.

Figura 5. Cementación remedial utilizando herramientas de aislamiento mecánico.



Fuente: Remedial Cementing Practices, Oxy

Clase A: Se utiliza desde superficie hasta una profundidad de 6,000 pies, cuando propiedades especiales no son requeridas. Disponible solo en tipo ordinario.

Clase B: Se utiliza desde superficie hasta 6,000 pies de profundidad, cuando las condiciones requieren resistencia de moderada a alta, a los sulfatos. Disponible en dos tipos, media y alta resistencia a los sulfatos.

Clase C: Se usa desde superficie hasta 6,000 pies de profundidad, cuando las condiciones requieren alta fuerza compresiva en poco tiempo. Disponible en tres tipos: ordinaria, media y alta resistencia a los sulfatos.

Clase D: Se utiliza para profundidades de 6,000 a 10,000 pies, bajo condiciones de temperaturas y presiones moderadamente altas. Disponible en dos tipos media y alta resistencia a los sulfatos.

Clase G: Usado para profundidades desde superficie a 8,000 pies. Puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades de pozo y temperaturas. Este tipo de cemento solo permite adiciones de sulfato de calcio, agua o ambas. Disponible en dos tipos, media y alta resistencia a los sulfatos.

Clase H: Se utiliza para profundidades que van desde superficie hasta los 8,000 pies y puede ser usado con aceleradores y retardantes para poder cubrir un rango amplio de profundidades y temperaturas. Este tipo de cemento solo permite adiciones de sulfato de calcio, agua o ambas. Disponible en dos tipos, media y alta resistencia a los sulfatos. La tabla 4, lista las clases API de cementos e indica las profundidades a la cual debe ser aplicado.

TABLA 4. Aplicaciones de los cementos API

APLICACIONES DE CEMENTOS API				
API	MEZCLA DE AGUA	DENSIDAD LECHADA	PROF. POZO	TEMP. ESTÁTICA
Clasificación	(gal/saco)	(lbm/gal)	(ft)	(° F)
A	5.5	15.6	0 - 6,000	80 - 170
B	5.2	15.6	0 - 6,000	80 - 170
C	6.3	14.8	0 - 6,000	80 - 170
D	4.3	16.4	6,000 - 12,000	170 - 260
E	4.3	16.4	6,000 - 14,000	170 - 290
F	4.3	16.2	10,000 - 16,000	230 - 320
G	5	15.8	0 - 8,000	80 - 200
H	4.3	16.4	0 - 8,000	80 - 200

Para la mayoría de las operaciones de cementación forzada, se utilizan los cementos tipo A, G o H, debido a que estos cementos son fabricados para condiciones de forzamiento a 6,000 pies donde las temperatura estática del pozo no exceda los 170 °F. Para pozos más profundos, los cementos clase G o H pueden ser adecuados según las características requeridas.

3.6.2. Control de Filtrado

El filtrado es importante en el diseño de la lechada de cemento en un trabajo de cementación remedial. Cuando el cemento es forzado a través de un medio

permeable, se ejerce un diferencial de presión tal que el agua contenida es filtrada a través del medio, separándose del cemento sólido lo cual forma una torta de filtrado.

La torta de cemento es suave y puede ser removida a chorro; pero no es bombeable, y una presión considerable es requerida para forzarla a través de una pequeña apertura. El espesor de la torta de filtrado depende de la permeabilidad de la torta o de la formación (la que sea más baja), las características de control de filtrado de la lechada, la presión diferencial y el tiempo que la presión diferencial es mantenida.

Las pérdidas de filtrado API de cemento seco varían de 600 a 2500 cm³ en 30 minutos, de hecho, la deshidratación ocurre tan rápido que es difícil medirla. Las pérdidas de filtrado pueden reducirse a valores entre 25 y 100 cm³ en 30 minutos, adicionando bentonita y agentes dispersantes, o polímeros.

3.6.3. Cantidad de Cemento

La cantidad de cemento que debe ser usada en una operación de Cementación forzada puede variar desde unos sacos en un trabajo de wireline a cientos de sacos en un trabajo por estaciones. El volumen promedio esta dentro del rango de 100 – 200 sacos, sin embargo, la cantidad específica dependerá de la condición de los perforados o del canal que se va a aislar.

El volumen de lechada de cemento a ser forzado no se puede estimar con precisión, y la experiencia en estos tipos de trabajos es la mejor guía. Sin embargo hay algunos índices útiles y reglas del dedo gordo.

1. Preferiblemente el volumen no debe exceder la capacidad de la tubería de trabajo.
2. Dos sacos de cemento pueden ser usados por cada pie de intervalo perforado.
3. Si la rata de inyección de 2 bbl/min no se puede lograr después de haber fracturado, el mínimo volumen debe ser de 100 sacos de cemento, de lo contrario debe ser de 50 sacos.

4. El volumen de lechada de cemento no debe ser muy grande de tal manera que forme una columna de cemento que pueda ser reversada.

3.6.4. Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión es uno de los parámetros más importantes y al mismo tiempo uno de los menos entendidos, o por lo menos lo que se requiere dada las condiciones en el fondo del pozo. Se define como la fuerza necesaria por pie de cemento que se necesita para que el cemento falle. Normalmente se obtienen valores de 3000 psi en adelante para el cemento hidratado y de 5000 psi para el cemento deshidratado.

La resistencia a la compresión del cemento requerida para un trabajo de cementación remedial exitoso debe ser alta. La cavidad típica de la perforación tiene una forma que tiende a que el cemento actúe como válvula cheque en ambas direcciones. El cemento que llena una fractura inducida tiene mayor área de contacto; por lo tanto, es capaz de soportar mayores diferenciales de presión que la cavidad de la perforación. Se debe evitar la contaminación con lodo o fluidos del pozo ya que puede hacer que reduzca fuertemente la fuerza compresiva del cemento.

3.6.5. Resistencia a la Tracción

Normalmente la resistencia a la tracción es aproximadamente la doceava parte de la resistencia a la compresión del cemento y puede ser importante en ambientes donde este expuesto a grandes caídas de presión. En algunos casos esta caída de presión puede causar que el cemento salga de la formación y del Casing.

Uno de los métodos para mejorar la resistencia a la tracción del cemento es el de añadirle fibra, teniendo cuidado de no excederse ya que puede causar problemas al momento de bombearse.

3.6.6. Fuerza de Adherencia

La fuerza de adherencia está definida como la habilidad del cemento a adherirse a la tubería de revestimiento, a la formación o a cualquier superficie. El problema con la medición de esta propiedad es que depende de la naturaleza de la superficie a la que el cemento está tratando de adherirse y a que no se ha definido una prueba en particular.

3.7. TIEMPO DE ESPERA PARA FRAGÜE DE CEMENTO

El tiempo de espera de fragüe del cemento o WOC por sus siglas en ingles después de un trabajo de cementación remedial va a estar gobernado por la fuerza requerida para que el cemento se establezca. El cemento debe ser lo suficientemente fuerte para soportar la presión que se ejerce cuando se está perforando, resistir el flujo de fluidos y para aislar un intervalo productor durante una operación de fracturamiento. En campo lo más habitual es un periodo de espera de 12 a 24 horas entre la operación de forzamiento o después de que se haya alcanzado la presión de forzamiento.

Una vez el cemento este en su lugar, la torta de cemento deshidratada desarrollará una fuerza compresiva con mayor rapidez que un cemento que no haya perdido fluidos bajo presión. La torta deshidratada de cemento va a desarrollar una fuerza compresiva de varios miles de libras en las primeras 8 horas. Lavar o drenar entre etapas puede dañar las zonas aisladas si estas son agitadas o perturbadas antes de 4 horas de haber terminado el forzamiento.

3.8. PRUEBA DEL TRABAJO DE AISLAMIENTO

El aparente éxito o fracaso de un trabajo de cementación remedial debe ser confirmado aplicando presión en el intervalo aislado. Aunque los trabajos son comúnmente probados aplicando presión, una mejor forma sería la de ejercer una presión diferencial en el pozo. Esto puede ser logrado realizando un suaveo ó por un método de levantamiento artificial del fluido del pozo. Esta presión

diferencial no puede ser mayor al drawdown esperado cuando el pozo entre a producción.

3.9. FORMULAS DE AYUDA PARA CEMENTACIONES REMEDIALES

3.9.1. Máxima presión de forzamiento que puede ser ejercida en el anular entre la sarta o tubería de trabajo y la tubería de revestimiento.

$$p_{bmax} = p_{WBS} - (D_{max})(g_m - g_{m2}) \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde:

p_{bmax} . = *Maxima presión en el anular, psi.*

p_{WBS} = *Maxima presión de estallido soportada por la tubería de revestimiento, psi.*
(Valor teorico ÷ factor de seguridad de 1.33)

D_{max} = *Maxima profundidad de la tubería de revestimiento, pies.*

g_m = *Gradiente de presión del lodo en el anular, psi/ft.*

g_{m2} = *Grad. de presión del lodo en el anular por fuera de la tubería de revestimiento, psi/ft.*

3.9.2. Presión hidrostática de los fluidos dentro de la tubería de trabajo.

$$p_{hs} = (g_m)(h_m) + ((g_c)(h_c) + (g_w)(h_w)) \dots \dots \dots (4.2)$$

Donde:

p_{hs} = *Presión hidrostática de la columna de cemento, psi.*

g_m = *Gradiente de presión del lodo en el anular, psi/ft.*

h_m = *Altura de la columna de lodo, ft.*

g_c = *Gradiente de presión de la lechada de cemento, psi/ft.*

h_c = *Altura de la columna de cemento, ft.*

g_w = *Gradiente de presión del agua, psi/ft.*

$h_w =$ *Altura de la columna de agua, ft.*

3.9.3. Presión de colapso de la tubería de revestimiento por encima del empaque.

$$p_s = p_{bmax} + (g_m)(D_p) \dots \dots \dots (4.3)$$

Donde:

$p_s =$ *Presión de soporte para evitar colapso por encima de empaque, psi.*

$p_{bmax} =$ *Maxima presión en el anular, psi.*

$g_m =$ *Gradiente de presión del lodo en el anular, psi/ft.*

$D_p =$ *Profundidad del empaque, ft.*

3.9.4. Máxima presión de forzamiento en superficie permitida

$$p_{smax} = p_s = p_{WCS} - p_{hs} \dots \dots \dots (4.4)$$

Donde:

$p_{smax} =$ *maxima presión permitida de forzamiento en superficie, psi.*

$p_s =$ *Presión de soporte para evitar colapso, psi.*

$p_{WCS} =$ *Esfuerzo de colapso de la tubería de revestimiento más debil 1000 ft por encima del empaque, psi.*

$p_{hs} =$ *Presión hidrostática de la columna de cemento, psi.*

3.9.5. Presión hidrostática

$$p_{hs} = 0.052 \times w_m \times D \dots \dots \dots (4.5)$$

Donde:

p_{hs} = Presión hidroestática, *psi*.

w_m = peso del lodo, *lbm/gal*

D = profundidad, *ft*.

4. ESTADISTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS⁹

La palabra "estadística" suele utilizarse bajo dos significados distintos, a saber:

1. Como colección de datos numéricos.- Esto es el significado más vulgar de la palabra estadística. Se sobrentiende que dichos datos numéricos han de estar presentados de manera ordenada y sistemática. Una información numérica cualquiera puede no constituir una estadística, para merecer este apelativo, los datos han de constituir un conjunto coherente, establecido de forma sistemática y siguiendo un criterio de ordenación.

2. Como ciencia.- En este significado, La Estadística estudia el comportamiento de los fenómenos de masas. Como todas las ciencias, busca las características generales de un colectivo y prescinde de las particulares de cada elemento. Así por ejemplo al investigar el sexo de los nacimientos, iniciaremos el trabajo tomando un grupo numeroso de nacimientos y obtener después la proporción de varones. Por tanto, el objetivo de la estadística es hallar las regularidades que se encuentran en los fenómenos de masa.

4.1. DEFINICIONES

4.1.1. Experimento¹⁰

El concepto de experimento será presentado en forma general. Se entenderá que es un procedimiento que da origen a los datos. De todas maneras, se resaltará algunas de sus características importantes desde el punto de vista estadístico. De un experimento se dirá que:

⁹ <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd97/UnidadesDidacticas/53-1-u-punt11.html>

¹⁰ http://www.ucv.cl/web/estadistica/cb_intro.htm

- Se sabe exactamente qué hacer para realizarlo.
- Los pasos a seguir, están descritos exactamente y son entendidos por quien lo realiza.
- Es repetible bajo condiciones esencialmente equivalentes.
- Entrega un resultado o respuesta que es distinguible como tal.
- Se conoce el conjunto de todos los resultados posibles, pero no el caso particular que se obtendrá al realizarlo.

El concepto de experimento descrito aquí, es muy amplio. Además de incluir los casos de experimentación diseñada y controlada muy de cerca en su desarrollo, también incluye procedimientos de recolección de datos provenientes de la observación de variables, bajo condiciones no controladas por el observador.

4.1.2. Poblaciones y Muestras¹¹

Cuando se realiza un estudio de investigación, se pretende generalmente inferir o generalizar resultados de una muestra a una población. Se estudia en particular a un reducido número de individuos a los que tenemos acceso con la idea de poder generalizar los hallazgos a la población de la cual esa muestra procede. Este proceso de inferencia se efectúa por medio de métodos estadísticos basados en la probabilidad.

La población representa el conjunto grande de individuos que deseamos estudiar y generalmente suele ser inaccesible. Es, en definitiva, un colectivo homogéneo que reúne unas características determinadas.

La muestra es el conjunto menor de individuos (subconjunto de la población accesible y limitado sobre el que realizamos las mediciones o el experimento con la idea de obtener conclusiones generalizables a la población).

¹¹ Fernandez, P. "Estadística descriptiva de los datos", 2001 referencia a Dawson-Saunders B, Trapp RG. Bioestadística Médica. 2ª ed. México: Editorial el Manual Moderno;1996.

El individuo es cada uno de los componentes de la población y la muestra. La muestra debe ser representativa de la población y con ello queremos decir que cualquier individuo de la población en estudio debe haber tenido la misma probabilidad de ser elegido.

Las razones para estudiar muestras en lugar de poblaciones son diversas y entre ellas podemos señalar:

- a. Ahorrar tiempo. Estudiar a menos individuos es evidente que lleva menos tiempo.
- b. Como consecuencia del punto anterior ahorraremos costos.
- c. Estudiar la totalidad de elementos con una característica determinada en muchas ocasiones puede ser una tarea inaccesible o imposible de realizar.
- d. Aumentar la calidad del estudio. Al disponer de más tiempo y recursos, las observaciones y mediciones realizadas a un reducido número de elementos pueden ser más exactas y plurales que si las tuviésemos que realizar a una población.
- e. La selección de muestras específicas nos permitirá reducir la heterogeneidad de una población al indicar los criterios de inclusión y/o exclusión.

4.1.3. Tipo de Datos

Lo que estudiamos en cada individuo de la muestra son las variables (edad, sexo, peso, talla, tensión arterial sistólica, etcétera). Los datos son los valores que toma la variable en cada caso. Lo que vamos a realizar es medir, es decir, asignar valores a las variables incluidas en el estudio. Debemos además concretar la escala de medida que aplicaremos a cada variable.

La naturaleza de las observaciones será de gran importancia a la hora de elegir el método estadístico más apropiado para abordar su análisis. Con este fin, clasificaremos las variables, a grandes rasgos, en dos tipos: variables cuantitativas o variables cualitativas.

a. Variables cuantitativas. Son las variables que pueden medirse, cuantificarse o expresarse numéricamente. Las variables cuantitativas pueden ser de dos tipos:

- Variables cuantitativas continuas, si admiten tomar cualquier valor dentro de un rango numérico determinado (edad, peso, talla).
- Variables cuantitativas discretas, si no admiten todos los valores intermedios en un rango. Suelen tomar solamente valores enteros (número de hijos, número de partos, número de hermanos, etc.).

b. Variables cualitativas. Este tipo de variables representan una cualidad o atributo que clasifica a cada caso en una de varias categorías. La situación más sencilla es aquella en la que se clasifica cada caso en uno de dos grupos (hombre/mujer, enfermo/sano, fumador/no fumador). Son datos dicotómicos o binarios. Como resulta obvio, en muchas ocasiones este tipo de clasificación no es suficiente y se requiere de un mayor número de categorías (color de los ojos, grupo sanguíneo, profesión, etcétera).

En el proceso de medición de estas variables, se pueden utilizar dos escalas:

- Escalas nominales: ésta es una forma de observar o medir en la que los datos se ajustan por categorías que no mantienen una relación de orden entre sí (color de los ojos, sexo, profesión, presencia o ausencia de un factor de riesgo o enfermedad, etcétera).
- Escalas ordinales: en las escalas utilizadas, existe un cierto orden o jerarquía entre las categorías (graduación militar, nivel de estudios, etc.).

4.1.4. Medidas de Tendencia Central

Una vez que se han recogido los valores que toman las variables de nuestro estudio (datos), procederemos al análisis descriptivo de los mismos. Para variables categóricas, como el sexo o profesión, se quiere conocer el número de casos en cada una de las categorías, reflejando habitualmente el porcentaje que representan del total, y expresándolo en una tabla de frecuencias.

Para variables numéricas, en las que puede haber un gran número de valores observados distintos, se ha de optar por un método de análisis distinto, respondiendo a las siguientes preguntas:

- a. ¿Alrededor de qué valor se agrupan los datos?
- b. Supuesto que se agrupan alrededor de un número, ¿cómo lo hacen? ¿Muy concentrados? ¿Muy dispersos?

Las medidas de centralización vienen a responder a la primera pregunta. La medida más evidente que podemos calcular para describir un conjunto de observaciones numéricas es su valor medio. La media no es más que la suma de todos los valores de una variable dividida entre el número total de datos de los que se dispone.

Como ejemplo, consideremos 10 pacientes de edades 21 años, 32, 15, 59, 60, 61, 64, 60, 71, y 80. La media de edad de estos sujetos será de:

$$\bar{X} = \frac{21 + 32 + 15 + 59 + 60 + 61 + 64 + 60 + 71 + 80}{10} = 52.3 \text{ años}$$

Más formalmente, si denotamos por (X_1, X_2, \dots, X_n) los n datos que tenemos recogidos de la variable en cuestión, el valor medio vendrá dado por:

$$\text{Media } (\bar{X}) = \sum_{j=1}^n X_j / n \dots \dots \dots (4.1)$$

Otra medida de tendencia central que se utiliza habitualmente es la mediana. Es la observación equidistante de los extremos. La mediana del ejemplo anterior sería el valor que deja a la mitad de los datos por encima de dicho valor y a la otra mitad por debajo. Si ordenamos los datos de mayor a menor observamos la secuencia:

15, 21, 32, 59, 60, 60,61, 64, 71, 80.

Como quiera que en este ejemplo el número de observaciones es par (10 individuos), los dos valores que se encuentran en el medio son 60 y 60. Si realizamos el cálculo de la media de estos dos valores nos dará a su vez 60, que es el valor de la mediana. Si la media y la mediana son iguales, la distribución de la variable es simétrica. La media es muy sensible a la variación de las puntuaciones. Sin embargo, la mediana es menos sensible a dichos cambios.

Por último, otra medida de tendencia central, no tan usual como las anteriores, es la moda, siendo éste el valor de la variable que presenta una mayor frecuencia. En el ejemplo anterior el valor que más se repite es 60, que es la moda

4.1.5. Medidas de Dispersión

Tal y como se adelantaba antes, otro aspecto a tener en cuenta al describir datos continuos es la dispersión de los mismos. Existen distintas formas de cuantificar esa variabilidad. De todas ellas, la varianza (S^2) de los datos es la más utilizada. Es la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de la variable y la media aritmética de la distribución.

$$S_x^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \text{Media}(X))^2}{n} \dots\dots\dots(4.2)$$

Esta varianza muestral se obtiene como la suma de las diferencias de cuadrados y por tanto tiene como unidades de medida el cuadrado de las unidades de medida en que se mide la variable estudiada.

En el ejemplo anterior la varianza sería:

$$S_x^2 = \frac{(15 - 52.3)^2 + (21 - 53.2)^2 + \dots + (80 - 53.2)^2}{10} = 427.61$$

La desviación típica (S) es la raíz cuadrada de la varianza. Expresa la dispersión de la distribución y se expresa en las mismas unidades de medida de la variable. La desviación típica es la medida de dispersión más utilizada en estadística.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \text{Media}(X))^2}{n}} \dots \dots \dots (4.3)$$

Aunque esta fórmula de la desviación típica muestral es correcta, en la práctica, la estadística nos interesa para realizar inferencias poblacionales, por lo que en el denominador se utiliza, en lugar de n, el valor n-1.

Por tanto, la medida que se utiliza es la cuasi desviación típica, dada por:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \text{Media}(X))^2}{n-1}} \dots \dots \dots (4.4)$$

Aunque en muchos contextos se utiliza el término de desviación típica para referirse a ambas expresiones.

En los cálculos del ejercicio previo, la desviación típica muestral, que tiene como denominador n, el valor sería 20.678. A efectos de cálculo lo haremos como n-1 y el resultado sería 21,79.

El haber cambiado el denominador de n por n-1 está en relación al hecho de que esta segunda fórmula es una estimación más precisa de la desviación estándar verdadera de la población y posee las propiedades que necesitamos para realizar inferencias a la población.

Cuando se quieren señalar valores extremos en una distribución de datos, se suele utilizar la amplitud como medida de dispersión. La amplitud es la diferencia entre el valor mayor y el menor de la distribución.

Por ejemplo, utilizando los datos del ejemplo previo tendremos $80-15=65$.

Como medidas de variabilidad más importantes, conviene destacar algunas características de la varianza y desviación típica:

- Son índices que describen la variabilidad o dispersión y por tanto cuando los datos están muy alejados de la media, el numerador de sus fórmulas será grande y la varianza y la desviación típica lo serán.
- Al aumentar el tamaño de la muestra, disminuye la varianza y la desviación típica. Para reducir a la mitad la desviación típica, la muestra se tiene que multiplicar por 4.
- Cuando todos los datos de la distribución son iguales, la varianza y la desviación típica son iguales a 0.
- Para su cálculo se utilizan todos los datos de la distribución; por tanto, cualquier cambio de valor será detectado.

Otra medida que se suele utilizar es el coeficiente de variación (CV). Es una medida de dispersión relativa de los datos y se calcula dividiendo la desviación típica muestral por la media y multiplicando el cociente por 100. Su utilidad estriba en que nos permite comparar la dispersión o variabilidad de dos o más grupos. Así, por ejemplo, si tenemos el peso de 5 pacientes (70, 60, 56, 83 y 79 Kg) cuya media es de 69,6 kg y su desviación típica (S) = 10,44 y la TAS de los mismos (150, 170, 135, 180 y 195 mmHg) cuya media es de 166 mmHg y su desviación típica de 21,3. La pregunta sería: ¿qué distribución es más dispersa, el peso o la tensión arterial? Si comparamos las desviaciones típicas observamos que la desviación típica de la tensión arterial es mucho mayor; sin embargo, no podemos comparar dos variables que tienen escalas de medidas diferentes, por lo que calculamos los coeficientes de variación:

$$CV \text{ de la variable peso} = \frac{10.44}{69.6} = 15\%$$

$$CV \text{ de la variable TAS} = \frac{21.30}{166} = 12.8\%$$

A la vista de los resultados, observamos que la variable peso tiene mayor dispersión. Cuando los datos se distribuyen de forma simétrica (y ya hemos dicho que esto ocurre cuando los valores de su media y mediana están próximos), se usan para describir esa variable su media y desviación típica.

En el caso de distribuciones asimétricas, la mediana y la amplitud son medidas más adecuadas. En este caso, se suelen utilizar además los cuartiles y percentiles. Los cuartiles y percentiles no son medidas de tendencia central sino medidas de posición. El percentil es el valor de la variable que indica el porcentaje de una distribución que es igual o menor a esa cifra.

Así, por ejemplo, el percentil 80 es el valor de la variable que es igual o deja por debajo de sí al 80% del total de las puntuaciones. Los cuartiles son los valores de la variable que dejan por debajo de sí el 25%, 50% y el 75% del total de las puntuaciones y así tenemos por tanto el primer cuartil (Q1), el segundo (Q2) y el tercer cuartil (Q3).

4.1.6. Forma

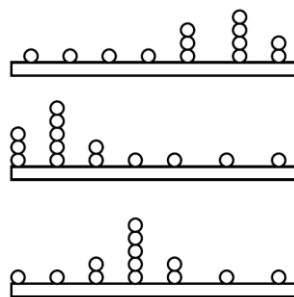
Las medidas de forma describen la manera en que se distribuyen los datos. Una distribución de datos puede ser simétrica o no. Cuando no lo es, se denomina asimétrica o sesgada.

Para indicar la forma se comparan la media y la mediana de la distribución. Si las medidas son iguales se considera que los datos son simétricos, o que la distribución tiene sesgo cero. Cuando la media es mayor que la mediana, el sesgo es positivo o la asimetría es a la derecha, en cambio cuando la media es menor que la mediana, se dice que la distribución tiene sesgo negativo o asimetría a la izquierda.

El sesgo positivo ocurre cuando la media se ve aumentada por algunos valores extraordinariamente grandes; el sesgo negativo se da cuando la media se ve afectada por algunos valores extremadamente pequeños

La figura 6 muestra lo que ocurre en cada situación: en cada una de las tres escalas se describe la distribución de un grupo de alumnos según las notas obtenidas (entre 40 y 100 puntos)

Figura 6. Distribución de un grupo de alumnos según las notas obtenidas.



Fuente: Fernandez, P. "Estadística descriptiva de los datos".

El primero de los gráficos corresponde a un conjunto sesgado a la izquierda, donde la media es menor que la mediana, ya que hay pocas calificaciones bajas. En el segundo, los datos están sesgados a la derecha. La media es mayor que la mediana, ya que hay pocas calificaciones altas. El último gráfico muestra una distribución simétrica, con un desempeño que podríamos catalogar como

"normal". La media y la mediana son iguales, al igual que la moda y el rango medio.

Cuantitativamente, la asimetría puede determinarse por medio de la siguiente ecuación:

$$As = \frac{3(\bar{X}-Med)}{s} \dots\dots\dots(4.5)$$

4.2. ANÁLISIS DE DATOS CUALITATIVOS

En el mundo es muy frecuente encontrarse con variables categóricas: sexo, clase social, lugar de procedencia, categoría laboral, forma de pago, etc. Las tablas de contingencia resuelven el problema del estudio de la asociación existente entre dos variables de tipo categórico. Desde el punto de vista inferencial, la hipótesis nula trataría la independencia de éstas.

Las variables categóricas normalmente presentan un número reducido de posibilidades, como por ejemplo: el sexo de un individuo, la raza a la que pertenece, etc.

Cuando estudiamos variables categóricas normalmente estamos interesados en examinar frecuencias y porcentajes de determinados valores, por ejemplo querer conocer los porcentajes de hombres y mujeres que visitan distintos lugares turísticos. Y así mismo estudiar la dependencia estadística y cuál es el grado de dicha asociación.

Las variables que aparezcan a la izquierda de la tabla son las variables fila y éstas determinarán las filas de la tabla.

Las variables que aparecen en la parte superior de la tabla son las variables columna y definen las columnas de la tabla.

El cruce entre filas y columnas constituyen las celdas, las cuales contienen información referente a las variables consideradas en la tabla, y pueden constituir las frecuencias, porcentajes, etc.

4.2.1 Tabla de Contingencia¹²

Analizar la distribución de una variable con relación a otra u otras es una tarea corriente en las ciencias de la tierra, vinculada, la mayoría de las veces, a la búsqueda de un patrón que indique la relación, (o la falta de ella) entre las variables estudiadas. Este es un proceso clave en la identificación de las posibles causas de los problemas, y también de factores que, aun cuando no puedan ser finalmente considerados causales, resulten estar asociados a estos daños y constituyan importantes elementos prácticos para la identificación de grupos con mayores riesgos de padecer determinado daño.

El estudio de la influencia de una variable (variable independiente) sobre la forma en que se modifica otra (variable dependiente) es conocido como análisis bivariado; y será multivariado cuando el estudio evalúe de forma simultánea el efecto sobre una variable dependiente de dos o más variables independientes.

Las tablas de contingencia (tablas de doble entrada) son una herramienta fundamental para este tipo de análisis. Están compuestas por filas (horizontales), para la información de una variable y columnas (verticales) para la información de otra variable. Estas filas y columnas delimitan celdas donde se vuelcan las frecuencias de cada combinación de las variables analizadas. En su expresión más elemental, las tablas tienen solo 2 filas y 2 columnas (tablas de 2x2); estas tablas presentan la siguiente estructura tipo:

¹² <http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/7-Ayuda%20Tablas%20de%20contingencia.pdf>

Tabla 5. Ejemplo de una tabla de contingencia

		SEXO		
		HOMBRE	MUJER	MARGINAL
FUMA	SI	n11	n12	n1
	NO	n21	n22	n2
	MARGINAL	n1	n2	N

Donde:

n_{12} = número de observaciones que tienen el atributo 1 y 2

n_1 = número de individuos que tienen el atributo 1 (marginal 1)

n_2 = número de individuos que tienen el atributo 2 (marginal 2)

En general, las tablas pueden abarcar varias filas (M) y columnas (N). El análisis puede ocasionalmente involucrar más variables; por ejemplo, puede considerarse una tercera variable, cada una de cuyas clases dé lugar a una tabla de MxN.

En muchos análisis subyacen dos hipótesis. Un ejemplo típico es el caso en que se tiene una que afirmar la existencia de cierta asociación entre las variables estudiadas. Ocasionalmente, por su estructura teórica, el problema encarado permite hablar de una variable dependiente y de variables independientes. Otras veces, sin embargo, el examen de la asociación no está previamente direccionado. En cualquier caso, la otra hipótesis afirma que no existe tal relación y que ambas variables tienen completa independencia (hipótesis nula). Salvo en situaciones muy especiales, la simple inspección de la información contenida en las tablas de contingencia no permite ser concluyente sobre cuál de las dos hipótesis es la que ha de elegirse como válida.

Para examinar este problema, un primer paso puede ser calcular la frecuencia relativa de cada celda (las medidas de frecuencia pueden ser diversas: prevalencia, incidencia acumulada, densidad de incidencia, odds, etc.).

Sin embargo, el análisis de la relación entre las variables estudiadas es más directo cuando se computan medidas de asociación. Estas medidas, basadas en la comparación entre las frecuencias del daño en diferentes grupos, pueden realizarse a través de razones (razón de prevalencias, riesgo relativo, odds ratio) o de sus diferencias (riesgo atribuible y fracción atribuible). Finalmente, para evaluar la posibilidad de que los resultados observados sean solo producto del azar, la estadística clásica aporta una serie de métodos y pruebas que permiten pronunciarse al respecto. Dichas pruebas computan la probabilidad de haber obtenido los datos empíricamente observados, calculada bajo el supuesto de que la hipótesis de nulidad es correcta (la cual se denota como “p”). En general, la mayoría de los investigadores trabajan con un nivel de significación del 5% (equivalentemente, con un nivel de confianza del 95%), por lo que aceptan que existe asociación entre las variables estudiadas cuando el valor de p es menor que 0,05.

Tanto las medidas de efecto como las pruebas estadísticas a utilizar, dependerán del diseño del estudio del que proceden los datos, del tipo de variables y categorías consideradas y de que se haya considerado o no más de un estrato (una tercera variable).

Las pruebas de significación estadística que acompañan el análisis basan su examen en comparar los resultados observados con los esperados (bajo el supuesto de que no hay asociación). Cuanto mayor sea la diferencia entre la distribución observada y la esperada, menos razonable es suponer que la distribución observada sea solo producto del azar.

El cálculo de los valores esperados se realiza usando los valores marginales de la tabla, asumiendo que la probabilidad para cada categoría es la misma que la de todo el grupo y que no existe asociación entre las variables estudiadas.

Por ejemplo, en una situación en la que se conoce que hay 300 individuos y que los valores marginales son, por una parte, que 100 están enfermos y 200 sanos y, por otra parte, que 60 de los 300 estuvieron expuestos a cierto factor de riesgo y 240 no, entonces los valores esperados para cada celda pueden calcularse obteniendo el producto de los dos valores marginales de la celda y dividiéndolo por el gran total. Por ejemplo, el número esperado de enfermos entre los expuestos será de $60 \times 100 / 300 = 20$, y el de no enfermos no expuestos: $240 \times 200 / 300 = 160$. El resultado de ese cómputo de valores esperados para las celdas se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 6. Tabla de contingencia. Enfermedad / Factor de riesgo.

FACTOR DE RIESGO	ENFERMEDAD		
	SI	NO	TOTAL
EXPUESTOS	20	40	60
NO EXPUESTOS	80	160	240
TOTAL	100	200	300

En la práctica, en las tablas de 2x2 solo sería necesario calcular el valor esperado de una celda, porque los valores de las restantes se podrán deducir del que ésta asuma y de los valores marginales. En el ejemplo, si se espera que haya 20 enfermos expuestos, los 80 enfermos restantes serán no expuestos. Y como de los 60 expuestos solo 20 están enfermos, los restantes 40 serán sanos. Así, el valor de la celda correspondiente a los no enfermos no expuestos no puede ser otro que 160 para completar los 200 no enfermos.

Esta dependencia e independencia de las celdas se conoce como grados de libertad y, como se vio, en las tablas 2x2 solo hay un grado de libertad. El

cálculo de los grados de libertad resulta de multiplicar el número de columnas menos 1 por el número de filas menos 1:

$$\text{Grados de libertad} = (N^{\circ} \text{ de Columnas} - 1) \times (N^{\circ} \text{ de filas} - 1) \dots \dots \dots (4.6)$$

Las pruebas de independencia basadas en las discrepancias entre frecuencias observadas y esperadas sólo son válidas en el caso de muestras grandes. Si la muestra es pequeña, se recomienda utilizar métodos exactos, como la prueba de Fisher, que calcula la probabilidad exacta de obtener los resultados observados si las dos variables son independientes y los totales marginales son fijos.

Finalmente, es importante considerar que para poder realizar estos cálculos, las categorías de las variables deberán ser excluyentes y exhaustivas. Es decir, deberá evitarse que su definición permita que algunas observaciones puedan pertenecer a 2 ó más categorías así como que, por el contrario, algunas observaciones no sean incluibles en categoría alguna.

4.2.2. Estadísticos¹³

El grado de relación existente entre dos variables categóricas no puede ser establecido simplemente observando las frecuencias de una tabla de contingencia. Incluso aunque la tabla recoja las frecuencias porcentuales en lugar de las absolutas, la simple observación de las frecuencias no puede llevarnos a una conclusión definitiva (aunque sí pueda darnos alguna pista). Para determinar si dos variables se encuentran relacionadas debemos utilizar alguna medida de asociación, preferiblemente acompañada de su correspondiente prueba de significación

¹³ <http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Pantalla/12contin.pdf>

4.2.2.1. Chi - Cuadrado

La opción Chi cuadrado proporciona un estadístico (también conocido como X^2 o ji-cuadrado) propuesto por Pearson (1911) que permite contrastar la hipótesis de que los dos criterios de clasificación utilizados (las dos variables categóricas) son independientes. Para ello, compara las frecuencias observadas (las frecuencias de hecho obtenidas) con las frecuencias esperadas (las frecuencias que teóricamente deberíamos haber encontrado en cada casilla si los dos criterios de clasificación fueran independientes). Cuando dos criterios de clasificación son independientes, las frecuencias esperadas se estiman de la siguiente manera:

$$Frecuencia\ esperada = \frac{(Total\ de\ la\ fila,i) \times (Total\ de\ columna,j)}{\# total\ de\ casos} \dots\dots\dots(4.6)$$

(i se refiere a una fila cualquiera; j a una columna cualquiera; ij a una casilla cualquiera). Es decir, bajo la condición de independencia, la frecuencia esperada de una casilla concreta se obtiene dividiendo el producto de las frecuencias marginales correspondientes a esa casilla (su total de fila y su total de columna) por el número total de casos.

Obtenidas las frecuencias esperadas para cada casilla, el estadístico X^2 o chi-cuadrado de Pearson se obtiene de la siguiente manera:

$$X^2 = \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij} - m_{ij})^2}{m_{ij}} \dots\dots\dots(4.7)$$

(n_{ij} se refiere a las frecuencias observadas y m_{ij} a las esperadas). De la ecuación 4.7 se desprende que el estadístico X^2 valdrá cero cuando las variables sean completamente independientes (pues las frecuencias observadas y las esperadas serán iguales), y que el valor del estadístico X^2 será tanto mayor cuanto mayor sea la discrepancia entre las frecuencias observadas y las

esperadas (discrepancia que será tanto mayor cuanto mayor sea la relación entre las variables).

El estadístico X^2 sigue el modelo de distribución de probabilidad χ^2 con los grados de libertad resultantes de multiplicar el número de filas menos uno por el número de columnas menos uno (Ecuación 4.6).

Por tanto, podemos utilizar la distribución χ^2 para establecer el grado de compatibilidad existente entre el valor del estadístico X^2 y la hipótesis de independencia. Si los datos son compatibles con la hipótesis de independencia, la probabilidad asociada al estadístico X^2 será alta (mayor de 0,05). Si esa probabilidad es muy pequeña (menor que 0,05), consideraremos que los datos son incompatibles con la hipótesis de independencia y concluiremos que las variables estudiadas están relacionadas.

Para que las probabilidades de la distribución χ^2 constituyan una buena aproximación a la distribución del estadístico X^2 conviene que se cumplan algunas condiciones; entre ellas, que las frecuencias esperadas no sean demasiado pequeñas. Suele asumirse que, si existen frecuencias esperadas menores que 5, éstas no deben superar el 20 por ciento del total de frecuencias esperadas. En el caso de que ese porcentaje supere el 20 por ciento, el estadístico de Pearson debe ser interpretado con cautela.

4.2.2.2. Correlaciones

Cuando se analizan datos, el interés del analista suele centrarse en dos grandes objetivos: comparar grupos y estudiar relaciones. Suele decirse que los sujetos más frustrados son también más agresivos; que cuanto mayor es el nivel educativo, mayor es el nivel de renta; que los niveles altos de colesterol en sangre suelen ir acompañados de dietas alimenticias ricas en grasas; que los sujetos muestran más interés por una tarea cuanto mayor es el tamaño de la recompensa que reciben; etc. En todos los ejemplos mencionados se habla de la relación entre dos variables. En este capítulo se estudian algunos índices

estadísticos que permiten cuantificar el grado de relación existente entre dos variables.

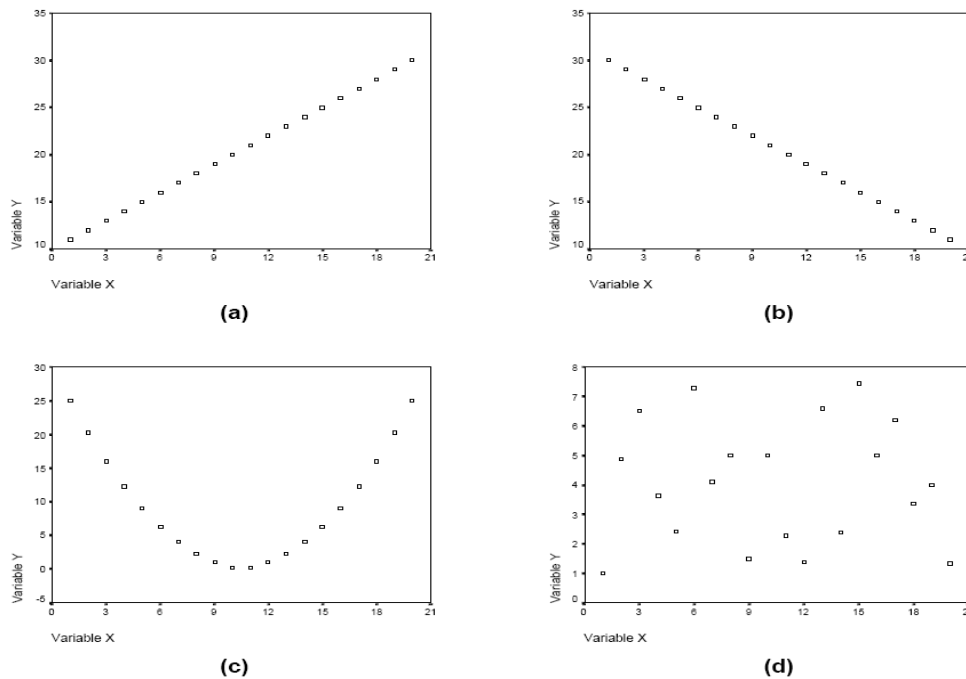
El concepto de relación o correlación se refiere al grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. En este apartado nos vamos a centrar en el estudio de un tipo particular de relación llamada lineal y nos vamos a limitar a considerar únicamente dos variables (simple). Una relación lineal positiva entre dos variables X_i e Y_i indica que los valores de las dos variables varían de forma parecida: los sujetos que puntúan alto en X_i tienden a puntuar alto en Y_i y los que puntúan bajo en X_i tienden a puntuar bajo en Y_i . Una relación lineal negativa significa que los valores de las dos variables varían justamente al revés: los sujetos que puntúan alto en X_i tienden a puntuar bajo en Y_i y los que puntúan bajo en X_i tienden a puntuar alto en Y_i . La forma más directa e intuitiva de formarnos una primera impresión sobre el tipo de relación existente entre dos variables es a través de un diagrama de dispersión. Un diagrama de dispersión es un gráfico en el que una de las variables (X_i) se coloca en el eje de abscisas, la otra (Y_i) en el de ordenadas y los pares (x_i, y_i) se representan como una nube de puntos. La forma de la nube de puntos nos informa sobre el tipo de relación existente entre las variables.

La figura 7 recoge cuatro diagramas de dispersión que reflejan cuatro tipos de relación diferentes.

La figura 7.a muestra una situación en la que cuanto mayores son las puntuaciones en una de las variables, mayores son también las puntuaciones en la otra; cuando ocurre esto, los puntos se sitúan en una línea recta ascendente y hablamos de relación lineal positiva. La figura 7.b representa una situación en la que cuanto mayores son las puntuaciones en una de las variables, menores son las puntuaciones en la otra; en este caso, los puntos se sitúan en una línea recta descendente y hablamos de relación lineal negativa. En la situación representada en la figura 7.c también existe una pauta de variación clara, pero no es lineal: los puntos no dibujan una línea recta. Y en la figura 7.d no parece

existir ninguna pauta de variación clara, lo cual queda reflejado en una nube de puntos dispersa, muy lejos de lo que podría ser una línea recta.

Figura 7. Diagramas de dispersión expresando diferentes tipos de relación.



Fuente: Universidad de Cádiz, Guía para el análisis de datos.

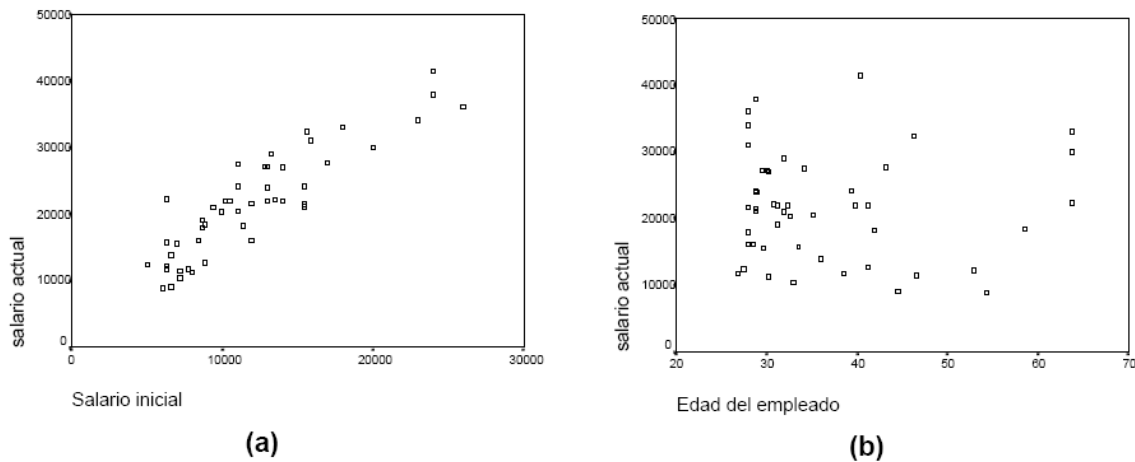
Vemos, pues, que un diagrama de dispersión nos permite formarnos una idea bastante aproximada sobre el tipo de relación existente entre dos variables. Pero, además, observando los diagramas de la figura 7, podemos ver que un diagrama de dispersión también puede utilizarse como una forma de cuantificar el grado de relación lineal existente entre dos variables: basta con observar el grado en el que la nube de puntos se ajusta a una línea recta.

Sin embargo, utilizar un diagrama de dispersión como una forma de cuantificar la relación entre dos variables no es, en la práctica, tan útil como puede parecer a primera vista. Esto es debido a que la relación entre dos variables no siempre es perfecta o nula: habitualmente no es ni lo uno ni lo otro. Consideremos los

diagramas de dispersión de la figura 8. En el diagrama de la figura 8.a, los puntos, aun no estando situados todos ellos una línea recta, se aproximan bastante a ella. Podríamos encontrar una línea recta ascendente que representara de forma bastante aproximada el conjunto total de los puntos del diagrama, lo cual indica que la relación entre las variables salario inicial y salario actual es lineal y positiva: a mayor salario inicial, mayor salario actual.

En el diagrama 8.b, por el contrario, da la impresión de que no hay forma de encontrar una recta que se aproxime a los puntos. Al margen de que entre las variables edad y salario actual pueda existir algún tipo de relación, parece claro que la relación no es de tipo lineal.

Figura 8. Diagramas de dispersión representando relación lineal (a) e independencia lineal (b).



Fuente: Universidad de Cádiz, Guía para el análisis de datos.

Estas consideraciones sugieren que hay nubes de puntos a las que es posible ajustar una línea recta mejor de lo que es posible hacerlo a otras. Por lo que el ajuste de una recta a una nube de puntos no parece una cuestión de todo o nada, sino más bien de grado (más o menos ajuste).

Lo cual nos advierte sobre la necesidad de utilizar algún índice numérico capaz de cuantificar ese grado de ajuste con mayor precisión de lo que nos permite hacerlo una simple inspección del diagrama de dispersión.

Estos índices numéricos suelen denominarse coeficientes de correlación y sirven para cuantificar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Por supuesto, al mismo tiempo que permiten cuantificar el grado de relación lineal existente entre dos variables, también sirven para valorar el grado de ajuste de la nube de puntos a una línea recta.

4.2.2.3. Coeficiente de Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (1896) es, quizá, el mejor coeficiente y el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Se suele representar por r y se obtiene tipificando el promedio de los productos de las puntuaciones diferenciales de cada caso (desviaciones de la media) en las dos variables correlacionadas:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n S_x S_y} \dots\dots\dots(4.8)$$

(x_i e y_i se refieren a las puntuaciones diferenciales de cada par; n al número de casos; y S_x y S_y a las desviaciones típicas de cada variable).

El coeficiente de correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1: un valor de 1 indica relación lineal perfecta positiva; un valor de -1 indica relación lineal perfecta negativa (en ambos casos los puntos se encuentran dispuestos en una línea recta); un valor de 0 indica relación lineal nula. El coeficiente r es una medida simétrica: la correlación entre X_i e Y_i es la misma que entre Y_i y X_i .

Es importante señalar que un coeficiente de correlación alto no implica causalidad. Dos variables pueden estar linealmente relacionadas (incluso muy relacionadas) sin que una sea causa de la otra.

4.2.2.4. Coeficiente de Correlación de Spearman

El coeficiente de correlación rho de Spearman (1904) es el coeficiente de correlación de Pearson, pero aplicado después de transformar las puntuaciones

originales en rangos. Toma valores entre -1 y 1, y se interpreta exactamente igual que el coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de Spearman puede utilizarse como una alternativa al de Pearson cuando las variables estudiadas son ordinales y/o se incumple el supuesto de normalidad

4.3. REGRESIÓN LOGÍSTICA

El objetivo primordial que resuelve esta técnica es el de modelar cómo influye en la probabilidad de aparición de un suceso, habitualmente dicotómico, la presencia o no de diversos factores y el valor o nivel de los mismos. También puede ser usada para estimar la probabilidad de aparición de cada una de las posibilidades de un suceso con más de dos categorías (politómico).

De todos es sabido que este tipo de situaciones se aborda mediante técnicas de regresión. Sin embargo, la metodología de la regresión lineal no es aplicable ya que ahora la variable respuesta sólo presenta dos valores (nos centraremos en el caso dicotómico), como puede ser presencia/ausencia de un evento.¹⁴

Cuando se tenga una variable dependiente dicotómica (0/1; si/no; vivo/muerto; Curado/no-curado, etc.) que se desee predecir, o para la que se quiera evaluar la asociación o relación con otras (más de una) variables independientes y de control, el procedimiento a realizar es una regresión logística (RL) binaria multivariante.

La regresión logística es probablemente el tipo de análisis multivariante más empleado en ciencias de la vida. Las razones más poderosas son:

1. Permite introducir como variables predictoras de la respuesta (efecto o variable dependiente) una mezcla de variables categóricas y cuantitativas.

¹⁴ <http://www.seh-lilha.org/rlogis1.htm>

2. A partir de los coeficientes de regresión (β) de las variables independientes introducidas en el modelo se puede obtener directamente la relación de Odds (OR) de cada una de ellas, que corresponde al riesgo de tener el resultado o efecto evaluado para un determinado valor (x) respecto al valor disminuido en una unidad ($x-1$).

Así, si la variable independiente es una variable cuantitativa, la OR que se obtiene representa la probabilidad del evento predicho que tiene un individuo con un valor x frente a la probabilidad que tiene un individuo con valor ($x-1$). Por ejemplo, si X es la variable EDAD (en años cumplidos) y estamos prediciendo muerte, la OR será la probabilidad de muerte que tiene, por ejemplo, un individuo de 40 años en relación a la que tiene uno de 39 años.

Si la variable independiente es cualitativa, la RL sólo admite categorías dicotómicas, de manera que la OR es el riesgo de los sujetos con un valor frente al riesgo de los sujetos con el otro valor para esa variable.

3. En la RL la variable dependiente (la que se desea modelizar, Y) es categórica, habitualmente dicotómica (RL binaria), lo que constituye una circunstancia muy frecuente y simple de representar fenómenos en la naturaleza y en ciencias de la vida: si/no, presente/ausente, etc. Esto hace a este tipo de análisis el ideal para aplicar en los estudios de casos y controles, estudios en los que los casos tienen algo (habitualmente una enfermedad, un efecto o un desenlace) y los controles no.
4. Lo que se pretende mediante la RL es expresar la probabilidad de que ocurra el evento en cuestión como función de ciertas variables, que se presumen relevantes o influyentes. Si ese hecho que queremos modelizar o predecir lo representamos por Y (la variable dependiente), y las k variables explicativas

(independientes y de control) se designan por $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$, la ecuación general (o función logística) es:

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha - \beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \beta_3 X_3 - \dots - \beta_k X_k)} \dots \dots \dots (4.9)$$

Donde $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$, son los parámetros del modelo, y \exp denota la función exponencial. Esta función exponencial es una expresión simplificada que corresponde a elevar el número e a la potencia contenida dentro del paréntesis, siendo e el número o constante de Euler, o base de los logaritmos neperianos (cuyo valor aproximado a la milésima es 2,718).

Antes de ponerse a hacer regresión logística, es recomendable tener en cuenta ciertos detalles. Por eso recomendamos establecer claramente lo siguiente:

1. Cuáles podrían ser variables realmente predictoras (independientes), normalmente hay una (o unas pocas) variable independiente que es la que se desea evaluar, comprender o modelizar su papel sobre el efecto, analizando su relación o asociación con la variable dependiente, y debe formar parte de la hipótesis principal del estudio analítico, de la respuesta (dependiente). Esto lo da el conocimiento del tema y la revisión de la literatura.
2. Cuáles podrían ser variables confundentes, las variables de confusión son variables predictoras de la respuesta o efecto, externas a la relación principal que se analizan (no son un mero paso intermedio entre la exposición y la respuesta), y simultáneamente relacionadas con la variable independiente. Su presencia genera un sesgo o error al evaluar la relación entre la variables independiente (X) y dependiente (Y). Será necesario ajustar o controlar, ya que, de lo contrario, la evaluación de la relación principal ($X \rightarrow Y$) podría ser espúrea o artefactada. Esto lo da el conocimiento del tema y la revisión de la literatura, por lo que deben recogerse (e incluirse

en el análisis) aquellas variables predictoras que otros estudios hayan reconocido como tales. El análisis estratificado y el análisis multivariante serán las estrategias en esta fase de análisis para corregir su efecto, procedimientos que permiten el ajuste o control.

3. Cuáles podrían ser variables modificadoras de efecto o de interacción, una variable modificadora de efecto es una característica de la relación entre el factor de estudio (exposición) y el efecto (resultado), y puede aportar datos interesantes sobre los causales. De detectarse este efecto, debe mostrarse, no controlarse. Estos producen cambios en la relación principal evaluada ($X \rightarrow Y$) en términos de incrementarla o disminuirla. Esto también lo da el conocimiento del tema y la revisión de la literatura, aunque en ocasiones es un descubrimiento del investigador, debiendo entonces incorporarse a las conclusiones del estudio. El análisis estratificado, evaluando la relación principal en los diferentes estratos de la variable presumiblemente modificadora de efecto, y el análisis multivariante, incluyendo términos multiplicativos ($X \cdot M$) con la variable independiente (X) y la variable modificadora de efecto (M), son los procedimientos estadísticos para detectar su presencia y explicar su comportamiento.
4. Qué sentido tiene nuestro análisis, diferenciando dos grandes objetivos:
 - a. Predecir una determinada respuesta a partir de las variables predictoras o independientes, obteniendo una fórmula matemática que sirva para calcular la probabilidad del suceso estudiado en un nuevo individuo en razón de los valores que presente de las diferentes variables incluidas en el modelo. Bajo esta óptica, debemos buscar, entre todos los posibles modelos, el más parsimonioso, que es el que con el menor número de variables posibles (independientes y de control) genera una predicción más precisa y válida de la respuesta evaluada. Recuerde que

introducir variables poco relevantes tiende a enmascarar el proceso de modelado y puede llevar a estimaciones no válidas. Por otra parte, intentar construir un modelo con muchas variables puede ser un problema cuando hay pocas observaciones, ocasionando estimaciones inestables y poco precisas.

- b. Calcular los riesgos ajustados o controlados (no sesgados) para cada variable independiente. En este caso es importante determinar el conjunto de variables que será oportuno controlar en el análisis, incluyendo aquellas que tengan una adecuada justificación teórica. Los pasos a seguir serían:
 - i. Valorar si hay interacción (modificando el efecto) entre alguna de las variables de control y la variable independiente, con pruebas de significación estadística, dejando en el modelo los términos de interacción que sean estadísticamente significativos.
 - ii. Valorar si hay confusión entre alguna de las variables de control y la relación principal evaluada, sin aplicar pruebas de significación estadística. En esta situación lo que debe analizarse es si la introducción de una variable de control en el modelo de regresión logística produce un cambio importante en la medida de asociación que estima el efecto de la exposición (X) sobre la respuesta (Y). Si no es así dicha variable de control debe ser eliminada del modelo, pues de dejarla en él es posible que disminuya la precisión del estudio, sin aportar ajuste (sobreajuste).
 - iii. Si al final del proceso hay más de un subconjunto de variables de control que ofrecen un similar grado de ajuste, se deberá elegir el que estime con mayor precisión el efecto principal evaluado ($X \rightarrow Y$) en la investigación.

5. ANALISIS DE TRABAJOS RECIENTES DE CEMENTACIÓN REMEDIAL EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN

Con el fin de mostrar la metodología que se siguió para obtener los datos, clasificarlos y analizar los trabajos de cementación remedial se muestra a modo de ejemplos algunos pozos con sus respectivas graficas y tablas.

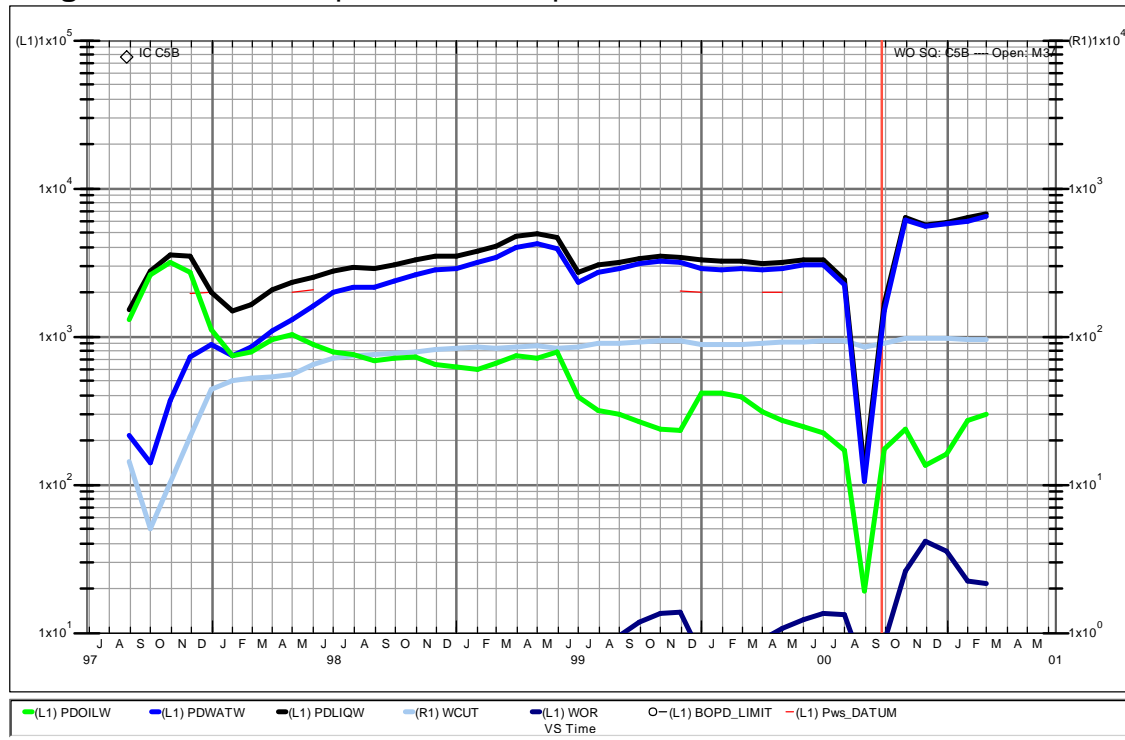
Debido a la gran cantidad de trabajos que se encontraron desde los años noventa hasta la actualidad (56), solamente se hace el análisis para unos cuantos pozos, ya que este no es el objetivo del trabajo de investigación. La totalidad de trabajos se muestran en el anexo A. El color rojo de algunos trabajos corresponde a los pozos que tuvieron problemas con el aislamiento y por lo tanto se tuvo que utilizar herramientas de aislamiento mecánico (Scab Liner)

5.1. POZO A-76

El pozo A-76 es un pozo de desarrollo desviado el cual presenta un ángulo de desviación de 25° en los intervalos (7,806'-7,813'y 7,818'-7,824') de la formación Carbonera Superior los cuales eran los intervalos que se iban a aislar. El pozo tiene instalado una tubería de revestimiento de diámetro externo de 9 5/8", los intervalos a aislar llevaban un tiempo de completamiento de 1,115 días, los cuales tenían una tasa de producción de fluidos máxima de 5,000 BFPD (ver figura 9), un corte de agua de 98% y una producción acumulada aproximada de 3'000,000 de barriles de fluido. Durante este tiempo el pozo presentó una producción máxima de arena de 2,000 ppm.

Los intervalos de la formación Carbonera Superior cuentan con una porosidad de 28% y una permeabilidad de 4,000 mD.

Figura 9. Historia de producción del pozo A-76



Fuente: Occidental de Colombia. DSS – Landmark

• **Descripción Del Trabajo**

El trabajo de cementación remedial que se le realizó al pozo A-76 constó de tres intentos para alcanzar el aislamiento del intervalo perforado. El primer intento se realizó con 30 bls de lechada tixotrópica con una densidad de 14.6 libras por galón, la cual fue bombeada al pozo a una rata de 3 bpm y se desplazó con 19 bls de agua. Se esperó seis minutos y la formación tomó tres barriles. Se continuó desplazando con cuatro barriles de agua a 0.5 bpm y 0 psi. Se esperó 38 minutos y el pozo tomó 28 bls de agua. Se sobre desplazó con 20 bls de agua. Se realizó la prueba de inyectividad y el pozo no levanto presión. Se decidió mezclar 50 bls de lechada tixotrópica con una densidad de 14.6 ppg, se bombeó a 2 bpm y una presión de 20 psi, desplazando luego con 39 bls de agua a 1 bpm y cero (0) psi, después de bombear 70 bls de agua la presión incremento a 42 psi, se realizó hesitación y se bombeó 17 bls más con un

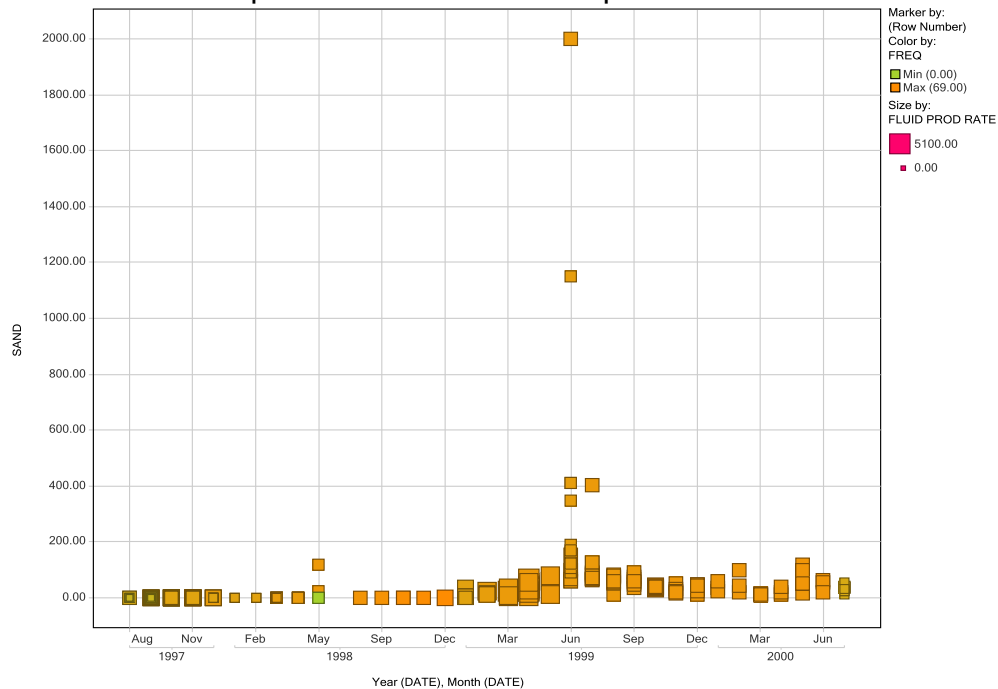
aumento de presión de 700 psi, que luego al parar la bomba cayó a 0 psi. Se volvió a sobredesplazar. Se realizó nuevamente la prueba de inyectividad alcanzando una presión de 350 psi a una tasas de 2.5 bpm. Se mezclaron 50 bls de lechada convencional, se bombeó a 1.5 bpm y 9 psi, se desplazó 42 bls a 1 bpm y 0 psi, no tomó por gravedad, se continuó desplazando hasta alcanzar una presión de forzamiento de 2,800 psi

Pese a no tener una alta rata de producción ni una gran producción acumulada, el pozo producía grandes cantidades de arena (ver figura 10) por lo que se creería que se pudo haber formado una caverna detrás de la tubería de revestimiento y por lo mismo se podría pensar que en los primeros intentos el cemento estaba llenando el espacio vacío, para el tercer intento ya había el cemento necesario para crear el sostén suficiente para aislar apropiadamente el intervalo abierto, permitiendo a la lechada de cemento deshidratarse y crear una torta de cemento en la cara de la formación.

5.2. POZO A-62

El pozo A-62 es un pozo de desarrollo vertical el cual tenía como objetivo principal las arenas de la formación Carbonera Superior. El pozo se completó en los intervalos (7,354'-7,358' y 7,362'-7,369', 7,415'-7,425' y 7,431'-7,435'). Debido a interferencia con el pozo A-89 se decidió aislar los intervalos de C4C; todos los intervalos abiertos contaban con una producción acumulada 375,627 barriles de fluido (ver figura 11) y producían a una rata máxima de 4,300 BFPD con un mayor corte de agua en los intervalos inferiores, el pozo tuvo una producción máxima de arena de 116 ppm (ver figura 12). El pozo tiene instalado tubería de revestimiento de 9 5/8".

Figura 10. Historia de producción de arena del pozo A-76



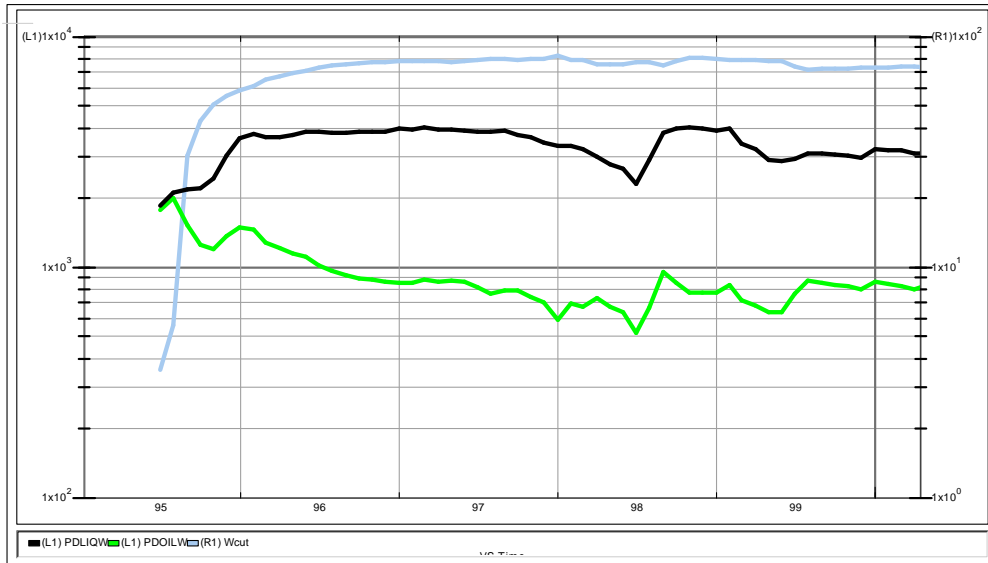
Fuente: Occidental de Colombia. Spotfire DXP.

Los intervalos a aislar cuentan con una porosidad de 23% y una permeabilidad de 1,700 mD.

- **Descripción Del Trabajo**

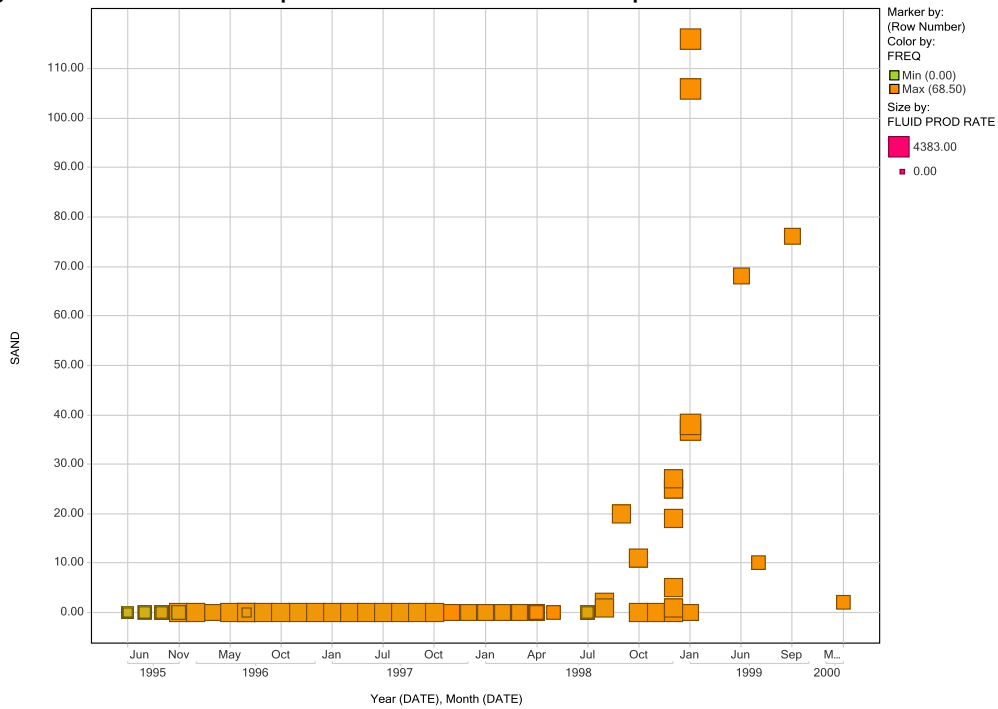
Se realizó la prueba de inyectividad con agua a una rata máxima de bombeo de 2.5 bpm alcanzando una presión de 1,400 psi. Según los resultados de la prueba se decidió utilizar cemento convencional para realizar el aislamiento. Se mezclaron 150 sacos de cemento clase G con controladores de filtrado para obtener un volumen de lechada de cemento de 30 barriles con una densidad de 16 ppg. Se empezó a bombear lechada de cemento a una tasa de 1 bpm y 100 psi. Se desplazó la lechada con 19 barriles de agua a 1 bpm, se continuó bombeando a 0.5 bpm hasta obtener una presión de forzamiento de 2,200 psi, dejando dentro de la formación 16.5 bbls de cemento.

Figura 11. Historia de producción del pozo A-62



Fuente: Occidental de Colombia. DSS – Landmark

Figura 12. Historia de producción de arena del pozo A-62



Fuente: Occidental de Colombia. Spotfire DXP.

En este caso el trabajo se realizó en un solo intento, el pozo levanto presión hasta 1400 psi en la prueba de inyectividad la cual permite tener idea de que tanto cemento va a tomar la formación, ya que si el pozo levanto presión con agua la cual tiene una menor densidad y viscosidad que la lechada de cemento, entonces con esta ultima el flujo hacia la formación será mucho más restringido lo cual permite que el cemento se deshidrate y genere una torta de cemento en la cara de la formación la cual presenta mejores propiedades físicas para el aislamiento de la zona. Así mismo el intervalo tenía un volumen bajo de fluido acumulado, no era buen productor de arena, ni tenía grandes ratas de producción diaria por lo que se podría pensar que no existía una caverna detrás de la tubería de revestimiento lo que permitió que la lechada de cemento tuviera soporte y se halla podido sentar fácilmente en la formación.

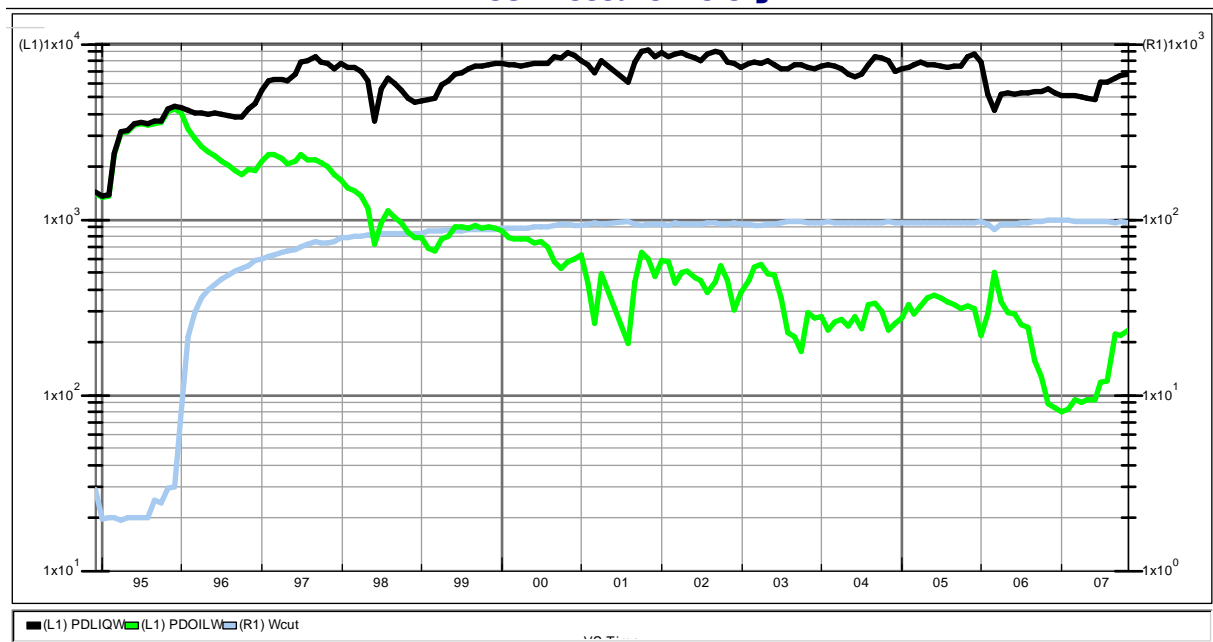
5.3. POZO A-58

El pozo A-58 es un pozo vertical con tubería de revestimiento de 9 /58", completado en las arenas de la formación Carbonera Superior (7,569'-7,580'; 7,582'-7,587'; 7,588'-7,593' y 7,601'-7,608'), posteriormente el pozo se recompletó en los intervalos (7642-7653, 7656-7663, 7670-7676'). Basados en un PLT corrido en agosto de 1995, se observó que el intervalo (7569-7580, 7582-7587, 7588-7593, 7601-7608) no produce fluidos y el intervalo (7642-7653, 7656-7663, 7670-7676') produce el 100% del fluido con un corte de agua del 92.5%. De acuerdo con las medidas de presión realizadas en el pozo A-59 se estimó que el intervalo superior tiene 1300 psi @ 7100 pies TVSS. Igualmente las medidas de presión en A-58 indican una presión de 2100 psi a 7100 pies TVSS en los intervalos inferiores. Con base en este comportamiento se estimó que los intervalos superiores podría estar tomando fluidos en el pozo A-58. De acuerdo con los resultados del PLT y presión, se recomendó aislar estos intervalos con el fin de optimizar el manejo del yacimiento.

El trabajo consistió en aislar todos los intervalos abiertos superiores y dejar en producción los intervalos perforados inferiores. Dicha unidad contaban con 2,264 días abiertas, con una producción acumulada de 113,574 barriles de fluido, una tasa máxima de producción de 8,000 BFPD y una producción máxima de arena de 436 ppm (ver figura 13 y 14), sin embargo los intervalos superiores nunca produjeron nada, por lo tanto se podría pensar que el trabajo de cementación remedial no iba a ser complicado.

Los intervalos a aislar tienen una porosidad de 25% y una permeabilidad de 2,500 mD.

Figura 13. Historia de producción del pozo A-58



Fuente: Occidental de Colombia. DSS – Landmark

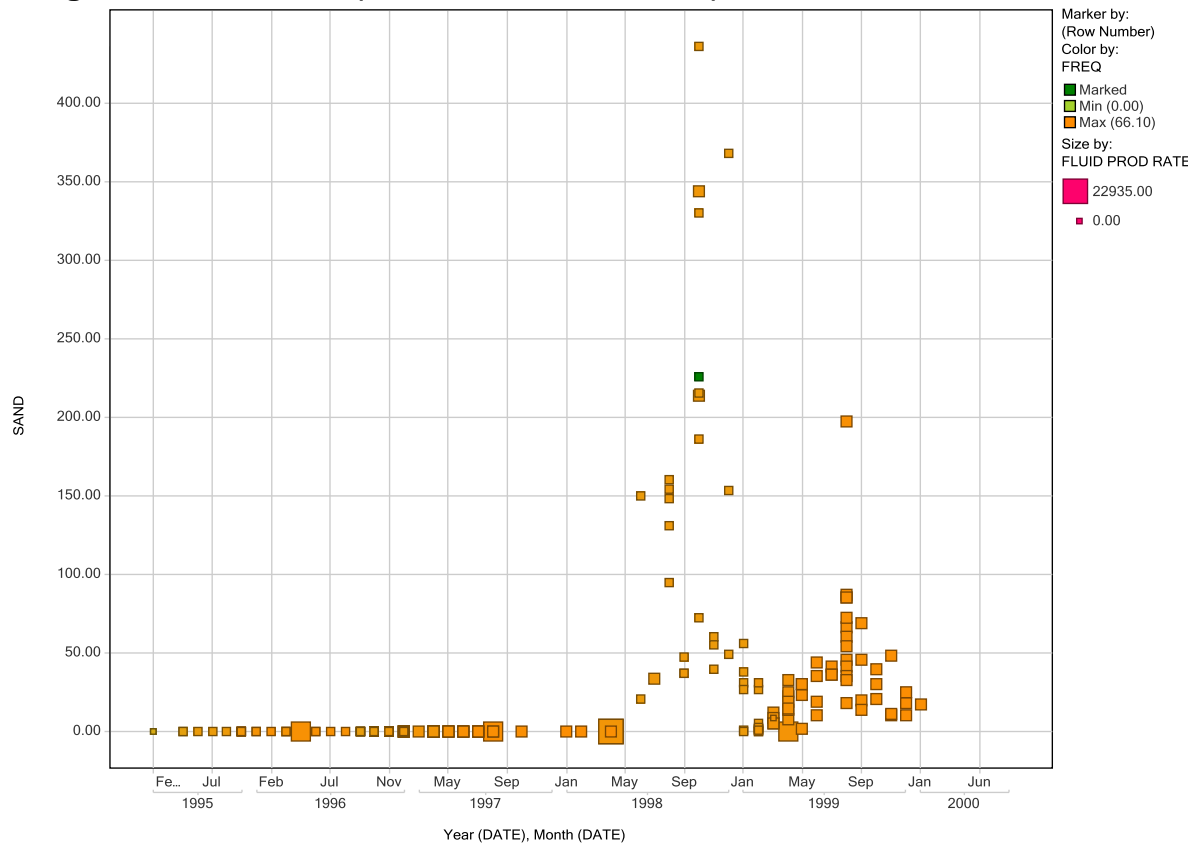
- **Descripción Del Trabajo**

Se sentó empaque retenedor y Empaque tapón y se procedió a realizar la prueba de inyektividad sin que el pozo aumentara presión. Por lo tanto se procedió a utilizar un volumen de 50 barriles de lechada tixotrópica con una densidad de 14.6 ppg. El trabajo se realizó haciendo hesitación, se desplazó

con 72 barriles de agua hasta alcanzar una presión de forzamiento de 1,600 psi. Se dejaron dentro de la formación 33 barriles de cemento.

Pese a que el pozo era buen productor de arena, los intervalos a aislar nunca produjeron, todo el fluido lo aportaba los intervalos inferiores por lo tanto se esperaba un buen resultado del trabajo de cementación remedial. Resultó extraño el hecho de que con la prueba de inyectividad no se levantara presión, por eso el uso de lechada tixotrópica, sin embargo se podría creer que con lechada convencional se hubiera tenido el mismo resultado. El trabajo se realizó en el primer intento sin ningún inconveniente.

Figura 14. Historia de producción de arena del pozo A-58

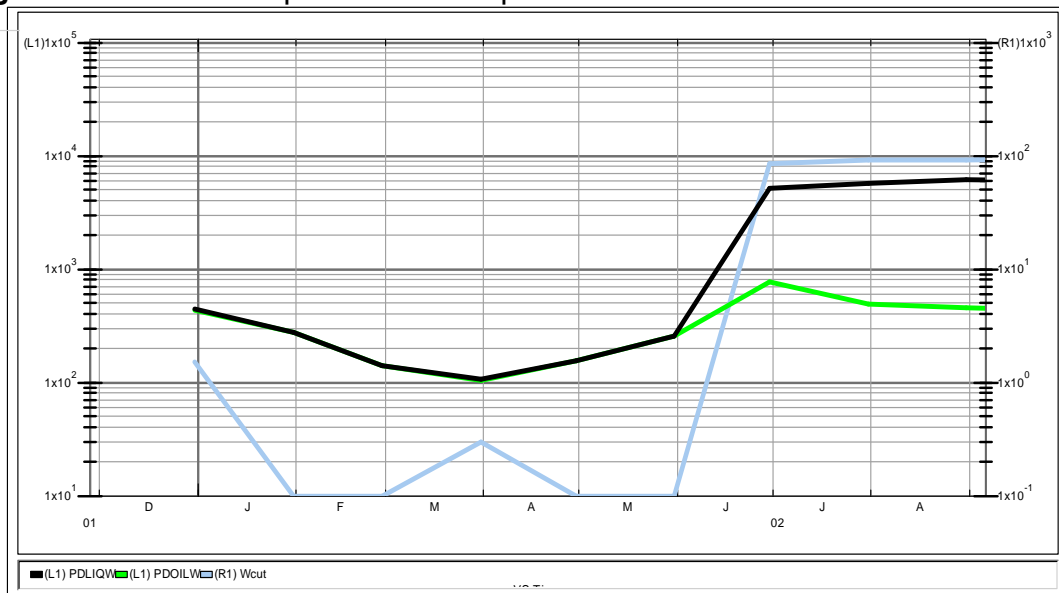


Fuente: Occidental de Colombia. Spotfire DXP.

5.4. A-99

El pozo A-99 se perforo direccionalmente con tubería de revestimiento de 7", completado en la formación carbonera superior (7,385'-7,408'). El pozo contaba con 185 días de producción antes de realizarle el trabajo de cementación remedial, con una producción acumulada de 22,124 barriles de fluido, una tasa máxima de 500 BFPD y una muy baja producción de arena (Ver figura 15 y 16). El pozo comenzó su producción con 462 bfpd con un corte de agua de 0.0%. Al poco tiempo de haber comenzado producción, debido a una caída drástica de presión, la tasa se fue disminuyendo hasta llegar a 36 bfpd. Con base en los niveles de fluido tomados en el pozo se observó que la presión bajó desde 2,127 psi hasta 250 psi aproximadamente. Con el propósito de mejorar la capacidad de producción de petróleo del pozo, se recomendó aislar el intervalo (7385-7408) mediante una cementación forzada. Lo anterior obedeció a que el canal de la Formación Carbonera Superior está cortado por una falla que impide que haya un soporte de presión adecuado para producir el pozo de una forma continua.

Figura 15. Historia de producción del pozo A-99

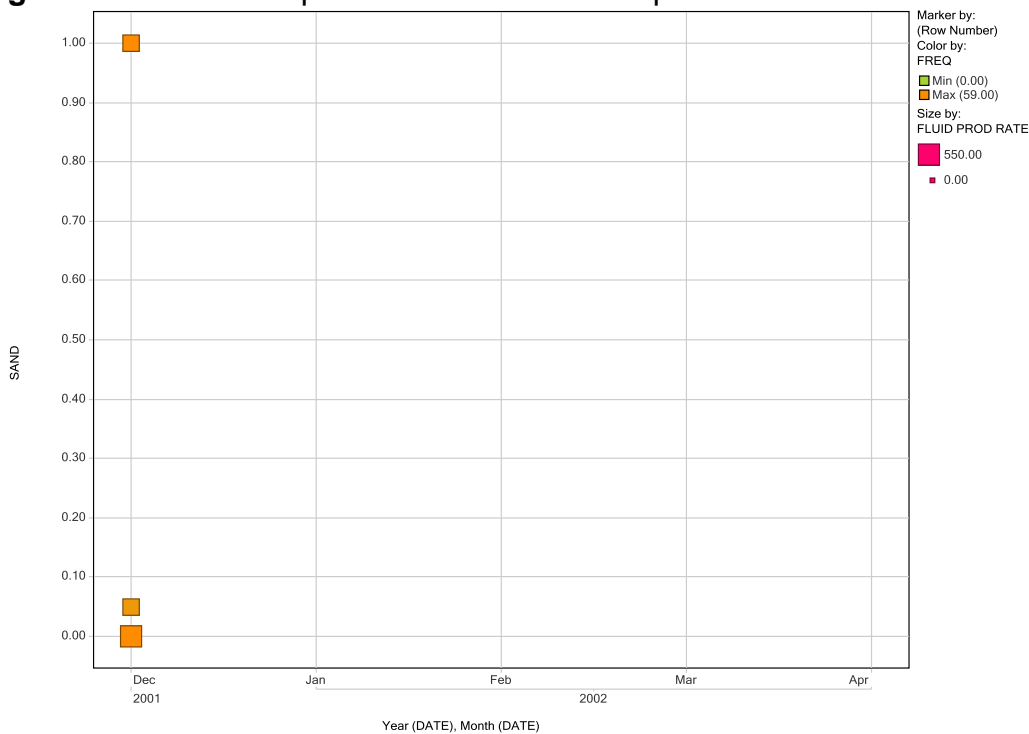


Fuente: Occidental de Colombia. DSS – Landmark

• **Descripción Del Trabajo**

El trabajo consistió en aislar los intervalos (7,385'-7,408'), se bajaron y sentaron empaque retenedor y empaque tapón en el pozo. Se realizó la prueba de inyectividad alcanzando 30 psi a una tasa de 3 bpm. Debido a la baja presión presentada se decidió bombear un preflujo con cloruro de calcio y "Superflush" el cual es otro controlador de filtrado. Se mezclaron 200 sacos de cemento clase G con varios controladores de filtrado para obtener un volumen de lechada de cemento de 50 barriles con una densidad de 14.6 ppg. Se bombeó el cemento a una rata de 0.5 bpm y se desplazo con tan solo 15 barriles de agua aumentando la presión hasta 2,300 psi, la cual fue la presión de forzamiento. Se dejo dentro de la formación 38 barriles de cemento. Como es de esperarse este trabajo tampoco resultaría problemático, se realizó en el primer intento, debido a su corto periodo y bajas ratas de producción de producción lo cual reafirma la idea de la creación de cavernas detrás de la tubería de revestimiento.

Figura 16. Historia de producción de arena del pozo A-99



Fuente: Occidental de Colombia. Spotfire DXP.

5.5. POZO A-91

EL pozo A-91 es un pozo de desarrollo vertical, el cual tiene 5° de desviación en el intervalo que se le realizó el trabajo de cementación remedial (7,226'-7,233), el pozo tiene instalada una tubería de revestimiento de 7". El intervalo lleva un tiempo de producción de 716 días, con una rata máxima de de 400 BFPD y una producción de arena insignificante. La porosidad y permeabilidad de este intervalo es de 27% y 1,000 mD respectivamente.

El pozo se completó con bombeo eléctrosumergible a 5,829 pies, pero un mes después tuvo que ser profundizado 1,320 pies, debido a la baja sumergencia de la bomba. El pozo comenzó su producción con un corte de agua de 0%. La tasa de producción inicial fue de alrededor de 480 BOPD, bajando en pocos días a 280 BOPD y después continuó bajando por problemas de soporte de presión, debido a una falla que se encuentra al sur, cerca del pozo. De ahí hasta la fecha en que se realizó el trabajo de cementación remedial el pozo produjo de una manera intermitente, con una tasa promedio de 27 BOPD y 0% de corte de agua.

- **Descripción Del Trabajo**

Se realizó la prueba de inyectividad y se obtuvo una presión de 1,500 psi con una tasa de bombeo de 1 bpm y un volumen de 5.7 barriles de agua. Una vez realizada la prueba se decide utilizar lechada de cemento tixotrópica. Se mezclaron 150 sacos de cemento clase G con otros aditivos para obtener un volumen de lechada de 37 barriles con una densidad de 14.6 ppg. Se empezó a bombear la lechada a una rata de 4.6 bpm y una presión de 600 psi y se desplazó con 12 barriles de agua. Se continuó desplazando con agua a 0.5 bpm hasta alcanzar una presión de forzamiento de 1,760 psi. Se deja dentro de la formación 12 barriles de lechada.

Debido a que el pozo tenía una producción intermitente, baja producción (27 BOPD) y que no producía arena, el trabajo de cementación remedial estuvo dentro de lo previsto ya que se realizó en un solo intento. El uso de lechada tixotrópica no era necesario, tampoco se realizó hesitación por lo que utilizando lechada convencional se podría tener también buenos resultados.

5.6. POZO A-21

El pozo A-21 es un pozo que se completo arenas del Cretaceo abriendo los intervalos (7,442'-7,445', 7,448'-7,450', 7,464'-7,468', 7,480'-7,492', 7,494'-7,496', 7,506'-7,533', 7,574'-7,585'). El pozo es vertical con tubería de revestimiento de 9 5/8", los intervalos a aislar (7,480'-7,492') y (7,494'-7,496') los cuales según los PLT's (pruebas de producción, ver Tabla 7) para el año 1987 el intervalo superior a aislar tenía mayor producción con casi 3,000 BFPD, mientras que el inferior tan solo aportaba 455 BFPD. Diez años después, la producción de estos dos intervalos era netamente agua, alrededor de los 4,000 BFPD cada uno (ver Tabla 8) por lo que se decidió aislarlos mediante un trabajo de cementación remedial. Las arenas estuvieron abiertas por 5,483 días, con una producción acumulada de 21'394,879 barriles de fluido, una rata máxima de producción de 11,000 BFPD y una producción de arena baja de 8 ppm (ver figura 17). La formación aun mantenía una presión de 2,000 psi para esa fecha.

Tabla 7. PLT corrido en el pozo A-21 en 1987.

POZO	FECHA	TOPE	FONDO	% ACEITE	% AGUA	% GAS	PROD. ACEITE	PROD. AGUA	PROD. GAS
A-21	06/26/1987 00:00:00	7442	7445	5	0	0	325,25	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7448	7450	0	0	0	0	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7464	7468	5	0	0	325,25	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7480	7492	45	0	0	2927,25	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7494	7496	7	0	0	455,35	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7506	7519,75	18	0	0	1170,9	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7519,75	7533	0	0	0	0	0	0
A-21	06/26/1987 00:00:00	7568	7585	20	100	0	1301	7	0

Fuente: Occidental de Colombia

Tabla 8. PLT corrido en el pozo A-21 en 1997.

POZO	FECHA	TOPE	FONDO	% ACEITE	% AGUA	% GAS	PROD. ACEITE	PROD. AGUA	PROD. GAS
A-21	08/23/1997 00:00:00	7442	7445	0	0	0	0	0	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7448	7450	0	0	0	0	0	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7464	7468	16	2	16	29,92	187,08	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7480	7492	0	40	0	0	3741,6	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7494	7496	0	39	0	0	3648,06	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7506	7519,75	11	1	11	20,57	93,54	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7519,75	7533	0	0	0	0	0	0
A-21	08/23/1997 00:00:00	7568	7585	73	18	73	136,51	1683,72	0

Fuente: Occidental de Colombia

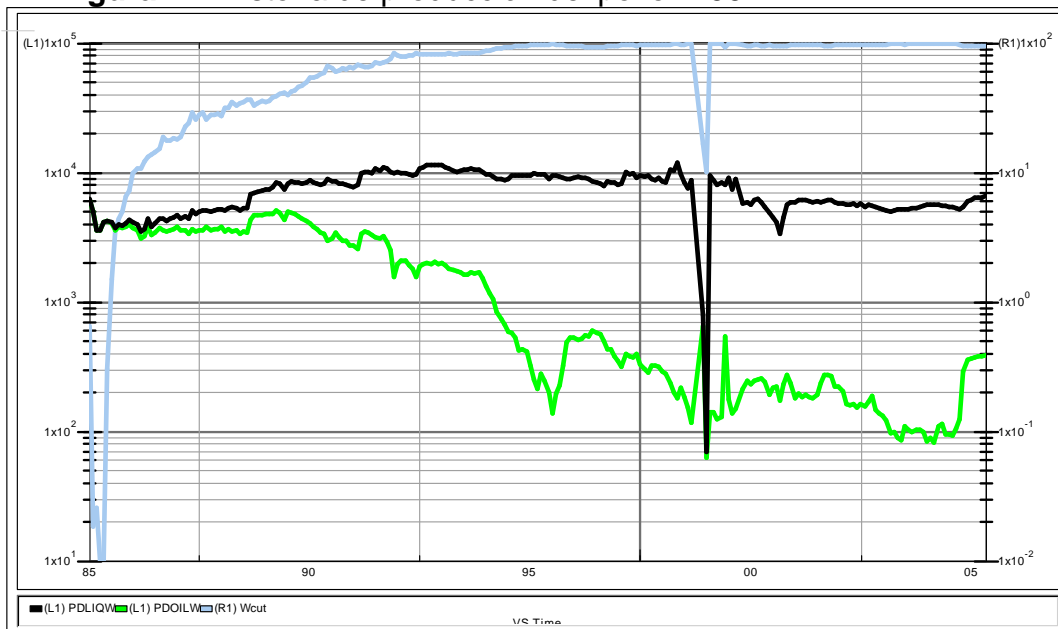
• Descripción Del Trabajo

Se realizó la prueba de inyectividad, bombeando agua a 5 bpm y una presión de 70 psi, desplazando a la formación un volumen de agua igual a 25 barriles. Según este resultado se decide mezclar 150 sacos de cemento clase G con aditivos, de los cuales se obtiene 38.5 barriles de lechada tixotrópica, la cual es bombeada al pozo a una rata de 3 bpm alcanzando una presión de 80 psi. Se desplaza con agua con una rata entre 1 – 3 bpm durante 3 horas realizando hesitación esperando la reacción de la lechada tixotrópica, sin embargo cuando se deja de bombear se observa que los intervalos toman a 0.6 bpm por gravedad.

Se realizó el segundo intento para aislar los intervalos. La prueba de inyectividad mostró que a una rata de bombeo de 5 bpm se obtuvo un aumento de presión de 60 psi, con un volumen bombeado de 20 barriles de agua. Se decidió utilizar 37 barriles de lechada de cemento tixotrópica con densidad de 14.6 ppg, esta se bombeó a 3 bpm y 50 psi, se desplazó con 60 barriles de agua a 3 bpm y 17 psi. Se dejó de bombear y se esperó 30 minutos, al volver abrir las válvulas el intervalo siguió tomando por gravedad. Se sobre desplazó la lechada de cemento con 20 barriles de agua. Se realizó un nuevo intento y la prueba de inyectividad mostró que a una tasa de 4 bpm, levanta una presión de 35 psi. Se bombearon 50 barriles de lechada convencional a 2.5 bpm y 60 psi, se

desplazó con 18 barriles de agua a una rata de 3 bpm y 22 psi. Se continuó desplazando a 1 bpm y 0 psi. Se dejó de bombear y el intervalo siguió tomando por gravedad.

Figura 17. Historia de producción del pozo A-99



Fuente: Occidental de Colombia. DSS – Landmark

Se esperaron 22 horas para que el cemento fragüe y se realizó un nuevo intento. Se hizo la prueba de inyectividad con una rata de bombeo de 2.5 bpm alcanzando una presión de 620 psi con un volumen de 63 barriles de agua. Según estos resultados, se decidió utilizar lechada convencional, 50 barriles con densidad de 14.6 ppg. Debido a que el pozo estaba tomando por gravedad, se decidió utilizar una mezcla de preflujos de cloruros de calcio y “Superflush” desplazados por separado con un colchón de agua. Se bombeó la lechada de cemento a 1 bpm y se desplazó con 41 barriles de agua con una rata entre 1 – 0.5 bpm alcanzando una presión de forzamiento de 2,800 psi.

A-21 es un pozo, que tiene una gran producción acumulada, una rata diaria de producción moderada y una producción de arena relativamente baja, sin

embargo debido a que el dato de producción de arena es un dato puntual, no refleja en muchos casos la realidad. Se podría pensar que debido a la gran producción acumulada que tuvo esta arena en particular, mucho material de la formación hubiera salido a superficie o quedado en fondo, por lo tanto era de esperarse que este pozo presentara problemas en la cementación remedial, se tuvieron que hacer tres intentos para aislar la arena y al final de cada intento se sobré-desplazo con agua la lechada de cemento con el fin de limpiar la zona, lo cual no permitiría que el cemento crearía sostén para el trabajo posterior, en consecuencia se perdería cualquier posible soporte que se hubiera creado con el cemento depositado en la formación.

5.7. POZO B-16

B-16 es un pozo vertical el cual tiene instalado una tubería de revestimiento de 9 5/8", este se completó como pozo inyector en la formación Cretáceo. En Septiembre de 1994 inició la inyección de agua en las arenas de Cretáceo, la cual fue interrumpida por pequeños lapsos de producción con el fin de realizar trabajos de limpieza de arena en el pozo, la inyección acumulada aproximada de agua para este pozo hasta marzo de 2003, fue de 1'500,000 barriles de agua.

Debido a las respuestas de los pozos vecinos, la cual no fue positiva, se decidió aislar las arenas de la formación Carbonera Superior e inferior con un espesor de 17 pies, las cuales se determinó que afectaban a un pozo el cual no requería ningún soporte de presión. El pozo cuenta con una porosidad del 28% y una permeabilidad de 3,500 mD y un promedio de 1,500 mD para las arenas de Carbonera Superior e Inferior respectivamente.

- **Descripción Del Trabajo**

El trabajo consistía en tratar de aislar los intervalos (7,221'-7,224') y (7231'-7234', 7245'-7248', 7254'-7258' y 7274'-7278') del pozo B-16. Basados en la experiencia adquirida y teniendo en cuenta que este es un pozo inyector, se

sugirió utilizar espaciadores reactivos y una lechada de cemento de sacrificio antes de la lechada principal con baja pérdida de filtrado.

Para este trabajo se sentó el empaque retenedor a 7,170', es decir, 51' por encima del tope de los perforados. Se realizó la prueba de inyectividad (figura 18) la cual alcanzó una presión de 80 psi con una rata de 5 BPM y un volumen acumulado de 20 barriles. Como en pruebas de inyectividad de otros pozos, los cuales mostraron el mismo comportamiento de tomar fluido por gravedad y especialmente por ser un pozo inyector, se decidió bombear los espaciadores los cuales eran cloruro de calcio y meta-silicato de sodio con agua en el medio, entre 2 baches seguido por 30 barriles de lechada de sacrificio y 25 barriles de lechada de cemento con buen control de filtrado alcanzando una presión de forzamiento de 3,000 psi (figura 19). Se dejó dentro de la formación 11.5 barriles de lechada de sacrificio y 9 barriles dentro de los empaques. Se realizó prueba de integridad para verificar el aislamiento aplicando una presión de 1,600 psi durante 30 minutos y la presión cayó a 600 psi. Se decidió entonces utilizar el dispositivo de aislamiento mecánico "Scab Liner."

El trabajo de cementación remedial se realizó en un intento y no presentó ningún problema lo cual era de esperarse debido a que el pozo es inyector, tenía pocos días de haberse completado y al parecer no es un pozo arenoso. Sin embargo, es extraño que en la prueba de inyectividad el pozo tomara, por lo que se decidió utilizar lechada tixotrópica de densidad de 14.6 libras por galón.

Figura 18. Prueba de inyectividad del pozo B-16.

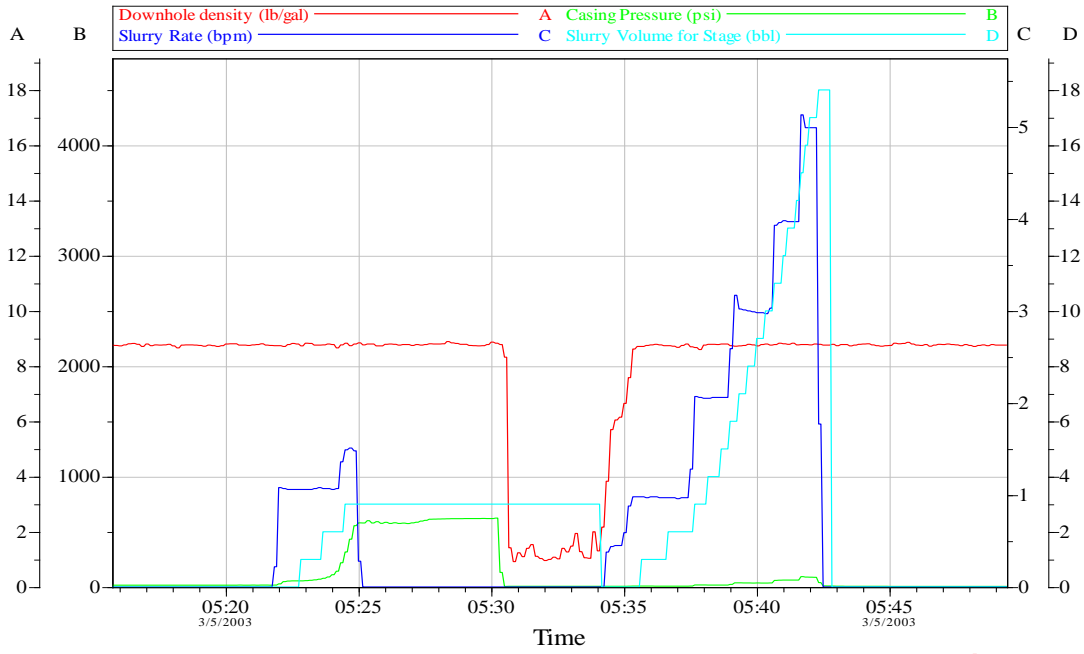
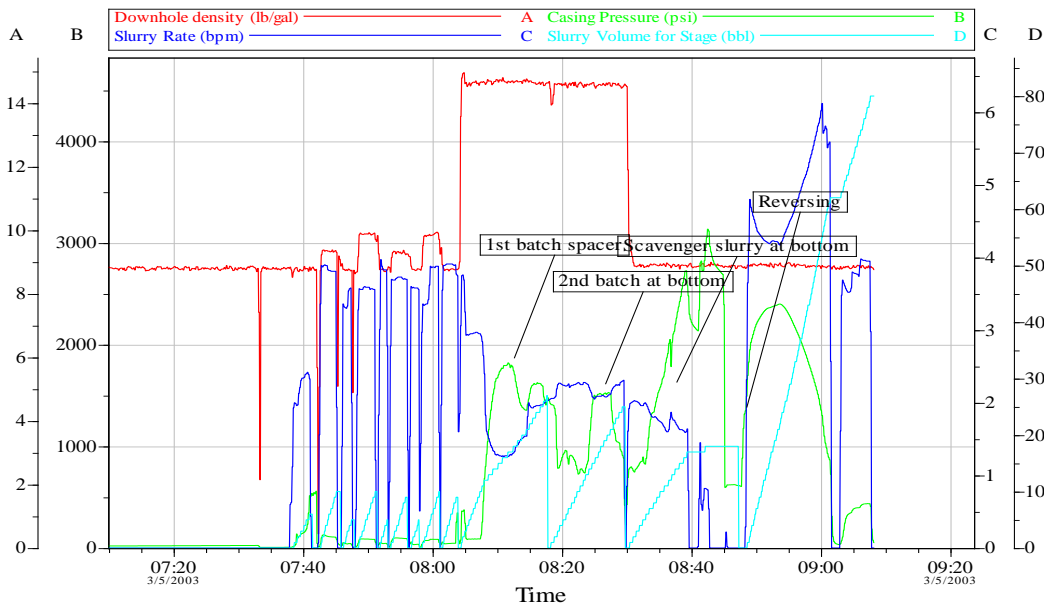


Figura 19. Trabajo de cementación remedial del pozo B-16.



Fuente: Halliburton

5.8. POZO C-16

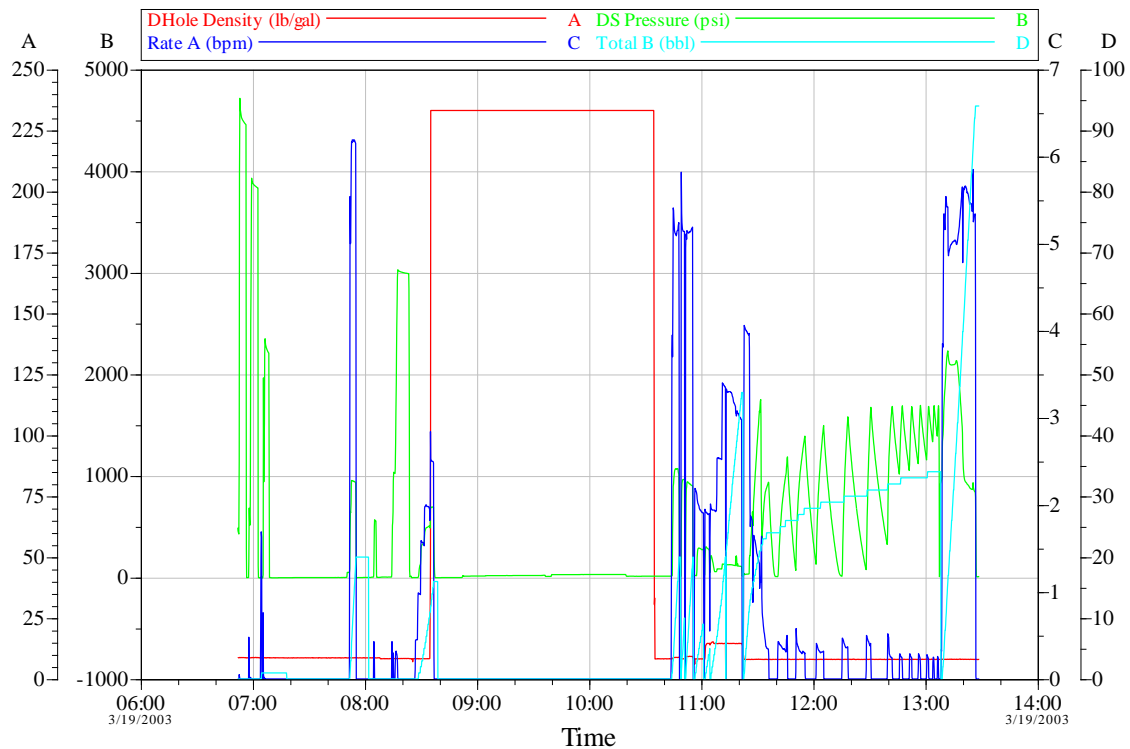
El pozo C-16, el cual estaba completado en las arenas de la formación Carbonera Inferior (7,531'-7,537', 7,543'-7,550'), es un pozo vertical con tubería de revestimiento de 9 5/8", contaba con 2,691 días de abiertas, los intervalos tienen una permeabilidad de 2,500 mD y una porosidad promedio de 25%, la producción acumulada para estas arenas es de aproximadamente 16'500.000 de barriles de fluido, con una tasa máxima de 10,000 BFPD y una producción de arena reportada de 4 ppm. C-16 presenta buen soporte de presión.

- **Descripción Del Trabajo**

El trabajo fue diseñado para aislar los intervalos mediante una cementación forzada con hesitación. El empaque retenedor y el empaque tapón se sentaron a 7,480' y 7,560' respectivamente. Se realizó la prueba de inyectividad con una rata promedio de 2 BPM, se alcanzó una presión de 680 psi inyectando a 2.5 BPM. Como resultado de la prueba se decidió bombear cloruro de calcio y silicato de sodio con un bache de agua en el medio con el fin de reducir la cantidad de fluido que toma el pozo. Se bombearon 5 barriles de lechada de cemento al pozo con una tasa de pérdidas de fluido media de 16c.c/30min para obtener una reacción rápida, seguido por 48 barriles de lechada de cemento tixotrópico con una tasa baja de pérdida de fluido. Ambas lechadas de una densidad de 14.6 ppg.

La operación comienza bombeando 20 barriles de cloruro de calcio, seguido por 10 barriles de agua, 20 barriles de silicato de sodio y 10 barriles de agua, luego se bombearon los 58 barriles de lechada, incluyendo 5 barriles de lechada de sacrificio, se desplazó inyectando agua obteniendo un incremento de presión después de haber desplazado 13 barriles. Se comienza la hesitación con 24 ½ barriles hasta 34 ½ de barriles durante una hora y media, obteniendo una presión de forzamiento de 1,700 psi. (Ver Figura 20).

Figura 20. Trabajo de cementación remedial del pozo C-16



Fuente: Halliburton

El trabajo que se realizó en C-16, según las características de la formación del pozo y los parámetros de producción, esperaba ser un aislamiento con problemas.

Una vez bombeado el cemento se esperó el tiempo de fragüe y posteriormente se realizó una prueba hidrostática la cual mostro buenos resultados.

Sin embargo, a pesar de que operacionalmente el trabajo de cementación remedial fue exitoso este falló posteriormente, teniéndosele que adaptar una herramienta de aislamiento mecánico (Scab Liner) para su aislamiento. Esto se pudo haber presentado debido a su alta permeabilidad y alta tasa de producción.

6. ANALISIS ESTADISTICO

Con el fin de realizar un modelo estadístico que permita predecir, con un cierto porcentaje de confianza, el éxito o fracaso de un trabajo de cementación remedial para aislamiento de zonas con cemento en el campo Caño Limón teniendo en cuenta diferentes parámetros, entre los cuales se encuentran las variables petrofísicas, características de producción, condiciones mecánicas de los pozos y datos de la operación como tal, se realizó una recopilación exhaustiva de todos los trabajos adelantados durante el periodo de 1990-2007, los cuales fueron consignados en una tabla a manera de resumen (ver tabla A1.1, Anexo A).

6.1. ANALISIS MEDIANTE ESTADISTICA DESCRIPTIVA

Una vez realizada esta recopilación, se procedió a analizar los parámetros o variables que más influyen sobre los trabajos de aislamiento de zonas productoras intermedias, es decir, identificar que variables son realmente predictoras o independientes de la variable respuesta o independiente (éxito o fracaso del trabajo de la operación). La clasificación del resultado de la operación o procedimiento fue discutida y valorada con ingenieros de Occidental y Halliburton, la cual es la empresa encargada de los trabajos de cementación remedial en dicha organización. Primero se realizó una clasificación en cuatro categorías, las cuales eran: éxito en un solo intento, éxito en varios intentos, fracaso y falla después de un tiempo, es decir, el trabajo no aisló la zona permanentemente. Sin embargo, debido a que se requería hacer un modelo estadístico, la cual necesita una gran cantidad de datos en cada categoría, situación que no se presentaba y además tener una variable respuesta con cuatro categorías, requería de un modelo mucho más complejo. Por lo tanto se decidió clasificar la operación como una variable dicotómica, es decir éxito o fracaso, donde fracaso incluye los trabajos que fallaron después de la operación

y éxito incluye los trabajos donde se tuvo que realizar varios intentos para aislar la zona.

Durante discusiones previas con el grupo de Ingenieros de la compañía se sugirió una hipótesis para explicar el fracaso en las operaciones de aislamiento de zonas intermedias a través de trabajos de cementación remedial, esta fue la creación de grandes cavernas en las zonas productoras debido a los grandes tasas de producción de fluido (agua y aceite), el largo tiempo que llevan produciendo, los grandes volúmenes de fluido producido, las alta permeabilidad y porosidad del campo, la poca consolidación de las formaciones productoras, las cuales en la mayoría de los casos genera altas producciones de arena que generarían las cavernas detrás de la tubería de revestimiento.

Por lo tanto, lo primero que se realizó fue la identificación de dichos parámetros o variables característicos del intervalo a aislar, los cuales se cree influyen en el éxito o fracaso de la operación, estos fueron:

- Días de completamiento de la zona a aislar
- Formación
- Unidad
- Espesor del intervalo a aislar
- Permeabilidad
- Porosidad
- Producción Acumulada de fluido
- Tasa de producción
- Arena producida

Así mismo, se tuvo en cuenta condiciones de la operación como tal:

- Éxito o Fracaso del trabajo
- Numero de intentos realizados en pozo. Un intento se define como la preparación y posterior bombeo de lechada de cemento dentro del pozo.
- Resultados de la prueba de injectividad
- Densidad de la lechada de cemento
- Volumen de lechada de cemento que quedo dentro de la formación

Para cada dato en específico se realizó un análisis de estadística descriptiva donde se categorizó según el resultado de la operación (éxito o fracaso), donde se muestran medidas de tendencia central, desviaciones, etc. A continuación se muestran los resultados (tabla 9), resaltando con amarillo el tercer cuartil y la media de algunos parámetros. El valor de 0 y 1 de la Tabla 9 corresponde a la clasificación del trabajo (fracaso y éxito respectivamente).

Tabla 9. Estadística descriptiva de los parámetros de estudio.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA	ESPESOR INTERVALO A AISLAR - 0	ESPESOR INTERVALO A AISLAR - 1	PERMEABILIDAD - 0	PERMEABILIDAD - 1	POROSIDAD - 0	POROSIDAD - 1
Núm. de valores utilizados	15	41	15	41	15	41
Núm. de valores ignorados	0	0	0	0	0	0
Núm. de val. mín.	1	2	1	1	2	1
Mínimo	3	4	2000	300	25	14
Primer cuartil	16,0	8,5	2900,0	1400,0	26,0	22,5
Mediana	18,0	13,0	3400,0	2000,0	28,0	24,0
Tercer cuartil	33,0	17,0	4000,0	3000,0	30,0	27,0
Máximo	73,0	35,0	5000,0	5000,0	31,0	30,0
Media	24,6	13,9	3420,0	2208,5	27,7	24,5
Media geométrica	20,0	12,0	3314,6	1884,3	27,6	24,2
CV (desviación típica/media)	0,7	0,6	0,3	0,5	0,1	0,1
Desviación típica de muestra	16,2	7,6	835,2	1147,0	1,9	3,6

Fuente: Autor, xIstat.

En la Tabla 9, nos permite ver que la media o promedio de los trabajos que fracasaron tuvieron un mayor espesor, permeabilidad y porosidad lo que nos permite dar una idea de la magnitud e impacto de los parámetros al momento de realizar el modelo estadístico.

Tabla 10. Continuación de la estadística descriptiva de los parámetros de estudio.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA	PROD ACUMULADA - 0	PROD ACUMULADA - 1	RATA DE PRODUCCION MAX - 0	RATA DE PRODUCCION MAX - 1	ARENA - 0	ARENA - 1
Núm. de valores utilizados	15,0	41,0	15,0	41,0	15	41
Núm. de valores ignorados	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
Núm. de val. min.	2,0	1,0	2,0	1,0	2	10
Mínimo	0,0	974,0	0,0	300,0	0,000	0,000
Primer cuartil	420.169,0	28.126,5	2.800,0	1.000,0	12,500	0,000
Mediana	10.187.971,0	375.627,0	10.000,0	2.500,0	500,000	40,000
Tercer cuartil	27.370.476,0	10.737.085,5	17.000,0	9.650,0	1500,000	100,000
Máximo	97.843.929,0	58.185.198,0	20.000,0	27.000,0	2000,000	1000,000
Media	18.439.338,4	6.806.224,4	10.020,0	5.987,1	753,125	159,094
Media geométrica		376.459,4		3.061,8		
CV (desviación típica/media)	1,4	1,9	0,7	1,1	1,118	1,888
Desviación típica de muestra	24.270.984,3	12.458.002,0	7.099,7	6.450,2	787,643	295,668

Fuente: Autor, xIstat.

Una vez más se puede observar en la Tabla 10 que a mayor producción acumulada, rata de producción y arena producida el trabajo de cementación remedial tiende a fallar. Así mismo, nos confirma la hipótesis de la creación de cavernas lo cual conlleva al requerimiento de realizar una reparación de la formación, según fue explicado en el capítulo 3.

Lo importante de realizar este análisis antes de empezar con el modelo, es que nos permite identificar como primera aproximación, los posibles rangos y condiciones en que un trabajo puede llegar a ser o no ser exitoso.

En la Tabla 11, se observa que la media en los trabajos éxitos la presión en la prueba de inyectividad fue mayor, parámetro que se tendrá muy en cuenta al momento de realizar el trabajo de aislamiento. Sin embargo, los otros parámetros (densidad del cemento y barriles de cemento dentro de la formación) muestran medidas inesperadas, no obstante como son características de la operación como tal y no se puede conocer sino hasta el momento de realizar la prueba de inyectividad, se decidió excluirlas del modelo de regresión lineal, incluyendo la presión de inyectividad, aunque es un parámetro muy útil en la decisión del tipo y volumen de cemento a utilizar, por lo

tanto es un dato muy importante que se tendrá en cuenta al momento de realizar la metodología a seguir en los trabajos de cementación remedial.

Tabla 11. Estadística descriptiva de las condiciones operacionales del trabajo de cementación remedial.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA	PRESION PRUEBA INYECTIVIDAD - 0	PRESION PRUEBA INYECTIVIDAD - 1	DENSIDAD CEMENTO - 0	DENSIDAD CEMENTO - 1	CEMENTO DENTRO FORMACION - 0	CEMENTO DENTRO FORMACION - 1
Núm. de valores utilizados	15	41	15	41	14	37
Núm. de valores ignorados	0	0	0	0	1	4
Núm. de val. min.	6	2	8	1	2	1
Mínimo	0,000	0,000	14,6	14,5	0,000	0,000
Primer cuartil	0,000	77,500	14,6	14,6	11,500	6,000
Mediana	87,000	178,000	14,6	14,8	27,500	18,200
Tercer cuartil	130,000	1300,000	15,9	15,8	34,500	30,000
Máximo	690,000	2500,000	16,0	16,0	50,000	53,000
Media	109,133	633,561	15,1	15,1	25,107	18,195
Media geométrica			15,1	15,0		
CV (desviación típica/media)	1,588	1,203	0,043	0,040	0,662	0,743
Desviación típica de muestra	167,420	753,041	0,629	0,602	16,020	13,335

Fuente: Autor, xIstat.

6.2. ANALISIS BIVARIANTE

Posteriormente, antes de entrar de lleno en la regresión logística, se realizó un análisis bivariante, esto es, analizar las relaciones de la variable dependiente con cada una de las variables independientes, modificadoras de efecto y confundentes, tomadas “una a una”. Como la variable independiente es categórica el contraste será a través de un Chi-cuadrado.

Cuando se trabaja con variables categóricas, los datos suelen organizarse en tablas de doble entrada en las que cada entrada representa un criterio de clasificación. Como resultado de esta clasificación, las frecuencias (el número o porcentaje de casos) aparecen organizadas en casillas que contienen información sobre la relación existente entre ambos criterios. A estas tablas de frecuencias se les llama tablas de contingencia.

6.2.1. Formación

La Tabla 12 ofrece las frecuencias que resultan de cruzar cada categoría de la variable operación (éxito ó fracaso) con la variable zona o formación.

Tabla 12. Operación*Zona. Tabla de contingencia

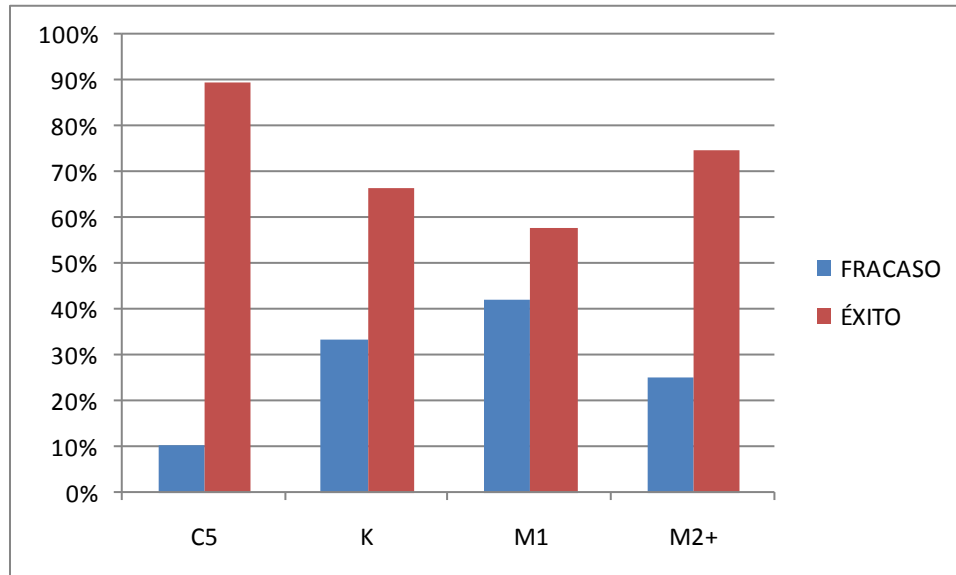
			ZONA				Total
			C5	K	M1	M2+	
OPERACION	FRACASO	Count	2	2	8	3	15
		% within OPERACION	13,3%	13,3%	53,3%	20,0%	100,0%
		% within ZONA	10,5%	33,3%	42,1%	25,0%	26,8%
	% of Total	3,6%	3,6%	14,3%	5,4%	26,8%	
EXITO		Count	17	4	11	9	41
		% within OPERACION	41,5%	9,8%	26,8%	22,0%	100,0%
		% within ZONA	89,5%	66,7%	57,9%	75,0%	73,2%
	% of Total	30,4%	7,1%	19,6%	16,1%	73,2%	
Total		Count	19	6	19	12	56
		% within OPERACION	33,9%	10,7%	33,9%	21,4%	100,0%
		% within ZONA	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	33,9%	10,7%	33,9%	21,4%	100,0%

Con la Tabla 12 se puede observar que el mayor problema se presenta en la formación de carbonera inferior para las arenas del M1, las cuales representan un poco más de la mitad de los trabajos no exitosos (53.3% han fallado), así mismo de 19 trabajos hechos en estas arenas 8 han fallado, por lo que se tiene una tasa de fracaso de 42.1%, haciendo esta arena la más crítica. Por otro lado, se puede percibir que las arenas del C5 son las menos complicadas, ya que se tiene una tasa de éxito en esta zona de 89.5% y un 41.5% del total de los trabajos exitosos corresponden a esta. De la figura 21 se puede determinar que la diferencia en la distribución éxito/fracaso en la arena M1 es muy poca, es decir, es la arena donde casi la mitad de los trabajos realizados en esta han fracasado, mientras que C5 es la arena en donde menos se han presentado problemas.

Sin embargo, el resultado de la prueba chi-cuadrado que se muestra en la Tabla 13 se puede concluir que las variables zona y operación son independientes debido a su alto nivel de significancia, es decir el 17,3% el cual sobre pasa la zona de rechazo que es de 5% y por lo tanto prueba la hipótesis de

independencia (la variable no explica el evento o suceso). Por lo tanto esta variable no será tomada en cuenta en el desarrollo del modelo, pero si será de gran importancia al momento de desarrollar la metodología.

Figura 21. Distribución de porcentaje éxito/fracaso por Zona.



Fuente: Autor, SPSS.

Tabla 13. Operación*Zona. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	4,986 ^a	3	,173
Likelihood Ratio	5,300	3	,151
N of Valid Cases	56		

a. 3 cells (37,5%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 1,61.

Fuente: Autor, SPSS.

6.2.2. Espesor

Con el objetivo de no tener una gran dispersión en los datos, se realizó previamente una discretización con el software Xlstat con el fin de obtener cuatro categorías, las cuales van a tener el mismo número de trabajos. Las categorías se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Discretización de la variable “espesor”. Fuente: SPSS v13.0

Clase	Límite inferior	Límite superior	Centro	Frecuencia	Frecuencia rel.	Prb. Densidad
1	3	10	7	14	0.250	0.036
2	10	14	12	14	0.250	0.063
3	14	21	18	14	0.250	0.036
4	21	73	47	14	0.250	0.005

Fuente: Autor, xlstat.

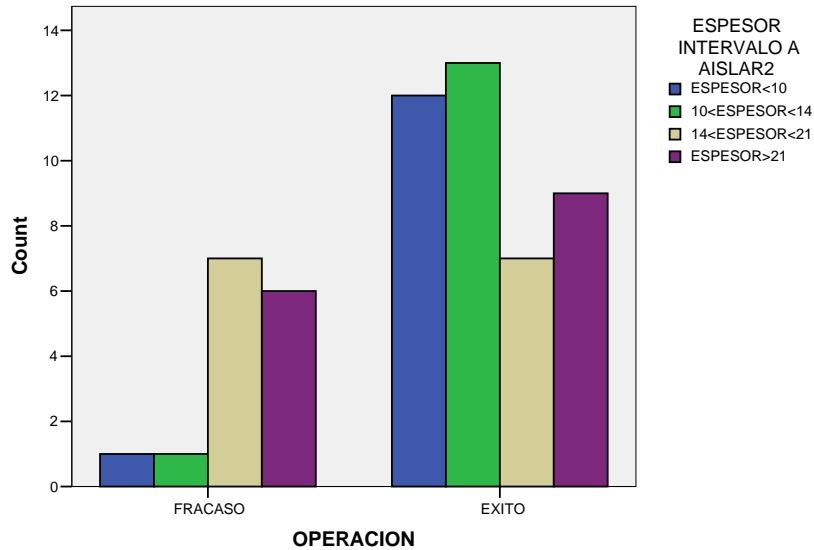
Tanto de la Tabla 15 como de la figura 22 se puede verificar que a mayor espesor del intervalo a aislar, mayor es la tasa de fracaso (86.7%), es decir de 15 trabajos que han fallado 13 han tenido espesores mayores a 14 pies. Mientras que la mayoría de trabajos exitosos (61%) han sido en zonas donde el espesor no supera los 14 pies de largo. Este dato es de gran utilidad y se tendrá en cuenta al momento de realizar la metodología a seguir en los trabajos de cementación remedial. En la tabla se puede observar un valor de significancia del 1.6%, valor que es más bajo del 5% asumido previamente, por lo tanto esto nos indica que este es un parámetro a usar en el modelo de regresión logística.

Tabla 15. Tabla de contingencia Espesor*Operación.

		ESPESOR INTERVALO A AISLAR2				Total	
		ESPESOR<10	10<ESPESOR<14	14<ESPESOR<21	ESPESOR>21		
OPERACION	FRACASO	Count	1	1	7	6	15
	% within OPERACION	6.7%	6.7%	46.7%	40.0%	100.0%	
	% within ESPESOR INTERVALO A AISLAR2	7.7%	7.1%	50.0%	40.0%	26.8%	
	% of Total	1.8%	1.8%	12.5%	10.7%	26.8%	
EXITO	Count	12	13	7	9	41	
	% within OPERACION	29.3%	31.7%	17.1%	22.0%	100.0%	
	% within ESPESOR INTERVALO A AISLAR2	92.3%	92.9%	50.0%	60.0%	73.2%	
	% of Total	21.4%	23.2%	12.5%	16.1%	73.2%	
Total	Count	13	14	14	15	56	
	% within OPERACION	23.2%	25.0%	25.0%	26.8%	100.0%	
	% within ESPESOR INTERVALO A AISLAR2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	% of Total	23.2%	25.0%	25.0%	26.8%	100.0%	

Fuente: Autor, SPSS v13.0

Figura 22. Distribución de frecuencias Operación*Espesor.



Fuente: Autor, SPSS.

Tabla 16. Operación*espesor. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	10,354 ^a	3	,016
Likelihood Ratio	11,231	3	,011
Linear-by-Linear Association	6,742	1	,009
N of Valid Cases	56		

a. 4 cells (50,0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 3,48.

Fuente: Autor, SPSS v13.0

6.2.3. Permeabilidad

Al igual que con el espesor este parámetro también se categorizó como muestra la Tabla 17, se crearon 4 categorías todas con el mismo número de trabajos.

Tabla 17. Discretización de la variable “permeabilidad”.

Clase	Límite inferior	Límite superior	Centro	Frecuencia	Frecuencia rel.	Prb. Densidad
1	300	1500	900	14	0.250	0.000
2	1500	2500	2000	14	0.250	0.000
3	2500	3400	2950	14	0.250	0.000
4	3400	5000	4200	14	0.250	0.000

La Tabla 18 y la figura 23 muestran también características muy importantes para identificar los rangos en que la permeabilidad muestra mayor tendencia a ser problema. Permeabilidades mayores a 2500 mD presentan un porcentaje en los trabajos que fallaron de 86.6%, es decir de 15 trabajos que no fueron exitosos, 13 presentaban permeabilidades mayores a 2,500 mD. Sin embargo, para los casos exitosos la situación es más equitativa y no se podría definir o establecer un tope de permeabilidad que garantice el éxito de la operación. Esto quiere decir que existen otros parámetros que ayudan a explicar el éxito o fracaso de la operación.

Tabla 18. Tabla de contingencia Permeabilidad * Operación.

			PERMEABILIDAD2				Total
			K<1500	1500<K<2500	2500<K<3400	K>3400	
OPERACION	FRACASO	Count	0	2	5	8	15
		% within OPERACION	,0%	13,3%	33,3%	53,3%	100,0%
		% within PERMEABILIDAD2	,0%	13,3%	31,3%	53,3%	26,8%
		% of Total	,0%	3,6%	8,9%	14,3%	26,8%
EXITO	EXITO	Count	10	13	11	7	41
		% within OPERACION	24,4%	31,7%	26,8%	17,1%	100,0%
		% within PERMEABILIDAD2	100,0%	86,7%	68,8%	46,7%	73,2%
		% of Total	17,9%	23,2%	19,6%	12,5%	73,2%
Total	Total	Count	10	15	16	15	56
		% within OPERACION	17,9%	26,8%	28,6%	26,8%	100,0%
		% within PERMEABILIDAD2	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	17,9%	26,8%	28,6%	26,8%	100,0%

Figura 23. Distribución de frecuencias Operación*Permeabilidad.

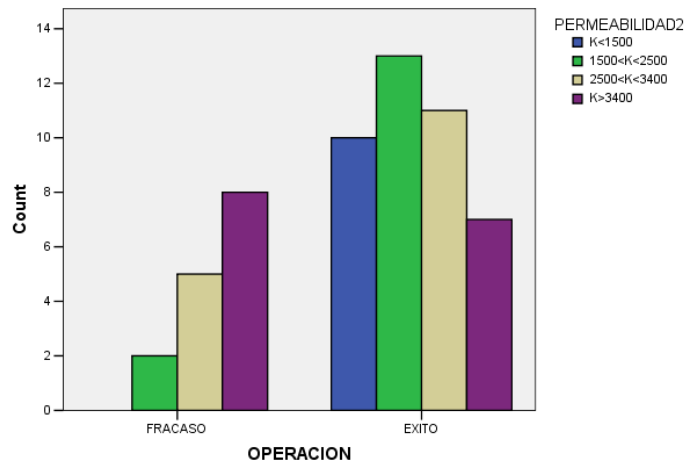


Tabla 19. Operación*Permeabilidad. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	10,596 ^a	3	,014
Likelihood Ratio	12,702	3	,005
Linear-by-Linear Association	10,277	1	,001
N of Valid Cases	56		

a. 4 cells (50,0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 2,68.

Como se puede observar en la Tabla 19, el valor de significancia es de 1.4%, es decir las dos variables son dependientes, por lo tanto este será otro parámetro a utilizar en el modelo estadístico.

6.2.4. Producción Acumulada

Debido al gran rango de este parámetro se dividió en 4 categorías con el fin de que quedaran el mismo número de trabajos en cada categoría, para esto se utilizó el software Xlstat y arrojó los resultados que muestran la Tabla 20

Tabla 20. Discretización de la variable “Producción acumulada”.

Clase	Límite inferior	Límite superior	Centro	Frecuencia	Frecuencia rel.	Prb. Densidad
1	0,000	30463,000	15231,500	14	0,250	0,000
2	30463,000	1715747,000	873105,000	14	0,250	0,000
3	1715747,000	13339313,000	7527530,000	14	0,250	0,000
4	13339313,000	97843929,000	55591621,000	14	0,250	0,000

Una vez realizada la categorización, se corrieron los datos en el software SPSS y arrojó los resultados que muestran las tablas 25, 26 y la figura 24. De la Tabla 21 y la figura 24 se puede observar que a partir de 13 millones de barriles de fluido producidos empiezan a aumentar los problemas en los trabajos de cementación remedial, ya que de 15 trabajos no exitosos 11 de ellos presentaron esta producción, lo cual confirma aún más la creación de cavernas en estos intervalos. Sin embargo, en los trabajos exitosos no se tiene una diferencia marcada la cual permita distinguir a partir de cuanto volumen producido el trabajo presente menos problemas, pero hay que aclarar que existen trabajos los cuales fueron realizados en varios intentos hasta alcanzar el aislamiento exitosamente los cuales fueron clasificados como exitosos para el desarrollo del modelo, ya que este exige tener una variable respuesta dicotómica, por lo tanto con este parámetro hay que ser cuidadoso, ya que es de vital importancia en el desarrollo del modelo.

Aunque la prueba chi-cuadrado arroje un valor alto como lo muestra la Tabla 22 (17 % en la significación observada), es decir que este parámetro “no influye” en la variable respuesta, hay que ser cuidadosos y de pronto hacer una excepción, debido a que por lo dicho anteriormente, hay muchos trabajos catalogados como exitosos pero que se realizaron en varios intentos y este parámetro al igual que la tasa de producción son claves al momento de realizar el trabajo de cementación remedial, aunque esto añadiría ruido al modelo. Sin embargo, al estar relacionada linealmente con la tasa de producción esta podría omitirse.

Tabla 21. Tabla de contingencia Producción acumulada * Operación.

			PROD ACUMULADA2				Total
			PROD.A CUM<30463	30463< PROD. ACUM<17 15747	1715747 <PROD. ACUM<13 339313	PROD. ACUM>13 339313	
OPERACION	FRACASO	Count	2	2	4	7	15
		% within OPERACION	13,3%	13,3%	26,7%	46,7%	100,0%
		% within PROD ACUMULADA2	15,4%	14,3%	28,6%	46,7%	26,8%
		% of Total	3,6%	3,6%	7,1%	12,5%	26,8%
EXITO	EXITO	Count	11	12	10	8	41
		% within OPERACION	26,8%	29,3%	24,4%	19,5%	100,0%
		% within PROD ACUMULADA2	84,6%	85,7%	71,4%	53,3%	73,2%
		% of Total	19,6%	21,4%	17,9%	14,3%	73,2%
Total	Total	Count	13	14	14	15	56
		% within OPERACION	23,2%	25,0%	25,0%	26,8%	100,0%
		% within PROD ACUMULADA2	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
		% of Total	23,2%	25,0%	25,0%	26,8%	100,0%

Figura 24. Distribución de frecuencias Operación*Producción acumulada.

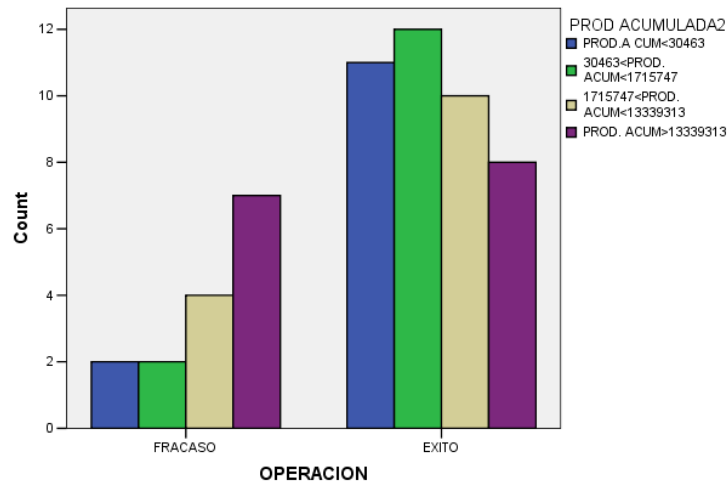


Tabla 22. Operación*Producción Acumulada. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	5,023 ^a	3	,170
Likelihood Ratio	4,960	3	,175
Linear-by-Linear Association	4,248	1	,039
N of Valid Cases	56		

a. 4 cells (50,0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 3,48.

6.2.5. Tasa de Producción

Con el fin de disminuir la varianza dentro de las categorías, se realizó una discretización óptima utilizando el software Xlstat, los rangos se muestran en la Tabla 23.

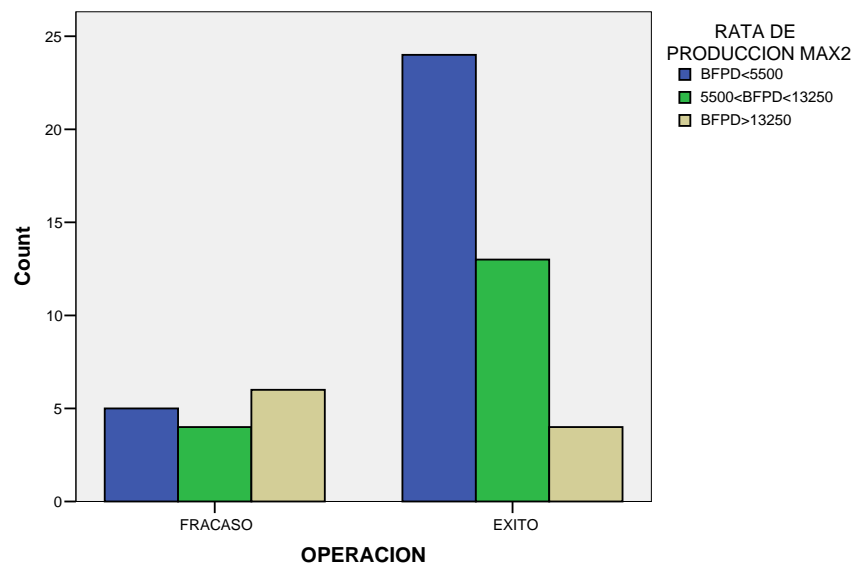
Tabla 23. Discretización de la variable “Tasa de Producción”.

Clase	Límite inferior	Límite superior	Centro	Frecuencia	Frecuencia rel.	Prb. Densidad
1	0.000	5500.000	2750.000	29	0.518	0.000
2	5500.000	13250.000	9375.000	17	0.304	0.000
3	13250.000	27000.000	20125.000	10	0.179	0.000

La Tabla 24 nos deja ver que el 40% de los trabajos no exitosos estuvieron por encima de los 13.250 BFPD, sin embargo, con la figura 25 se puede observar que no es un factor determinante debido a su poca diferencia con respecto a las otras categorías. Así mismo, el 90% de los trabajos exitosos presentaron una tasa menor a los 13.350 BFPD, este sí puede ser un indicativo importante en la identificación del rango en la cual un trabajo tenga mayor probabilidad de ser exitoso.

Tabla 24. Tabla de contingencia Tasa de Producción * Operación.

			RATA DE PRODUCCION MAX2			Total
			BFPD<5500	5500< BFPD<13250	BFPD>13250	
OPERACION	FRACASO	Count	5	4	6	15
		% within OPERACION	33.3%	26.7%	40.0%	100.0%
		% within RATA DE PRODUCCION MAX2	17.2%	23.5%	60.0%	26.8%
	% of Total	8.9%	7.1%	10.7%	26.8%	
	EXITO	Count	24	13	4	41
		% within OPERACION	58.5%	31.7%	9.8%	100.0%
% within RATA DE PRODUCCION MAX2		82.8%	76.5%	40.0%	73.2%	
% of Total	42.9%	23.2%	7.1%	73.2%		
Total	Count	29	17	10	56	
	% within OPERACION	51.8%	30.4%	17.9%	100.0%	
	% within RATA DE PRODUCCION MAX2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
	% of Total	51.8%	30.4%	17.9%	100.0%	

Figura 25. Distribución de frecuencias Operación*Tasa de Producción.


Los resultados de la prueba chi-cuadrado, mostrado en la Tabla 25, garantiza la dependencia de los dos parámetros dada su significación de 2.9% el cual está por debajo del valor de 5% (nivel alfa o de significación escogido). Por lo tanto este es un parámetro a usar en el modelo de regresión logística.

Tabla 25. Operación*Tasa De Producción. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	7.064 ^a	2	.029
Likelihood Ratio	6.412	2	.041
Linear-by-Linear Association	5.704	1	.017
N of Valid Cases	56		

a. 2 cells (33.3%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 2.68.

6.2.6. Arena

La producción de arena es un parámetro muy importante para confirmar la hipótesis de la creación de cavernas en el fondo del pozo que se originan debido a las altas tasas de producción de fluido y grandes volúmenes producidos, sin embargo en Caño Limón las medidas no se hacen frecuentemente y los datos que se obtienen son puntuales. Una lectura continua de este parámetro ayudaría a cuantificar el volumen de espacio vacío generado en la formación.

En la tabla 26, por lo mencionado anteriormente no se observa lo esperado, ya que la producción de arena en los trabajos fallidos no es alta, tan solo 2 trabajos presentan lecturas por encima de los 100 ppm, sin embargo, muchos trabajos exitosos que se realizaron en varios intentos, presentaron lecturas altas de arena, por lo tanto es una variable que hay que tener en cuenta en el desarrollo de la metodología mas no en el modelo estadístico ya que al introducirla generaría ruido en la respuesta.

Tabla 26. Tabla de contingencia Arena * Operación.

			ARENA		Total
			0	1	
OPERACION	FRACASO	Count	13	2	15
		% within OPERACION	86.7%	13.3%	100.0%
		% within ARENA	29.5%	16.7%	26.8%
		% of Total	23.2%	3.6%	26.8%
	EXITO	Count	31	10	41
		% within OPERACION	75.6%	24.4%	100.0%
		% within ARENA	70.5%	83.3%	73.2%
		% of Total	55.4%	17.9%	73.2%
Total		Count	44	12	56
		% within OPERACION	78.6%	21.4%	100.0%
		% within ARENA	100.0%	100.0%	100.0%
		% of Total	78.6%	21.4%	100.0%

Así mismo, como se puede observar en la tabla 27, la prueba chi-cuadrado arroja una significación del 37.2%, el cual según la hipótesis de independencia, si la probabilidad asociada al estadístico X^2 (37.2%) es mayor a 5%, esta será independiente y por lo tanto no se introducirá en el modelo de regresión logística.

Tabla 27. Operación*Arena. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)	Exact Sig. (2-sided)	Exact Sig. (1-sided)
Pearson Chi-Square	.797 ^b	1	.372		
Continuity Correction ^a	.276	1	.599		
Likelihood Ratio	.859	1	.354		
Fisher's Exact Test				.481	.310
Linear-by-Linear Association	.783	1	.376		
N of Valid Cases	56				

a. Computed only for a 2x2 table

b. 1 cells (25.0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 3.21.

6.2.7. Días de completamiento

Los días de completamiento, son los días en que el intervalo a aislar permaneció produciendo, ya sea agua, aceite o ambas. Esta variable también se categorizó como muestra la Tabla 28.

Tabla 28. Discretización de la variable “Días de completamiento”.

Clase	Límite inferior	Límite superior	Centro	Frecuencia	Frecuencia rel.	Prb. Densidad
1	15.000	1181.500	598.250	26	0.464	0.000
2	1181.500	3506.500	2344.000	19	0.339	0.000
3	3506.500	6131.000	4818.750	11	0.196	0.000

Con la Tabla 29 se puede observar que a partir de los 1181 días aproximadamente los trabajos de cementación remedial se complican, esto por el hecho de que su producción acumulada aumenta y con ella el espacio vacío en la formación. El 80% de los trabajos fallidos superaron los 1181 días de estar produciendo, mientras que el 56.1% de los trabajos exitosos se encuentran por debajo de este tope.

Tabla 29. Tabla de contingencia Días de Completamiento * Operación.

			DIAS_COMPLETAMIENTO			Total
			DIAS COMP<1181. 5	1181.5<DIAS COMP<3506. 5	DIAS COMP>3506. 5	
OPERACION	FRACASO	Count	3	6	6	15
		% within OPERACION	20.0%	40.0%	40.0%	100.0%
		% within DIAS_ COMPLETAMIENTO	11.5%	31.6%	54.5%	26.8%
		% of Total	5.4%	10.7%	10.7%	26.8%
EXITO	EXITO	Count	23	13	5	41
		% within OPERACION	56.1%	31.7%	12.2%	100.0%
		% within DIAS_ COMPLETAMIENTO	88.5%	68.4%	45.5%	73.2%
		% of Total	41.1%	23.2%	8.9%	73.2%
Total	Total	Count	26	19	11	56
		% within OPERACION	46.4%	33.9%	19.6%	100.0%
		% within DIAS_ COMPLETAMIENTO	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
		% of Total	46.4%	33.9%	19.6%	100.0%

Los resultados de la prueba chi-cuadrado mostrados en la Tabla 30 permite demostrar la dependencia con la variable respuesta. Por lo tanto este parámetro estará incluido en el modelo estadístico.

Tabla 30. Operación*Días De Completamiento. Prueba Chi-Cuadrado.

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	7.627 ^a	2	.022
Likelihood Ratio	7.631	2	.022
Linear-by-Linear Association	7.478	1	.006
N of Valid Cases	56		

a. 1 cells (16.7%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 2.95.

6.2.8. Porosidad

La porosidad está muy ligada a la permeabilidad, presentan una tendencia lineal donde a mayor permeabilidad mayor porosidad, por lo tanto el análisis de la porosidad es similar a lo que se mostró en el punto 6.2.3 (permeabilidad). Por lo mismo no se extenderá en este punto.

6.3. EVALUACIÓN DE POSIBLES INTERACCIONES

Con el fin de realizar un análisis más completo y detallado, se realizó una evaluación de posibles interacciones con algunos de los parámetros analizados anteriormente, es decir se efectuó un análisis estratificado utilizando el número de intentos por trabajo.

6.3.1. Zona

La Tabla 31 nos deja ver claramente que la arena donde se han presentado el mayor número de problemas es en el M1, esta muestra lo siguiente:

- El 50% de los trabajos no exitosos realizando un solo intento se presentó en esta zona.
- 7 trabajos exitosos de los 13 que se realizaron en más de un intento se realizaron en el M1.
- 4 trabajos no exitosos de los 7 que se realizaron en más de un intento se realizaron en el M1.

Así mismo, nos muestra el C5 como la formación con menos problemas, donde tan solo 2 trabajos exitosos requirieron más de un intento.

Tabla 31. Operación*Zona*Numero De Intentos. Tabla De Contingencia.

INTENTOS				ZONA				Total
				C5	K	M1	M2+	
1	OPERACION	FRACASO	Count	2	1	4	1	8
			% within OPERACION	25,0%	12,5%	50,0%	12,5%	100,0%
			% of Total	5,4%	2,7%	10,8%	2,7%	21,6%
	EXITO	Count	15	2	5	7	29	
		% within OPERACION	51,7%	6,9%	17,2%	24,1%	100,0%	
		% of Total	40,5%	5,4%	13,5%	18,9%	78,4%	
	Total	Count	17	3	9	8	37	
		% within OPERACION	45,9%	8,1%	24,3%	21,6%	100,0%	
		% of Total	45,9%	8,1%	24,3%	21,6%	100,0%	
2	OPERACION	FRACASO	Count	0	1	3	0	4
			% within OPERACION	,0%	25,0%	75,0%	,0%	100,0%
			% of Total	,0%	10,0%	30,0%	,0%	40,0%
	EXITO	Count	1	0	3	2	6	
		% within OPERACION	16,7%	,0%	50,0%	33,3%	100,0%	
		% of Total	10,0%	,0%	30,0%	20,0%	60,0%	
	Total	Count	1	1	6	2	10	
		% within OPERACION	10,0%	10,0%	60,0%	20,0%	100,0%	
		% of Total	10,0%	10,0%	60,0%	20,0%	100,0%	
3	OPERACION	FRACASO	Count	0	0	0	1	1
			% within OPERACION	,0%	,0%	,0%	100,0%	100,0%
			% of Total	,0%	,0%	,0%	16,7%	16,7%
	EXITO	Count	1	1	3	0	5	
		% within OPERACION	20,0%	20,0%	60,0%	,0%	100,0%	
		% of Total	16,7%	16,7%	50,0%	,0%	83,3%	
	Total	Count	1	1	3	1	6	
		% within OPERACION	16,7%	16,7%	50,0%	16,7%	100,0%	
		% of Total	16,7%	16,7%	50,0%	16,7%	100,0%	
4	OPERACION	FRACASO	Count		0		1	1
			% within OPERACION		,0%		100,0%	100,0%
			% of Total		,0%		50,0%	50,0%
	EXITO	Count		1		0	1	
		% within OPERACION		100,0%		,0%	100,0%	
		% of Total		50,0%		,0%	50,0%	
	Total	Count		1		1	2	
		% within OPERACION		50,0%		50,0%	100,0%	
		% of Total		50,0%		50,0%	100,0%	
5	OPERACION	FRACASO	Count			1	1	
			% within OPERACION			100,0%	100,0%	
			% of Total			100,0%	100,0%	
	Total	Count			1	1		
		% within OPERACION			100,0%	100,0%		
		% of Total			100,0%	100,0%		

6.3.2. Permeabilidad

Este análisis nos deja ver, como se muestra en la Tabla 32, que en permeabilidades “bajas” ($K < 1,500mD$) fueron pocos los trabajos que requirieron

más de un intento para aislar la zona. Mientras que en permeabilidades mayores a 2,500 mD se realizaron 12 trabajos los cuales 6 fueron exitosos y los otros 6 fallaron.

Tabla 32. Operación*Permeabilidad*Numero de Intentos. Tabla de Contingencia.

INTENTOS				PERMEABILIDAD2				Total
				K<1500	1500<K<2500	2500<K<3400	K>3400	
1	OPERACION	FRACASO	Count	0	1	3	4	8
			% within OPERACION	,0%	12,5%	37,5%	50,0%	100,0%
			% of Total	,0%	2,7%	8,1%	10,8%	21,6%
		EXITO	Count	7	10	10	2	29
			% within OPERACION	24,1%	34,5%	34,5%	6,9%	100,0%
			% of Total	18,9%	27,0%	27,0%	5,4%	78,4%
	Total	Count	7	11	13	6	37	
		% within OPERACION	18,9%	29,7%	35,1%	16,2%	100,0%	
% of Total		18,9%	29,7%	35,1%	16,2%	100,0%		
2	OPERACION	FRACASO	Count	0	1	1	2	4
			% within OPERACION	,0%	25,0%	25,0%	50,0%	100,0%
			% of Total	,0%	10,0%	10,0%	20,0%	40,0%
		EXITO	Count	3	1	1	1	6
			% within OPERACION	50,0%	16,7%	16,7%	16,7%	100,0%
			% of Total	30,0%	10,0%	10,0%	10,0%	60,0%
	Total	Count	3	2	2	3	10	
		% within OPERACION	30,0%	20,0%	20,0%	30,0%	100,0%	
% of Total		30,0%	20,0%	20,0%	30,0%	100,0%		
3	OPERACION	FRACASO	Count		0		1	1
			% within OPERACION		,0%		100,0%	100,0%
			% of Total		,0%		16,7%	16,7%
		EXITO	Count		2		3	5
			% within OPERACION		40,0%		60,0%	100,0%
			% of Total		33,3%		50,0%	83,3%
	Total	Count		2		4	6	
		% within OPERACION		33,3%		66,7%	100,0%	
% of Total			33,3%		66,7%	100,0%		
4	OPERACION	FRACASO	Count				1	1
			% within OPERACION				100,0%	100,0%
			% of Total				50,0%	50,0%
		EXITO	Count				1	1
			% within OPERACION				100,0%	100,0%
			% of Total				50,0%	50,0%
	Total	Count				2	2	
		% within OPERACION				100,0%	100,0%	
% of Total					100,0%	100,0%		
5	OPERACION	FRACASO	Count			1	1	
			% within OPERACION			100,0%	100,0%	
			% of Total			100,0%	100,0%	
	Total	Count			1	1		
		% within OPERACION			100,0%	100,0%		
% of Total			100,0%	100,0%				

6.3.3. Producción Acumulada

En el análisis bivalente se pudo observar que la mayoría de los trabajos que fallaron presentaban altas producciones, sin embargo, existían varios trabajos

exitosos con grandes volúmenes producidos el cual no se podía realizar un análisis adecuado ya que no se sabía si se había realizado en uno o varios intentos. La Tabla 33 nos muestra que de los 8 trabajos exitosos, 6 se realizaron en más de un intento, lo cual nos confirma que en grandes volúmenes producidos mayor será la probabilidad de que el trabajo presente problemas.

Tabla 33. Operación*Prod. Acumulada*Numero de Intentos. Tabla de Contingencia.

INTENTOS				PROD ACUMULADA2				Total
				PROD.A CUM<30463	30463< PROD. ACUM<17 15747	1715747 <PROD. ACUM<13 339313	PROD. ACUM>13 339313	
1	OPERACION	FRACASO	Count	2	1	2	3	8
			% within OPERACION	25,0%	12,5%	25,0%	37,5%	100,0%
			% of Total	5,4%	2,7%	5,4%	8,1%	21,6%
	EXITO	Count	10	11	6	2	29	
		% within OPERACION	34,5%	37,9%	20,7%	6,9%	100,0%	
		% of Total	27,0%	29,7%	16,2%	5,4%	78,4%	
Total			Count	12	12	8	5	37
			% within OPERACION	32,4%	32,4%	21,6%	13,5%	100,0%
			% of Total	32,4%	32,4%	21,6%	13,5%	100,0%
2	OPERACION	FRACASO	Count	0	1	1	2	4
			% within OPERACION	,0%	25,0%	25,0%	50,0%	100,0%
			% of Total	,0%	10,0%	10,0%	20,0%	40,0%
	EXITO	Count	1	0	3	2	6	
		% within OPERACION	16,7%	,0%	50,0%	33,3%	100,0%	
		% of Total	10,0%	,0%	30,0%	20,0%	60,0%	
Total			Count	1	1	4	4	10
			% within OPERACION	10,0%	10,0%	40,0%	40,0%	100,0%
			% of Total	10,0%	10,0%	40,0%	40,0%	100,0%
3	OPERACION	FRACASO	Count		0	1	0	1
			% within OPERACION		,0%	100,0%	,0%	100,0%
			% of Total		,0%	16,7%	,0%	16,7%
	EXITO	Count	1	1	3	5		
		% within OPERACION		20,0%	20,0%	60,0%	100,0%	
		% of Total	16,7%	16,7%	50,0%	83,3%		
Total			Count	1	2	3	6	
			% within OPERACION	16,7%	33,3%	50,0%	100,0%	
			% of Total	16,7%	33,3%	50,0%	100,0%	
4	OPERACION	FRACASO	Count				1	1
			% within OPERACION				100,0%	100,0%
			% of Total				50,0%	50,0%
	EXITO	Count				1	1	
		% within OPERACION				100,0%	100,0%	
		% of Total				50,0%	50,0%	
Total			Count			2	2	
			% within OPERACION			100,0%	100,0%	
			% of Total			100,0%	100,0%	
5	OPERACION	FRACASO	Count				1	1
			% within OPERACION				100,0%	100,0%
			% of Total				100,0%	100,0%
	Total			Count			1	1
			% within OPERACION			100,0%	100,0%	
			% of Total			100,0%	100,0%	

6.3.4. Tasa De Producción

En el análisis bivariante, este parámetro presentó el mismo problema que la producción acumulada, ya que a altas tasas el gráfico de frecuencia no mostraba una tendencia de éxito o fracaso, esto debido a que varios trabajos fueron exitosos pero en varios intentos. En la Tabla 34 se puede observar que los 5 trabajos exitosos con tasas mayores a los 13,250 BFPD se realizaron en más de un intento, lo cual nos confirma que entre mayor sea la tasa de producción más problemática será la realización de este tipo de trabajos.

Tabla 34. Operación*Tasa de producción*Núm. de intentos. Tabla de contingencia.

INTENTOS				RATA DE PRODUCCION MAX2			Total
				BFPD<5500	5500< BFPD<13250	BFPD>13250	
1	OPERACION	FRACASO	Count	4	3	1	8
			% within OPERACION	50,0%	37,5%	12,5%	100,0%
			% of Total	10,8%	8,1%	2,7%	21,6%
	EXITO		Count	21	8	0	29
			% within OPERACION	72,4%	27,6%	,0%	100,0%
			% of Total	56,8%	21,6%	,0%	78,4%
	Total		Count	25	11	1	37
			% within OPERACION	67,6%	29,7%	2,7%	100,0%
			% of Total	67,6%	29,7%	2,7%	100,0%
2	OPERACION	FRACASO	Count	1	0	3	4
			% within OPERACION	25,0%	,0%	75,0%	100,0%
			% of Total	10,0%	,0%	30,0%	40,0%
	EXITO		Count	1	4	1	6
			% within OPERACION	16,7%	66,7%	16,7%	100,0%
			% of Total	10,0%	40,0%	10,0%	60,0%
	Total		Count	2	4	4	10
			% within OPERACION	20,0%	40,0%	40,0%	100,0%
			% of Total	20,0%	40,0%	40,0%	100,0%
3	OPERACION	FRACASO	Count	0	1	0	1
			% within OPERACION	,0%	100,0%	,0%	100,0%
			% of Total	,0%	16,7%	,0%	16,7%
	EXITO		Count	2	0	3	5
			% within OPERACION	40,0%	,0%	60,0%	100,0%
			% of Total	33,3%	,0%	50,0%	83,3%
	Total		Count	2	1	3	6
			% within OPERACION	33,3%	16,7%	50,0%	100,0%
			% of Total	33,3%	16,7%	50,0%	100,0%

4	OPERACION	FRACASO	Count		0	1	1
			% within OPERACION		,0%	100,0%	100,0%
			% of Total		,0%	50,0%	50,0%
	EXITO	Count		1	0	1	
		% within OPERACION		100,0%	,0%	100,0%	
		% of Total		50,0%	,0%	50,0%	
Total	Count		1	1	2		
	% within OPERACION		50,0%	50,0%	100,0%		
	% of Total		50,0%	50,0%	100,0%		
5	OPERACION	FRACASO	Count			1	1
			% within OPERACION			100,0%	100,0%
			% of Total			100,0%	100,0%
	Total	Count			1	1	
		% within OPERACION			100,0%	100,0%	
		% of Total			100,0%	100,0%	

Fuente: Autor, SPSS.

6.4. REGRESIÓN LOGÍSTICA

La regresión logística consiste en obtener una estimación no sesgada o ajustada de la relación entre la variable dependiente (o resultado) y una variable independiente que es la que el investigador quiere conocer, sobre la que el investigador desea averiguar su papel. Así mismo ayuda a evaluar varios factores simultáneamente que esté presumiblemente relacionado de alguna manera (o no) con la variable dependiente, y conocer su papel (predictor, confundente, modificador de efecto) y su efecto de forma ajustada. Esto con el fin de construir una ecuación que permitirá conocer previamente las posibilidades de éxito de un trabajo de cementación remedial dadas ciertas condiciones petrofísicas de la formación, condiciones del pozo y parámetros de producción con cierta validez y precisión.

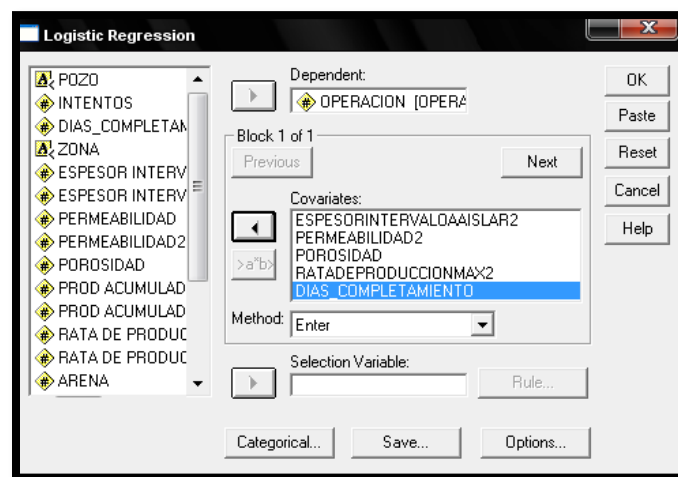
Para realizar la regresión logística se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 13.0. Este software nos permite realizar varios procedimientos para efectuar la regresión. El procedimiento que se realizó fue el llamado “Enter”, el cual permite llevar el control de las variables que queremos incluir en el modelo, que son la variables que mostraron significación estadística en su asociación univariante con la variable resultado Éxito.

En cuanto al número de variables seleccionadas existen límites que vienen impuestos fundamentalmente por el tamaño muestral y por la existencia de un mínimo de valores en las categorías a riesgo de cada covariable introducida.

Así, en lo que respecta a la primera restricción, hay una regla que aconseja “no seleccionar más que una variable por cada diez individuos estudiados con el desenlace que se quiere modelizar” (en nuestro ejemplo, sólo hay 56 trabajos de cementación remedial, por lo que parece razonable no incluir en el modelo final más de seis variables independientes).

Las variables que tuvieron significación estadística fueron: Espesor, Permeabilidad, Porosidad, Tasa de Producción, Días de Completado. Estas se introducen al paquete estadístico como covariables (covariantes en inglés) y la variable respuesta (éxito o fracaso) se introduce como la variable dependiente del modelo (ver figura 6.8).

Figura 26. Ventana de SPSS del paquete de regresión logística.

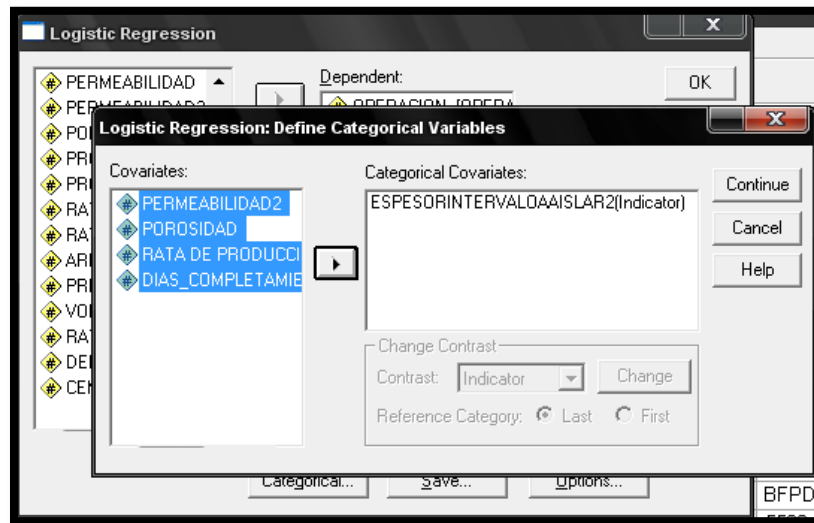


Fuente: Autor – SPSS.

Una vez hecho la selección de las variables, se marcan las que son categóricas que para este estudio lo son todas, ya que se crearon categorías con los rangos

para crear clases optimas las cuales reducen la varianza de la muestra y por lo tanto el error (Ver figura 27).

Figura 27. Selección de las variables categóricas para el modelo de regresión logística.



Fuente: Autor – SPSS.

La primera tabla que nos arroja SPSS (tabla 35) es un cuadro resumen con el número de casos (N) introducidos, los seleccionados para el análisis y los excluidos (casos perdidos, por tener algún valor faltante).

Tabla 35. Resumen del procesamiento de los casos.

Unweighted Cases ^a		N	Percent
Selected Cases	Included in Analysis	56	100.0
	Missing Cases	0	.0
	Total	56	100.0
Unselected Cases		0	.0
Total		56	100.0

Fuente: Autor, SPSS.

Inmediatamente aparece la Tabla 36, que especifica la codificación de la variable dependiente (que debe ser dicotómica). Internamente el programa asigna el valor 0 al menor de los dos códigos, y el valor 1 al mayor.

Tabla 36. Codificación de la variable dependiente.

Original Value	Internal Value
FRACASO	0
EXITO	1

En este caso coincide con la codificación empleada en la base de datos. Es importante que el valor 1 identifique a la categoría de la variable dependiente que resulte ser el resultado evaluado (en nuestro caso “éxito”), ya que ello permite comprender mejor el coeficiente b_i de las variables independientes y de control: un coeficiente de regresión positivo indicará que la probabilidad de que el trabajo sea exitoso (valor interno 1) se incrementa con la exposición X .

En la salida de SPSS de la Regresión logística binaria no condicional comprobamos que el programa ha identificado correctamente las categorías expuestas (1) y las de referencia (0) al introducir las variables categóricas en el modelo (tabla 37). Como existen categorías con más de dos estratificaciones, es decir, policotómica, SPSS internamente genera variables tipo “dummy” (codifica las variables con una matriz de ceros y unos).

6.4.1. Bloque Inicial

En este bloque inicial se calcula la verosimilitud de un modelo que sólo tiene el término constante (a ó b_0). Puesto que la verosimilitud L es un número muy pequeño (comprendido entre 0 y 1), se suele ofrecer el logaritmo neperiano de la verosimilitud (LL), que es un número negativo, o el menos dos veces el logaritmo neperiano de la verosimilitud ($-2LL$), que es un número positivo (ver tabla 37).

Tabla 37. Salida de SPSS de la regresión logística binaria. Código de las categorías de las variables.

		Frequency	Parameter coding		
			(1)	(2)	(3)
PERMEABILIDAD2	K<1500	10	1.000	.000	.000
	1500<K<2500	15	.000	1.000	.000
	2500<K<3400	16	.000	.000	1.000
	K>3400	15	.000	.000	.000
ESPESOR INTERVALO A AISLAR2	ESPESOR<10	13	1.000	.000	.000
	10<ESPESOR<14	14	.000	1.000	.000
	14<ESPESOR<21	14	.000	.000	1.000
	ESPESOR>21	15	.000	.000	.000
PROD ACUMULADA2	PROD.A CUM<30463	13	1.000	.000	.000
	30463<PROD. ACUM<1715747	14	.000	1.000	.000
	1715747<PROD. ACUM<13339313	14	.000	.000	1.000
	PROD. ACUM>13339313	15	.000	.000	.000
	DIAS_ COMPLETAMIENTO	DIAS COMP<1181.5	26	1.000	.000
RATA DE PRODUCCION MAX2	1181.5<DIAS COMP<3506.5	19	.000	1.000	
	DIAS COMP>3506.5	11	.000	.000	
	BFPD<5500	29	1.000	.000	
POROSIDAD	5500<BFPD<13250	17	.000	1.000	
	BFPD>13250	10	.000	.000	
	POR<25%	30	1.000		
	POR>25%	26	.000		

Iteration	-2 Log likelihood	Coefficients	
		Constant	
Step 1	65,151	,929	
0 2	65,085	1,004	
3	65,085	1,006	
4	65,085	1,006	

a. Constant is included in the model.

b. Initial -2 Log Likelihood: 65,085

c. Estimation terminated at iteration number 4 because parameter estimates changed by less than ,001.

Fuente: Autor, SPSS.

El estadístico -2LL mide hasta qué punto un modelo se ajusta bien a los datos. El resultado de esta medición recibe también el nombre de "desviación". Cuanto más pequeño sea el valor, mejor será el ajuste. En este primer paso sólo se ha introducido el término constante en el modelo. Como habíamos solicitado en Opciones el historial de iteraciones, la salida del computador nos muestra un resumen del proceso iterativo de estimación del primer parámetro (b_0). El proceso ha necesitado cuatro ciclos para estimar correctamente el término

constante, porque la variación de -2LL entre el segundo y tercer bucle ha cambiado en menos del criterio fijado por el programa (0,001). También nos muestra el valor del parámetro calculado ($b_0 = -0.644$).

En la tabla 38, que es muy parecida a la empleada para valorar una prueba diagnóstica, es la que permite evaluar el ajuste del modelo de regresión, comparando los valores predichos con los valores observados. Por defecto se ha empleado un punto de corte de la probabilidad de Y para clasificar a los individuos de 0,5: esto significa que aquellos sujetos para los que la ecuación calcula una probabilidad $< 0,5$ se clasifican como ESTADO=0 (fracaso), mientras que si la probabilidad resultante $> 0,5$ se clasifican como ESTADO=1 (éxito). En este primer paso el modelo ha clasificado correctamente a un 73.2% de los casos, y ninguna operación “fracaso” ha sido clasificada correctamente.

Tabla 38. Tabla de clasificación.

Observed		Predicted		
		OPERACION		Percentage Correct
OPERACION	FRACASO	EXITO		
Step 0	FRACASO	0	15	.0
	EXITO	0	41	100.0
Overall Percentage				73.2

a. Constant is included in the model.

b. The cut value is .500

Fuente: Autor, SPSS.

Finalmente se presenta (Tabla 39) el parámetro estimado (B), su error estándar (S.E.) y su significación estadística con la prueba de Wald, que es un estadístico que sigue una ley Chi cuadrado con 1 grado de libertad y la estimación de la OR (Exp(B)). En la ecuación de regresión sólo aparece, en este primer bloque, la constante, habiendo quedado fuera las demás variables.

Tabla 39. Variables en la ecuación.

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 0 Constant	1,006	,302	11,104	1	,001	2,733

Fuente: Autor, SPSS.

Como el método utilizado fue el de “enter” o introducir variables, el programa incluye automáticamente las demás variables que aportarán información al modelo.

6.4.2. Bloque 1: Método “Enter” ó Introducir

En la tabla que se muestra en el anexo B se muestra el proceso de iteración, que ahora se realiza para quince coeficientes, la constante (ya incluida en el anterior paso) y las demás variables. Vemos como disminuye el -2LL respecto al paso anterior (el modelo sólo con la constante tenía un valor de este estadístico de 65.085, mientras que ahora se reduce a 32.811), y el proceso termina con cuarenta y un bucles.

Seguidamente se aportan tres medidas resumen de los modelos (Tabla 40), para evaluar de forma global su validez: la primera es el valor del -2LL y las otras dos son Coeficientes de Determinación (R^2), parecidos al que se obtiene en Regresión Lineal, que expresan la proporción (en tanto por uno) de la variación explicada por el modelo. Un modelo perfecto tendría un valor de -2LL muy pequeño (idealmente cero) y un R^2 cercano a uno (idealmente uno).

Tabla 40. Resumen del modelo.

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	32,811 ^a	,438	,637

a. Estimation terminated at iteration number 41 because parameter estimates changed by less than ,001.

Fuente: Autor, SPSS.

- -2 log de la verosimilitud (-2 Log likelihood) mide hasta qué punto un modelo se ajusta bien a los datos. El resultado de esta medición recibe también el nombre de "desviación". Cuanto más pequeño sea el valor, mejor será el ajuste.
- La R cuadrado de Cox y Snell es un coeficiente de determinación generalizado que se utiliza para estimar la proporción de varianza de la variable dependiente explicada por las variables predictoras (independientes). Sus valores oscilan entre 0 y 1. En nuestro caso es un valor considerable (0,438) que indica que el 43.8% de la variación de la variable dependiente es explicada por las variables incluidas en el modelo.
- La R cuadrado de Nagelkerke es una versión corregida de la R cuadrado de Cox y Snell. La R cuadrado de Cox y Snell tiene un valor máximo inferior a 1, incluso para un modelo "perfecto". La R cuadrado de Nagelkerke corrige la escala del estadístico para cubrir el rango completo de 0 a 1.

Esta es otra prueba para evaluar la bondad del ajuste de un modelo de regresión logística. Parte de la idea de que si el ajuste es bueno, un valor alto de la probabilidad predicha (p) se asociará con el resultado 1 de la variable binomial dependiente, mientras que un valor bajo de p (próximo a cero) corresponderá - en la mayoría de las ocasiones- con el resultado $Y=0$. Se trata de calcular, para cada observación del conjunto de datos, las probabilidades de la variable dependiente que predice el modelo, ordenarlas, agruparlas y calcular, a partir de ellas, las frecuencias esperadas, y compararlas con las observadas mediante una prueba X^2 .

Sobre este razonamiento, una forma de evaluar la ecuación de regresión y el modelo obtenido es construir una tabla 2×2 clasificando a todos los individuos de la muestra según la concordancia de los valores observados con los predichos o estimados por el modelo, de forma similar a como se evalúan las pruebas diagnósticas. Una ecuación sin poder de clasificación alguno tendría una

especificidad, sensibilidad y total de clasificación correctas igual al 50% (por el simple azar). Un modelo puede considerarse aceptable si tanto la especificidad como la sensibilidad tienen un nivel alto, de al menos el 75%.

Tabla 41. Tabla de clasificación del modelo.

Observed			Predicted		
			OPERACION		Percentage Correct
			FRACASO	EXITO	
Step 1	OPERACION	FRACASO	11	4	73,3
		EXITO	4	37	90,2
Overall Percentage					85,7

a. The cut value is ,500

Fuente: Autor, SPSS.

Con nuestro modelo se obtiene la Tabla 41. En la tabla de clasificación podemos comprobar que nuestro modelo tiene una especificidad considerable (73.3%) y una sensibilidad alta (90.2%). El resultado es muy bueno, la Tabla 41 muestra que de 15 operaciones que fallaron clasifica bien 11, mientras de de las 41 operaciones exitosas clasifica bien 37. Sin embargo, la especificidad no es mayor a 75%.

El resultado de la regresión logística se muestra en la Tabla 42. En esta tabla se puede observar las variables incluidas en la regresión, las cuales van acompañadas de un número, este indica la codificación del parámetro que se mostró en la Tabla 36. Las variables que aparecen sin este número no tienen ningún valor en el coeficiente (B) de la ecuación ya que esta vendrá multiplicada por cero en la ecuación debido a su codificación.

De la Tabla 42 se obtiene: (B) parámetros del modelo estimado, (S.E) error estándar, (Wald) significación estadística con la prueba de Wald, (df) grados de libertad y (EXP(B)) Estimación del "Odds Ratio".

Pese al buen ajuste que presenta el modelo, se realizó otro análisis incluyendo la variable “formación” y excluyendo la constante, con el fin de verificar el ajuste que presenta con estos cambios, ya que como se mostro anteriormente, este parámetro influye en el resultado de la operación, así las tablas de contingencia mostrarán lo contrario.

Tabla 42. Variables en la ecuación.

	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Step 1						
DIAS_COMPLETAMIENTO			.904	2	.636	
DIAS_COMPLETAMIENTO(1)	.191	2.212	.007	1	.931	1.211
DIAS_COMPLETAMIENTO(2)	-1.328	1.811	.538	1	.463	.265
ESPESORINTERVALOAAISLAR2			3.738	3	.291	
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(1)	2.028	1.904	1.135	1	.287	7.602
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(2)	1.961	1.702	1.328	1	.249	7.107
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(3)	-.434	1.275	.116	1	.734	.648
PERMEABILIDAD2			1.047	3	.790	
PERMEABILIDAD2(1)	20.252	10366.742	.000	1	.998	6E+008
PERMEABILIDAD2(2)	.920	1.640	.315	1	.575	2.509
PERMEABILIDAD2(3)	-.576	1.355	.181	1	.671	.562
PRODACUMULADA2			1.373	3	.712	
PRODACUMULADA2(1)	-.123	3.202	.001	1	.969	.884
PRODACUMULADA2(2)	1.671	3.043	.301	1	.583	5.315
PRODACUMULADA2(3)	1.257	2.084	.364	1	.546	3.516
RATADEPRODUCCIONMAX2			1.567	2	.457	
RATADEPRODUCCIONMAX2(1)	.742	2.351	.100	1	.752	2.100
RATADEPRODUCCIONMAX2(2)	1.853	1.524	1.479	1	.224	6.380
POROSIDAD(1)	3.229	1.556	4.306	1	.038	25.260
Constant	-2.116	1.434	2.177	1	.140	.121

a. Variable(s) entered on step 1: DIAS_COMPLETAMIENTO, ESPESORINTERVALOAAISLAR2, PERMEABILIDAD2, PRODACUMULADA2, RATADEPRODUCCIONMAX2, POROSIDAD.

Fuente: Autor, SPSS.

El programa codifica los parámetros como se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43. Salida de SPSS de la regresión logística binaria con la variable formación incluida. Código de las categorías de las variables.

		Frequency	Parameter coding		
			(1)	(2)	(3)
ESPEJOR INTERVALO A AISLAR2	ESPEJOR<10	13	1,000	,000	,000
	10<ESPEJOR<14	14	,000	1,000	,000
	14<ESPEJOR<21	14	,000	,000	1,000
	ESPEJOR>21	15	,000	,000	,000
PERMEABILIDAD2	K<1500	10	1,000	,000	,000
	1500<K<2500	15	,000	1,000	,000
	2500<K<3400	16	,000	,000	1,000
	K>3400	15	,000	,000	,000
PROD ACUMULADA2	PROD.A CUM<30463	13	1,000	,000	,000
	30463<PROD. ACUM<1715747	14	,000	1,000	,000
	1715747<PROD. ACUM<13339313	14	,000	,000	1,000
	PROD. ACUM>13339313	15	,000	,000	,000
FORMACION	C5	19	1,000	,000	
	LOWER CARB	31	,000	1,000	
	KRETACEO	6	,000	,000	
RATA DE PRODUCCION MAX2	BFPD<5500	29	1,000	,000	
	5500<BFPD<13250	17	,000	1,000	
	BFPD>13250	10	,000	,000	
POROSIDAD	POR<25%	30	1,000		
	POR>25%	26	,000		

Fuente: Autor, SPSS.

La proporción de la variabilidad de OPERACION que es explicado por este modelo es mucho mejor que incluyendo el parámetro “FORMACIÓN” y excluyendo la constante de la ecuación (76.6%, según el R cuadrado de Nagelkerke, Tabla 44), esto es, existe un porcentaje importante de influencia sobre el resultado de la operación que depende de las variables analizadas.

Tabla 44. Resumen del modelo teniendo en cuenta el parámetro “zona”.

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	29,762 ^a	,575	,766

a. Estimation terminated at iteration number 41 because parameter estimates changed by less than ,001.

Fuente: Autor, SPSS.

Así mismo, como se muestra en la Tabla 45, la especificidad del modelo se aumenta a 80.0% y la sensibilidad se mantiene en 90.2%, llegar al 75%, con la

inclusión de este parámetro se logro mejorar la predicción en el modelo, por lo tanto esta variable se incluirá en el.

Tabla 45. Tabla de clasificación del modelo incluyendo el parámetro formación.

Observed			Predicted		
			OPERACION		Percentage Correct
			FRACASO	EXITO	
Step 1	OPERACION	FRACASO	12	3	80,0
		EXITO	4	37	90,2
Overall Percentage					87,5

a. The cut value is ,500

Fuente: Autor, SPSS.

Luego de varias corridas, donde se excluían algunas variables y otras se incluían, se pudo determinar, que incluyendo los siguientes parámetros, se obtiene la mejor predicción en el modelo de regresión logística. Estas fueron:

- Espesor del intervalo
- Permeabilidad
- Porosidad
- Tasa de producción
- Formación
- Días de completamiento
- Producción acumulada
- Intentos
- Constante de la ecuación

Todas estas se categorizaron como se mostró previamente en el análisis de las tablas de contingencia (análisis bivariante) y definitivamente se excluye la constante, ya que sin esta se obtuvo mejores resultados. El resultado que se consiguió se muestra en la Tabla 46.

Tabla 46. Resumen del modelo teniendo en cuenta otros parámetros.

Step	-2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
1	24,788 ^a	,513	,747

a. Estimation terminated at iteration number 73 because parameter estimates changed by less than ,001.

Fuente: Autor, SPSS.

Como se puede observar, se mejoró notablemente el R^2 , el cual paso de un 63.7% a 74.7%, es decir, aumento en 11 puntos lo cual es muy significativo ya que se redujo la varianza de la variable dependiente explicada por las variables predictoras. Así mismo, el modelo mantuvo su porcentaje global predictor que muestra la Tabla 45.

Los coeficientes definitivos de la ecuación se muestran en la Tabla 47.

Como el sistema automáticamente crea variables tipo “dummy” la ecuación quedará con varios términos por parámetro, sin embargo, lo único que hay que hacer en la ecuación es ubicar el rango en que se encuentran todas las variables y poner un uno en el coeficiente que pertenece, si se encuentra por fuera de ese rango el valor a poner en el coeficiente será cero.

En la Tabla 48 se muestra como quedara la nomenclatura de los términos en la ecuación para facilitar la manipulación de esta.

La ecuación entonces resulta de la siguiente forma:

$$P_{(OP=exitosa)} = \frac{1}{1 + \exp(-(\beta + E' + K' + T' + F' + I' + D' + P' + 2.41 * PHI))}$$

Donde:

$$E' = 3.12 * E1 + 3.13 * E2 - 0.199 * E3$$

$$K' = 42.98 * K1 + 4.14 * K2 + 1.5 * K3$$

$$T' = 1.42 * T1 + 3.38 * T2$$

$$F' = 3.49 * F1 - 0.32 * F2$$

$$I' = 35.06 * I1 + 36.57 * I2 + 38.79 * I3 + 41.35 * I4$$

$$D' = -0.81 * D1 - 2.61 * D2$$

$$P' = 0.68 * P1 + 2.24 * P2 + 3.23 * P3$$

$$\beta = -41.89$$

Tabla 47. Variables en la ecuación con los parámetros definitivos.

VARIABLE	B
INTENTOS	
INTENTOS(1)	35,05724066
INTENTOS(2)	36,57295731
INTENTOS(3)	38,79002004
INTENTOS(4)	41,34541147
DIAS_COMPLETAMIENTO	
DIAS_COMPLETAMIENTO(1)	-0,805147089
DIAS_COMPLETAMIENTO(2)	-2,613761815
ESPESORINTERVALOAAISLAR2	
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(1)	3,119326874
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(2)	3,126998304
ESPESORINTERVALOAAISLAR2(3)	-0,199040908
PERMEABILIDAD2	
PERMEABILIDAD2(1)	42,98048192
PERMEABILIDAD2(2)	4,140757965
PERMEABILIDAD2(3)	1,507089638
POROSIDAD(1)	2,216326981
RATADEPRODUCCIONMAX2	
RATADEPRODUCCIONMAX2(1)	1,424817435
RATADEPRODUCCIONMAX2(2)	3,380594159
FORMACION	
FORMACION(1)	3,490183456
FORMACION(2)	0,323372349
PRODACUMULADA2	
PRODACUMULADA2(1)	0,677715742
PRODACUMULADA2(2)	2,235955325
PRODACUMULADA2(3)	3,230842416
Constant	-41,89051382

Fuente: Autor, SPSS.

Donde simplemente se introducen unos y ceros según el rango de propiedades que se tenga. Por ejemplo, si se tiene un trabajo donde se va a aislar un intervalo con un espesor de doce (12) pies, entonces como este valor se encuentra en el rango de E2 (Tabla 48) este será uno y el resto de coeficientes (E1 y E3) serán cero.

Aunque el factor “intentos” es una variable que no se conocerá sino hasta el momento en que se va a realizar el trabajo, esta ayuda a explicar los trabajos que fueron exitosos en varios intentos lo cual influye en el resultado del modelo, si esta no se tiene en cuenta el ruido será mayor y por lo tanto el modelo será menos exacto.

Una vez obtenida la ecuación, lo siguiente a realizar es la validación del modelo, ya que no basta el coeficiente de determinación, el cual fue alto, y la tabla de clasificación, la cual también arrojó buenos resultados.

Tabla 48. Nomenclatura de coeficientes en la ecuación con sus respectivos rangos.

VARIABLES EN LA ECUACIÓN			
PARAMETRO	RANGO	COEF. ECUACION	B
ESPESOR INTERVALO A AISLAR	ESPESOR>21	E0	
ESPESOR INTERVALO A AISLAR (1)	ESPESOR<10	E1	2,29349927
ESPESOR INTERVALO A AISLAR (2)	10<ESPESOR<14	E2	2,51868018
ESPESOR INTERVALO A AISLAR (3)	14<ESPESOR<21	E3	-0,71967075
PERMEABILIDAD	K>3400	K0	
PERMEABILIDAD (1)	K<1500	K1	41,0121497
PERMEABILIDAD (2)	1500<K<2500	K2	3,42260705
PERMEABILIDAD (3)	2500<K<3400	K3	0,88279507
TASA DE PRODUCCION MAX	BFPD>13250	T0	
TASA DE PRODUCCION MAX (1)	BFPD<5500	T1	0
TASA DE PRODUCCION MAX (2)	5500<BFPD<13250	T2	1
FORMACION	KRETACEO	F0	
FORMACION (1)	C5	F1	1,8090292
FORMACION (2)	LOWER CARB	F2	-1,57983041
INTENTOS	5	I0	
INTENTOS (1)	1	I1	-4,00763413
INTENTOS (2)	2	I2	-2,75908637
INTENTOS (3)	3	I3	-0,76739295
INTENTOS (4)	4	I4	0,28013489
DIAS COMPLETAMIENTO	DIAS COMP>3506.5	D0	
DIAS COMPLETAMIENTO (1)	DIAS COMP<1181.5	D1	0,17190763
DIAS COMPLETAMIENTO (2)	1181.5<DIAS COMP<3506.5	D2	-1,69347924
POROSIDAD (1)	POR<25%	PHI	2,40957429
PROD ACUMULADA	PROD. ACUM>13339313	P0	
PROD ACUMULADA (1)	PROD.A CUM<30463	P1	1,0093866
PROD ACUMULADA (2)	30463<PROD. ACUM<1715747	P2	2,2009551
PROD ACUMULADA (3)	1715747<PROD. ACUM<13339313	P3	2,39819318

Fuente: Autor, SPSS.

6.5. EVALUACIÓN DEL MODELO

Cualquier ecuación de regresión logística que se obtenga debe ser considerada como provisional, ya que debería someterse a una evaluación de cómo el modelo se ajusta a los datos.

Puede parecer una incongruencia hablar de “ajuste a los datos” al modelo cuando estos han sido empleados precisamente para obtener la ecuación de regresión; sin embargo el modelado matemático no es perfecto por muchas razones (la estimación se hace por un proceso iterativo de cálculo a través del proceso de máxima verosimilitud) y los valores pronosticados no siempre coinciden con los verdaderamente observados. Téngase en cuenta, además,

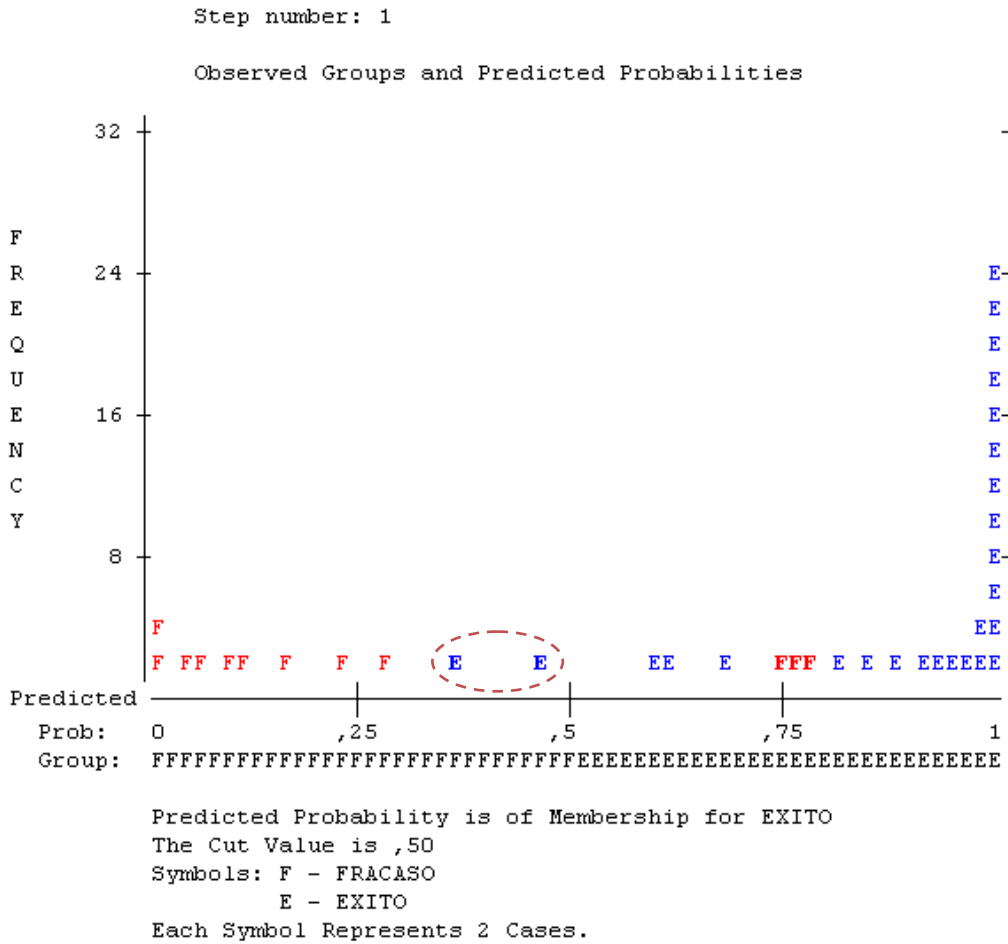
que en el caso de la ecuación de regresión logística, lo que se obtiene para cada combinación de valores de las diferentes variables predictoras incluidas en el modelo es una probabilidad, un valor que oscila entre 0 y 1, y con él un individuo debe ser clasificado en una de las dos posibilidades o categorías que establece la variable resultado o dependiente.

En general si el valor de probabilidad predicho está entre 0 y 0,5 el individuo se clasifica como $Y=0$, mientras que si la probabilidad calculada es $> 0,5$ el sujeto se clasifica como $Y=1$.

Una de las formas de evaluar el ajuste del modelo es, precisamente, mediante una especie de “valoración de una prueba diagnóstica”, comprobando cómo clasifica el nuevo test (el modelo obtenido) a los individuos de la muestra en comparación con el gold estándar (la realidad, lo observado). De hecho, el programa SPSS analiza automáticamente, tras seleccionar las variables del modelo, cuál sería la clasificación de los individuos del estudio tras aplicar la ecuación obtenida, y crea una tabla 2x2 con los valores pronosticados y los realmente observados, como ya hemos visto antes.

En el trabajo que realizamos, en la Tabla 45, podemos apreciar como el modelo obtenido clasificaría correctamente a 38 (de los 41) trabajos de cementación remedial exitosos ($Y=1$), por lo que su sensibilidad sería del 92.7%; y clasifica correctamente, pero en un porcentaje menor a los trabajos donde no hubo éxito ($Y=0$), en concreto a 11 de los 15 trabajos “controles” de nuestro estudio, por lo que la especificidad del modelo es del 72.3%. Y de forma global diríamos que ha clasificado correctamente al 87.5% de los trabajos, el cual es un resultado bastante alto.

Figura 28. Grupos observados y probabilidades predichas por SPSS.



Fuente: Autor, SPSS.

Si deseamos tener una comprobación visual de cómo se distribuyen los diferentes individuos en función de los valores de probabilidad predichos, SPSS permite obtener una grafica de clasificación. Los gráficos de clasificación que brinda el programa SPSS no son muy buenos. En la figura 28 se muestra la clasificación para un punto de corte 0,5.

La letra E corresponde a los trabajos que eran el caso de estudio, esto es, los trabajos los cuales fueron exitosos, ya sea en uno ó más intentos. Como se puede ver en el círculo rojo punteado que el modelo de regresión logística

calculó un valor de probabilidad ($Y=1$) menor a 0.5 en muy pocas ocasiones y por lo tanto el modelo es por tanto, bastante sensible.

Si se ajusta el punto de corte a 0.7, es decir, que para que un trabajo sea considera exitoso en el modelo debe tener una probabilidad de éxito mayor o igual a este valor, la tabla de clasificación (Tabla 49) queda de la siguiente forma:

Tabla 49. Tabla de clasificación del modelo incluyendo el parámetro formación tomando como punto de corte 0.7.

Observed			Predicted		
			OPERACION		Percentage Correct
			FRACASO	EXITO	
Step 1	OPERACION	FRACASO	11	4	73,3
		EXITO	6	35	85,4
	Overall Percentage				82,1

a. The cut value is ,700

Fuente: Autor, SPSS.

El resultado, aunque un poco peor que el obtenido con un corte de 0.5, sigue siendo muy bueno, con una sensibilidad del 85.4% y la misma especificidad del 73.3%. Es decir, si aumentamos el criterio (antes era de 0.5) para que un trabajo sea clasificado como exitoso en las predicciones del modelo, seguimos obteniendo buenos resultados en la tabla de clasificación, lo que nos garantiza aun más la veracidad y el ajuste del modelo.

Siguiendo el mismo procedimiento, se varió el punto de corte con el fin de mejorar la predicción y se obtuvo lo que se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50. Tabla resumen de clasificación del modelo tomando varios puntos de corte.

OPERACIÓN	PUNTO DE CORTE	PORCENTAJE CORRECTO	PORCENTAJE GLOBAL
FRACASO	0,5	73,33%	87,50%
ÉXITO		92,68%	
FRACASO	0,7	73,30%	82,10%
ÉXITO		85,40%	
FRACASO	0,8	100,00%	89,30%
ÉXITO		85,40%	
FRACASO	0,85	100%	85,70%
ÉXITO		80,50%	

Fuente: Autor, SPSS.

El punto de corte óptimo para el modelo de regresión logística, según mi interpretación, sería 0.80, ya que tanto la sensibilidad como la especificidad están por encima de 0.75, el cual es el valor recomendado para obtener un modelo mucho más realista. Con este punto de corte (0.80) el modelo predice correctamente el 100% de los trabajos fallidos y el 85.4% de los trabajos exitosos.

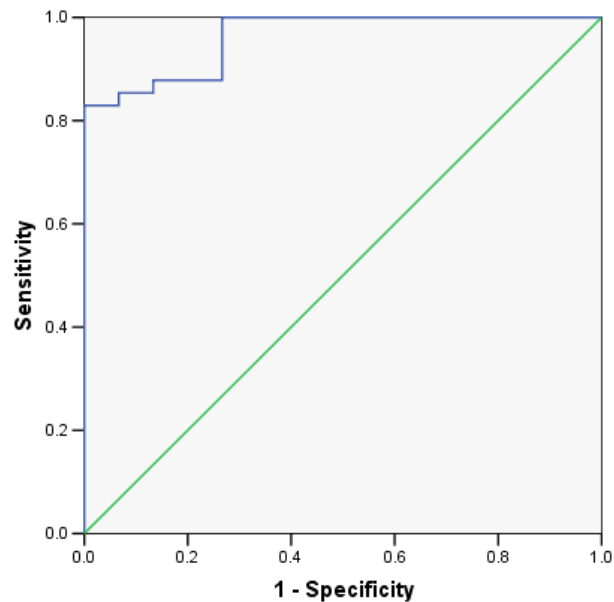
Otra forma de evaluar el modelo de regresión logística es mediante el análisis de las curvas ROC (Receiver Operating Characteristic). Evidentemente, para cada punto de corte x_0 de una variable o parámetro del pozo en los trabajos de cementación remedial, se obtiene una clasificación en la que aumentan o disminuyen las probabilidades. Las curvas ROC representan los pares ordenados (sensibilidad, 1-especificidad) para distintos puntos de corte. Por consiguiente, el área bajo la curva ROC (AUC: area under curve) proporciona un parámetro para evaluar la bondad de la prueba, puesto que dicha área (A) verifica las desigualdades $0.5 \leq A \leq 1$, y se interpreta como la probabilidad de que ante un par de individuos el test lo clasifique correctamente.

Observar que:

- Si $A=0.5$, indica que el test no es válido, pues la proporción de verdaderos positivos sería igual a la proporción de falsos positivos, en este caso la curva sería igual a la diagonal de (0,0) a (1,1).
- Si $A=1$, significa que el test es perfecto, existiría una región en la que, cualquier punto de corte, tiene sensibilidad y especificidad iguales a 1.

Con el fin de evaluar la bondad del modelo, se realizó el análisis de la curva ROC, los resultados se muestran en la figura 29.

Figura 29. Curva ROC obtenida en SPSS.



Fuente: Autor, SPSS.

Vemos en la Tabla 51, como la sensibilidad y la especificidad del modelo calculado varía según se establezca un punto de corte u otro para clasificar a los individuos en un grupo de predicción y que el área bajo la curva es 0,963. Este es el poder de discriminación del modelo construido, un 96% del máximo posible. Evidentemente es estadísticamente significativo.

Tabla 51. Área bajo la curva ROC.

Test Result Variable(s): Predicted probability

Area	Std. Error ^a	Asymptotic Sig. ^b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
.963	.022	.000	.919	1.006

a. Under the nonparametric assumption

b. Null hypothesis: true area = 0.5

Fuente: Autor, SPSS

Otra opción para evaluar el ajuste del modelo construido es a través del test de Hosmer-Lemeshow, una de las diferentes técnicas empleadas para evaluar la bondad del ajuste, muy recomendable cuando se incluyen en el modelo al menos una variable cuantitativa.

El test consiste en establecer los deciles de riesgo o probabilidad predicha por el modelo de presentar el evento, y en cada una de estas diez categorías se comparan los valores observados y los predichos, tanto para los que tienen el resultado explorado como para los que no lo tienen. Si hay una elevada coincidencia entre observados y esperados (un buen ajuste), el test Chi cuadrado que contrastará ambas distribuciones no mostrará significación estadística.

Cuando el test Chi cuadrado de la prueba no es significativo ($Sig > 0.05$) quiere indicarnos que no hay motivos para pensar que los resultados predichos sean diferentes de los observados (o que si hay diferencias pueden explicarse razonablemente por el azar o error del muestreo) y que el modelo puede considerarse aceptable. Por otra parte, la tabla de contingencia para la prueba de Hosmer Lemeshow nos da información adicional sobre cada categoría de riesgo, de manera que podemos comprobar en qué regiones de la predicción el modelo se ajusta peor a los datos.

Tabla 52. Test de Hosmer-Lemeshow.

		OPERACION = FRACASO		OPERACION = EXITO		Total
		Observed	Expected	Observed	Expected	
Step	1	6	5,831	0	,169	6
1	2	5	4,885	1	1,115	6
	3	1	2,566	5	3,434	6
	4	3	1,192	3	4,808	6
	5	0	,386	6	5,614	6
	6	0	,123	6	5,877	6
	7	0	,016	6	5,984	6
	8	0	,001	4	3,999	4
	9	0	,000	10	10,000	10

Step	Chi-square	df	Sig.
1	2,002	7	,960

Fuente: Autor, SPSS

Como se puede observar en la Tabla 52, lo observado se ajusta muy bien a lo predicho por el modelo de regresión logística, así mismo el valor de la significancia estadística de la prueba chi-cuadrado lo confirma.

Así mismo, se realizó la prueba de la ecuación que se obtuvo a partir del modelo de regresión logística utilizando los datos de la tabla del anexo A. Los resultados fueron muy satisfactorios, ya que la ecuación pronosticó con gran exactitud lo que realmente pasó en el pozo.

En la Tabla 53 se introdujeron los datos correspondientes al trabajo que se realizó en D-03 el cual fue exitoso, sin embargo, se requirieron de tres intentos para obtener el asilamiento de la zona.

Tabla 53. Parámetros del trabajo de cementación remedial en el pozo D-03.

PARAMETRO	VALOR
ESPELOR DEL INTERVALO	12
PERMEABILIDAD	4800
TASA DE PRODUCCIÓN	18000
FORMACION	LC
DIAS DE COMPLETAMIENTO	6131
PROD. ACUMULADA	30573220
POROSIDAD	30
INTENTOS	1

La probabilidad calculada por la ecuación obtenida por el modelo de regresión logística fue de apenas el 3% a pesar de que este trabajo fue exitoso. Hay que notar que en el coeficiente de “intentos” se puso solo uno (1), cambiando este valor por los tres (3) que son los intentos que se requirieron realmente, la probabilidad obtenida es del 59% lo cual demuestra el buen ajuste de la ecuación.

Se realizó otra prueba utilizando los datos del pozo D-55 los cuales se muestran en la Tabla 54, este trabajo fue exitoso en un solo intento.

Tabla 54. Parámetros del trabajo de cementación remedial en el pozo D-55.

PARAMETRO	VALOR
ESPELOR DEL INTERVALO	5
PERMEABILIDAD	3000
TASA DE PRODUCCIÓN	1700
FORMACION	LC
DIAS DE COMPLETAMIENTO	132
PROD. ACUMULADA	150613
POROSIDAD	25
INTENTOS	1

La probabilidad de éxito calculada por el modelo fue del 73%, lo cual comprueba una vez más la bondad de la ecuación

Finalmente, tras la serie de pruebas que se realizaron para verificar la bondad del modelo de regresión logística, se puede concluir que las predicciones que realiza este se acercan mucho a las observadas o reales.

7. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO A SEGUIR

Para la elaboración de la metodología, se desarrollaron varias reuniones con Ingenieros de Campo, Bogotá y el especialista en cementación de Halliburton. Esto con el propósito de establecer el plan de acción que permitiera identificar los problemas asociados en los trabajos de cementación remedial para aislamiento de zonas intermedias y con base en esto definir las alternativas disponibles que permitan reducir o mitigar los impactos negativos en esta operación.

Anteriormente los trabajos de cementación remedial en Occidental se realizaban con el método convencional, es decir, se realizaba una prueba de inyectividad, según los resultados de la prueba se determinaba los preflujos y tipo de lechada (convencional o tixotrópica) a utilizar, sin que se tuviera un estándar de volúmenes requeridos para los trabajos. Posteriormente, se bombeaban los espaciadores seguido por la lechada convencional de cemento, esta se bombeaba hasta alcanzar presión de forzamiento, si esta no era alcanzada entonces se sobre-desplazaba con agua hasta obtener retornos limpios en superficie y se repetía nuevamente el mismo procedimiento hasta aislar el intervalo o hasta que fuera económicamente viable.

Si se utilizaba lechada tixotrópica, se bombeaban los preflujos seguido de la lechada de cemento realizando varias hesitaciones o paradas, luego se desplazaba con agua hasta alcanzar la presión de forzamiento, sin embargo el uso de este tipo de lechada tampoco garantizaba el éxito de la operación.

Por lo tanto se estableció un nuevo tipo de método para realizar las cementaciones remediales el cual consiste en no sobredesplazar, ya que el poco cemento que quedaba cerca de la formación que era posteriormente arrastrado lejos de la cara de la formación; entonces se decidió implementar un método

parecido al tapón balanceado. Este consiste en el balanceo de presiones entre la presión de formación y la presión hidrostática que genera el peso de la columna de la lechada de cemento, garantizando cemento alrededor de la cara del pozo, con el fin de crear una especie de anillo próximo a los perforados. Esta metodología se explicará detalladamente más adelante.

Así mismo, se tenía que definir el tipo de situación o condición que se presentaba en fondo del pozo, ya que no todos los trabajos de cementación remedial presentaban las mismas condiciones, es decir, no en todos los trabajos habían problemas, ya que esto depende de las tasas y volúmenes de producción del pozo, entre muchos otros factores. Para esto se definieron tres tipos de condiciones:

- TIPO I: Aplica a formaciones depletadas, con un espesor de los intervalos a aislar mayor a 20 pies y más de 1,000 días produciendo, permeabilidad mayor a los 3,400 mD, con una producción acumulada mayor a los 13 millones de barriles de fluido y una tasa de producción mayor a los 13 mil BFPD con un registro de producción de arena de más de 100 ppm.
- TIPO II: Aplica a formaciones depletadas, con un espesor de los intervalos a aislar entre 14 y 20 pies con menos de 1,500 días de estar produciendo, permeabilidad entre 1,500 y 3,400 mD, haber producido entre 1 y 13 millones de barriles de fluido, una tasa de producción entre 5,000 y 13,000 BFPD y una producción de arena registrada mayor a los 100 ppm.
- TIPO III: Aplica a pozos con menos de 1,000 días produciendo, un espesor de los intervalos a aislar menor a los 14 pies, tener tasas de producción menor a los 5,000 BFPD, no haber producido más de 1 millón de barriles, permeabilidad menor a 2,500 mD y un registro de producción de arena menor a los 100 ppm.

7.1. TIPO I

Dentro de este tipo de trabajos se encuentran aquellos en los cuales se tenga formaciones depletadas, con las siguientes condiciones: permeabilidad mayor a 3,400 mD, espesor del intervalo a aislar mayor a los 20 pies, más de 1,000 días de producción, registro de producción de arena mayor a los 100 ppm, producción de más de 13 millones de barriles y una tasa mayor a los 13,000 BFPD.

Con el análisis estadístico hecho previamente (análisis bivariante), las graficas de dispersión y las tablas descriptivas que se muestran en el anexo C se definieron los rangos de cada parámetro para cada tipo de trabajo. Aunque con las graficas y tablas del anexo C no se pueda hacer una distinción muy clara, el análisis bivariante y la estratificación o categorización de los parámetros, la cual se realizó utilizando los programas XLSTAT y SPSS los cuales permitían calcular las clases optimas para cada factor, es decir, definía los rangos con el fin de minimizar la varianza intra-grupo. Posteriormente se realizó el análisis para determinar posibles interacciones con el factor “Numero de Intentos”, esto ayudó aún más a definir cada categoría, ya que se podía ver claramente en que rango se presentaban problemas. En la Tabla 55 se muestra los rangos los cuales van a determinar el procedimiento a seguir.

Tabla 55. Definición de los rangos para trabajos Tipo I.

TIPO I	
ZONA:	CARBONERA INFERIOR
ESPESOR:	> 20 PIES
PERMEABILIDAD:	> 3400 mD
PROD. ACUMULADA:	> 13'000.000 Bls
TASA DE PRODUCCIÓN:	> 13.000 BFPD
DIAS DE COMPLETADO:	> 1000 DIAS
ARENA PRODUCIDA:	> 100 ppm

Fuente: Autor

Es importante precisar, que para clasificar el trabajo no es necesario que todos los parámetros se encuentren dentro del rango (al menos 3 de los 6), sin embargo, sirve como guía para la planeación de la operación.

La nueva técnica que se propone se basa en el balanceo de la presión hidrostática generada por la columna de lechada y la presión de formación a diferencia de la que se venía realizando, la cual consistía en desplazar y alcanzar la presión de forzamiento.

Se recomienda no utilizar la lechada tixotrópica ya que no se requiere generar un tapón que frene la lechada convencional al momento de realizar un desplazamiento hasta alcanzar la presión de forzamiento y se minimizan riesgos operacionales por desarrollo temprano de geles del cemento.

Se propone utilizar solamente lechada convencional con mayor densidad (15.8), lo cual permitirá mayor resistencia y mayor adherencia a la tubería de revestimiento, ya que antes se utilizaban lechadas convencionales y tixotropicas de 14.6 – 14.8 ppg con el fin de no sobrepasar el gradiente de fractura de la formación con la presión hidrostática generada por la columna de cemento.

La posible contaminación de la lechada con los fluidos del pozo, es un factor que hay que tener muy en cuenta, por lo tanto se discutió y se llegó a la conclusión que la contaminación solamente ocurrirá en el frente de la lechada de cemento, por lo tanto se recomienda no utilizar preflujos y si una lechada de sacrificio con las mismas características de la lechada principal (debido a esto se está considerando un exceso en el volumen de lechada convencional).

Antes de empezar con la operación, se debe tener certeza en la siguiente información:

1. Yacimientos deberá suministrar las presiones por cada intervalo a aislar. Si existe un diferencial de presión mayor de 100 Psi entre los intervalos a aislar, se recomienda realizar trabajos por separado.
2. Tomar medidas del nivel de fluido con Echometer con el fin de verificar la presión de formación.

Una vez confirmado el dato de presión se procede de la siguiente forma:

3. Sentar Bridge Plug y Cement Retainer 10 pies por debajo y 50 pies por encima de los perforados respectivamente, si el estado mecánico del pozo lo permite. Si existe tope de arena cerca (por debajo) del intervalo a aislar, consultar con Bogotá para analizar la posibilidad de utilizar la arena como fondo.
4. Verificar sello del Stinger con el Cement Retainer.
5. Realizar prueba de Inyectividad a diferentes tasas, registrando presión, caudal y volumen acumulado.
6. Se preparará lechada de cemento al vuelo, es decir, este se irá preparando mientras se bombea lentamente, el volumen aproximado de cemento a preparar será de por lo menos 150 barriles de lechada de cemento con una densidad de 15.8 ppg el cual será lanzado por gravedad dentro de la tubería, con esto se garantiza que el cemento que quede en los alrededores del pozo no esté contaminado, es decir, libre de fluidos del pozo.
7. Dependiendo del nivel de lechada de cemento dentro de la tubería, el cual debe ser verificado con el echometer, se calcula el volumen de agua de desplazamiento necesario para que el volumen de lechada de cemento que quede en tubería por encima del Cement Retainer para reversar sea de 5 bls. Se recomienda verificar el diámetro interno de la tubería. Se aconseja realizar un desplazamiento lentamente para que se mantenga el equilibrio de presiones de formación e hidrostática dentro de la tubería.
8. Realizar el “Sting Out” y reversar. Esperar un tiempo de fragüe de 24 horas.

9. Moler Cement Retainer y cemento. Durante la perforación del cemento no se deberá exceder una presión en la bomba de 500 psi.
10. Una vez perforado el cemento se realizará una prueba con la columna hidrostática, llenando el pozo con agua completamente y presurizando con 500 psi.
11. Si el trabajo de aislamiento no es exitoso se realizará una nueva prueba de injectividad antes de realizar un segundo intento. Esto para estar seguros de las condiciones en las que quedó el pozo y estimar los volúmenes de lechada requeridos. **No sé sobre-desplazará** la lechada de cemento bajo ninguna circunstancia.
12. Se repetirá el procedimiento desde el paso 3.

7.2. TIPO II

Los trabajos Tipo II están clasificados para pozos con formaciones depletadas, con una tasa de producción entre los 5,000 y 13,000 BFPD, haber producido entre 1 y 13 millones de barriles, un espesor del intervalo entre 14 y 20 pies y un tiempo de producción de dichos intervalos menor a los 1,500 días. Los parámetros se listan en la Tabla 56.

Tabla 56. Definición de los rangos para trabajos Tipo II.

TIPO II	
ZONA:	CARBONERAS (M Y C5), CRETACEO
ESPESOR:	14 - 20 PIES
PERMEABILIDAD:	1500 - 3400 mD
PROD. ACUMULADA:	1'000.000 - 13'000.000 BIs
TASA DE PRODUCCIÓN:	5.000 - 13.000 BFPD
DIAS DE COMPLETADO:	< 1500 DIAS
ARENA PRODUCIDA:	> 100 ppm

Con lo mostrado en la Tabla 56, se podría pensar que las cavernas son de menor tamaño a las del Tipo I, por lo tanto la metodología es casi la misma; cambia el volumen de cemento a utilizar el cual será de 15 a 30 barriles

lanzados por gravedad, se realiza el balanceo de presiones y luego se tratará de forzar, ya que teóricamente habría contra que deshidratar el cemento.

Antes de empezar con la operación, se debe tener certeza en la siguiente información:

1. Yacimientos deberá suministrar las presiones por cada intervalo a aislar. Si existe un diferencial de presión mayor de 100 Psi entre los intervalos a aislar, se recomienda realizar trabajos por separado.
2. Tomar medidas del nivel de fluido con Echometer con el fin de verificar la presión de formación.

Una vez confirmado el dato de presión se procede de la siguiente forma:

3. Sentar Bridge Plug y Cement Retainer 10 pies por debajo y 50 pies por encima de los perforados respectivamente, si el estado mecánico del pozo lo permite. Si existe tope de arena cerca (por debajo) del intervalo a aislar, consultar con Bogotá para analizar la posibilidad de utilizar la arena como fondo.
4. Verificar sello del Stinger con el Cement Retainer.
5. Realizar prueba de Inyectividad a diferentes tasas, registrando presión, caudal y volumen acumulado.
6. Se lanzará por gravedad de 15 a 30 barriles de lechada de cemento con una densidad de 15.8 ppg dentro de la tubería.
7. Desplazar lentamente con agua la lechada de cemento tratando de alcanzar la presión de forzamiento.
8. Si levanta presión, realizar el “Sting Out” y reversar. Esperar un tiempo de fragüe de 24 horas.
9. Moler Cement Retainer y cemento. Durante la perforación del cemento no se deberá exceder una presión en la bomba de 500 psi.

10. Una vez perforado el cemento se realizará una prueba con la columna hidrostática, llenando el pozo con agua completamente y presurizando con 500 psi.
11. Si no se levantó presión en el desplazamiento, sobredesplazar y repetir el procedimiento utilizados en los trabajos Tipo I, sin sacar la tubería de trabajo, utilizando un volumen de lechada de cemento de 100 barriles preparados al vuelo.

7.3. TIPO III

En este tipo de trabajo se supone que no existen cavernas, ya que son pozos con baja tasa de producción (menores a 5,000 BFPD), permeabilidad menor a 2,500 mD, espesor de los intervalos a aislar menor a 14 pies y una producción acumulada menor al millón de barriles entre otros parámetros, los cuales se listan en la Tabla 57. La mayoría, serán pozos nuevos o trabajos de Workover que no resultaron como se esperaba, por lo tanto serán trabajos que no presenten mayores problemas al momento de realizar la cementación remedial.

Tabla 57. Definición de los rangos para trabajos Tipo III.

TIPO III	
ZONA:	CARBONERAS (M Y C5), CRETACEO
ESPESOR:	<14 PIES
PERMEABILIDAD:	<2500 mD
PROD. ACUMULADA:	< 1'000.000 Bls
TASA DE PRODUCCIÓN:	< 5.000 BFPD
DIAS DE COMPLETADO:	< 1000 DIAS
ARENA PRODUCIDA:	< 100 ppm

Antes de empezar con la operación, se debe tener certeza en la siguiente información:

1. Yacimientos deberá suministrar las presiones por cada intervalo a aislar. Si existe un diferencial de presión mayor de 100 Psi entre los intervalos a aislar, se recomienda realizar trabajos por separado.
2. Tomar medidas del nivel de fluido con Echometer con el fin de verificar la presión de formación.

Una vez confirmado el dato de presión se procede de la siguiente forma:

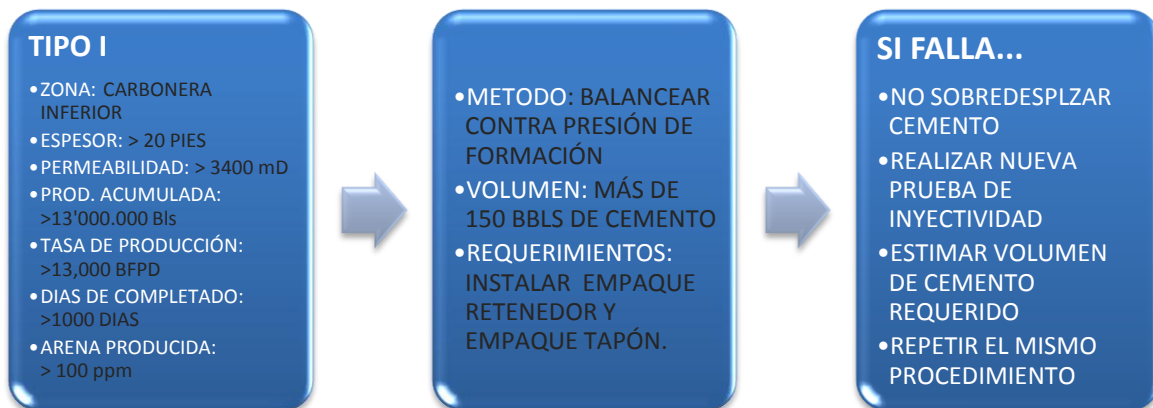
3. Sentar Bridge Plug y Cement Retainer 10 pies por debajo y 50 pies por encima de los perforados respectivamente, si el estado mecánico del pozo lo permite, el uso del Cement Retainer será opcional. Si existe tope de arena cerca (por debajo) del intervalo a aislar, consultar con Bogotá para analizar la posibilidad de utilizar la arena como fondo.
4. Verificar sello del Stinger con el Cement Retainer (si se decide usar).
5. Realizar prueba de Inyectividad a diferentes tasas, registrando presión, caudal y volumen acumulado.
6. Se lanzará por gravedad 15 barriles de lechada de cemento con una densidad de 15.8 ppg dentro de la tubería.
7. Desplazar lentamente con agua la lechada de cemento tratando de alcanzar la presión de forzamiento.
8. Si levanta presión, realizar el “Sting Out” y reversar. Esperar un tiempo de fragüe de 24 horas.
9. Moler Cement Retainer y cemento. Durante la perforación del cemento no se deberá exceder una presión en la bomba de 500 psi.
10. Una vez perforado el cemento se realizará una prueba con la columna hidrostática, llenando el pozo con agua completamente y presurizando con 500 psi.
11. Si no se levantó presión en el desplazamiento, sobredesplazar y repetir el procedimiento utilizado en los trabajos Tipo II, sin sacar la tubería de trabajo, utilizando un volumen de lechada de cemento de 15 a 30 barriles.

Si tampoco levanta presión repetir el procedimiento de los trabajos Tipo I preparando al vuelo un volumen de 100 barriles de lechada de cemento.

Para este tipo de trabajos la metodología a seguir es la convencional, es decir, se bombearía poco cemento (máximo 30 barriles), ya que el cemento tendría un soporte (no hay caverna) con el cual se podría deshidratar y generar la torta de cemento que aíse los intervalos, lo que permitiría que al desplazar el cemento se alcancen altas presiones de forzamiento limitado obviamente por la presión de fractura. El uso del retenedor sería opcional y será el Ingeniero encargado en decidir si lo utiliza o no.

Para resumir, se muestra a continuación el esquema a seguir según las condiciones del pozo, con el fin de ilustrar los procedimientos a seguir.

Figura 30. Esquema de la metodología de los trabajos de cementación remedial.

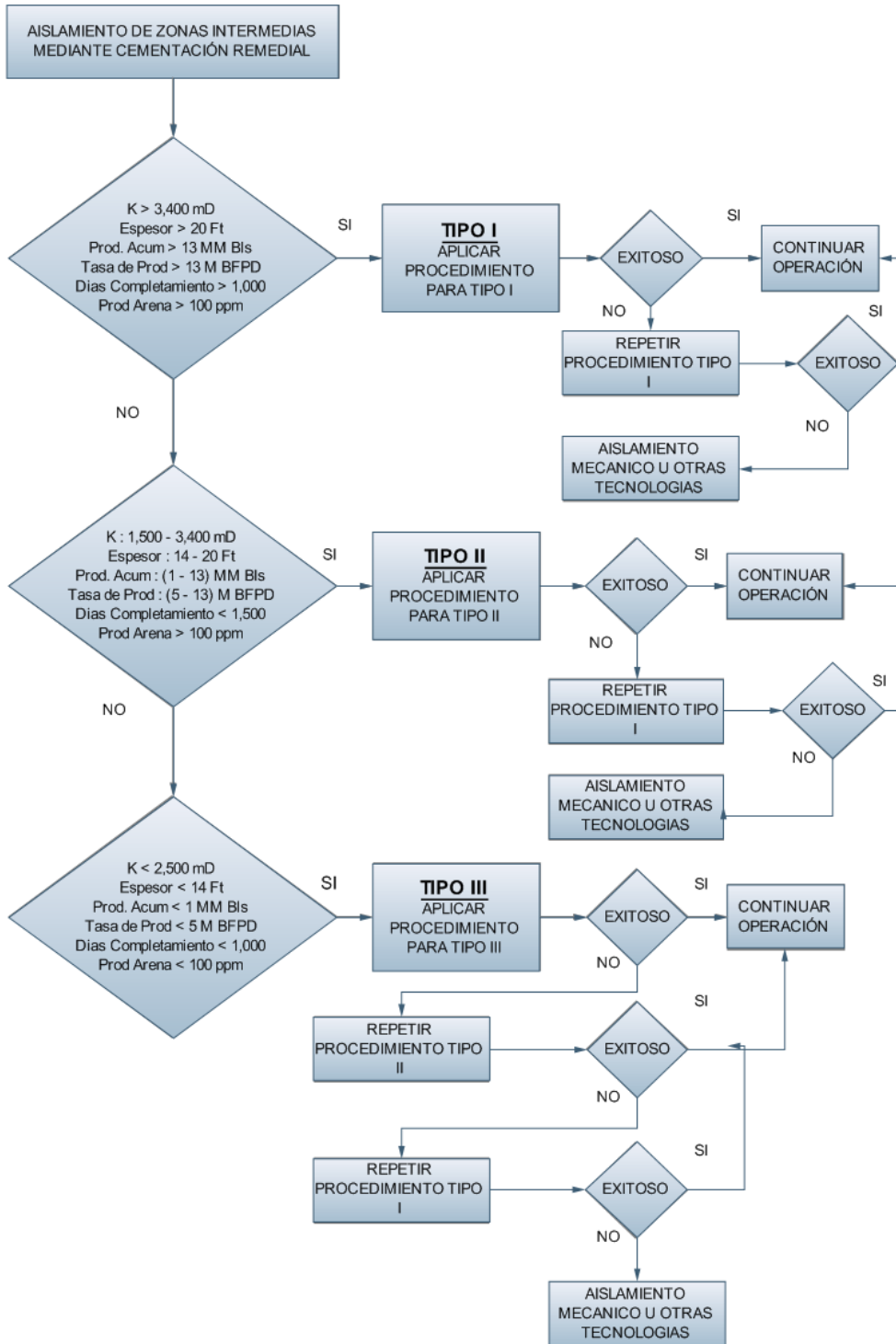




Fuente: Autor

Así mismo, en la figura 31, se muestra el árbol de decisión el cual permitirá realizar la planeación del diseño de la operación al momento de realizar un trabajo de aislamiento de zonas intermedias mediante cementación remedial, el cual ayudará a reducir los tiempos de operación lo que conlleva a menores costos por trabajo y menor producción diferida.

Figura 31. Árbol de decisión para la planeación del diseño de la operación.



8. CONCLUSIONES

- La recopilación histórica de los trabajos de cementación remedial realizados desde el año 1990 hasta la actualidad; permitió realizar un seguimiento del resultado de la operación con el fin de establecer si esta fue exitosa o no, ya sea en la misma operación o posterior a ella. Este análisis fue la base y soporte de toda esta investigación, ya que a partir de esto se pudo determinar los parámetros que influyen en el éxito o fracaso de un trabajo de este tipo y a partir de que rango empiezan estos a ser un problema para el éxito de la operación.
- Desde 1990 a la fecha se han realizado 56 trabajos de cementación remedial con el objetivo de aislar zonas intermedias, de estos trabajos 15 han fallado, es decir, el 26.8%; mientras que 41 han sido exitosos, lo que representa el 73.2%, sin embargo, dentro de este último porcentaje no todos se han realizado en un solo intento, el 29.3% han requerido más de un intento para lograr el aislamiento permanente de la zona.
- En las arenas del M1 se han realizado 19 trabajos distintos, de los cuales el 42% han fallado y tan solo el 26% se ha realizado en un solo intento, es decir, que el 74% de los trabajos exitosos realizados en esta zona han presentado problemas al momento de realizar una cementación remedial, lo que la hace la zona más compleja en este tipo de operaciones.
- En los canales de C5 se han realizado 17 trabajos donde tan solo el 12% han fallado y otro 12% han sido exitosos en más de un intento, para un total de un 24% de trabajos con problemas, lo que hace que esta formación sea la menos problemática al momento de realizar un aislamiento por medio de cementación remedial.

- De los trabajos de cementación remedial que fallaron, en el 87% de los casos, se tuvo un espesor de los intervalos a aislar de más de 14 pies de longitud, mientras que en el 61% de los trabajos exitosos se tuvo un espesor de menos de 14 pies. Con base a esto se recomienda que cuando se tengan arenas con longitudes de más de 14 pies las cuales hayan producido a altas tasas y grandes volúmenes de fluido, se divida el trabajo de aislamiento en dos trabajos distintos, con el fin de minimizar la probabilidad de fracaso de la operación.
- La permeabilidad es un factor clave en el fracaso de un trabajo de cementación remedial, ya que el 87% de los trabajos fallidos, presentaron una permeabilidad mayor a los 2,500 mD, sin embargo, tan solo el 33% de los trabajos exitosos presentaron problemas con una permeabilidad mayor a este valor, lo cual indica que existen otros parámetros que ayudan a explicar el éxito de un trabajo de cementación remedial.
- Las arenas donde se tenían producciones acumuladas de más de 2 millones de barriles de fluido producido representan el 73% de los trabajos fallidos y el 54% de los trabajos exitosos que se realizaron en más de un intento. Así mismo, el 40% de los trabajos que fallaron presentaban una tasa de producción mayor a los 13,000 BFPD y el 100% de los trabajos exitosos que presentaban una tasa por encima de esta se tuvieron que realizar en varios intentos. Este análisis ayuda a confirmar la hipótesis de la creación de cavernas en el pozo, ya que a altas tasas y gran producción de fluido mayor será el arrastre de finos hacia el pozo.
- Las arenas productoras de Caño Limón son rocas del Cretáceo y Terciario pobremente consolidadas con un fuerte y activo empuje hidráulico natural además de poseer una alta permeabilidad (mayor a 1 Darcy). Debido a esto (la poca consolidación de la roca y a las tasas de producción por encima de

los 10,000 BFPD que se pueden obtener gracias al acuífero activo que se tiene), se presenta altas producciones de arena, lo cual, en la mayoría de los casos, pueden inducir a la creación de cavernas e inestabilidad del pozo, generando tanto problemas de arenamiento como dificultades al momento de aislar dicha zona.

- La identificación de las características de producción y de las propiedades del yacimiento permitió definir tres tipos de categorías con el fin de soportar la planeación de los trabajos.
- Los trabajos Tipo I se definieron para zonas depletadas con grandes cavernas, lo que conlleva a un espesor de los intervalos a aislar mayor a 20 pies y más de 1,000 días produciendo, permeabilidad mayor a los 3,400 mD, con una producción acumulada mayor a los 13 millones de barriles de fluido y una tasa de producción mayor a los 13,000 BFPD con un registro de producción de arena de más de 100 ppm.
- Los trabajos Tipo II se definieron para zonas depletadas con un volumen de caverna menor a la del Tipo I, por lo tanto serán arenas con un espesor de entre 14 y 20 pies con menos de 1,500 días de estar produciendo, permeabilidad entre 1,500 y 3,400 mD, haber producido entre 1 y 13 millones de barriles de fluido con una tasa de producción entre 5,000 y 13,000 BFPD y una producción de arena registrada mayor a los 100 ppm.
- Los trabajos Tipo III se definieron para arenas con menos de 1,000 días de producción, un espesor de menor a 14 pies, tener tasas de producción menor a los 5,000 BFPD, no haber producido más de 1 millón de barriles, permeabilidad menor a 2,500 mD y un registro de producción de arena menor a los 100 ppm. La mayoría, serán pozos nuevos o trabajos de Workover que no resultaron como se esperaba, por lo tanto serán trabajos

que no presenten mayores problemas al momento de realizar la cementación remedial.

- Con el fin asegurar la perpetuidad del aislamiento en un trabajo de cementación remedial, se mejoraron las características de la lechada de cemento aumentando su densidad de 14.6 a 15.8, esto garantiza mayor resistencia a la compresión, a la tracción y mayor fuerza de adherencia. Así mismo, se tendrá en cuenta en la nueva metodología, siempre bombear una lechada de cemento de sacrificio con el fin de evitar la contaminación de esta con fluidos del pozo.
- La implementación del modelo de regresión logística, con el cual se obtuvo una ecuación con una confiabilidad en sus resultados del 95%, un coeficiente de correlación de 0.75 y una predicción global con un punto de corte de 0.8 del 89.3%, permitirá calcular con gran precisión la probabilidad de éxito de un trabajo de cementación remedial según las características del pozo en particular.
- La regresión logística es un modelo muy utilizado en el área de salud y ciencias humanas, sin embargo, no se había utilizado en ningún estudio de ciencias de la tierra y afines, por lo tanto, se abren las puertas para aplicar este tipo de modelo en las diferentes ramas de la Ingeniería de Petróleos donde se requiera un estudio de este tipo.

9. RECOMENDACIONES

- El modelo de regresión logística es una herramienta muy útil cuando se requiera predecir cualquier situación o evento en que la variable respuesta sea dicotómica, sin embargo, entre mayor número de datos, mayor será la confiabilidad y la precisión, por lo tanto se recomienda seguir recopilando información de los nuevos trabajos de cementación remedial que se realicen para así ir alimentando la base de datos del modelo para obtener resultados mucho más precisos.
- El modelo de regresión logística permite calcular la probabilidad de éxito de un trabajo de cementación remedial y servirá como una guía práctica para la planeación y diseño de la operación.
- El uso de la lechada tixotrópica no se recomienda, ya que en la nueva metodología la cual consiste en el balanceo presiones (hidrostática y formación), no se requiere generar un soporte para forzar y deshidratar la lechada de cemento contra la formación.
- El uso del Echometer permite determinar niveles de fluido dentro de la tubería, lo cual es muy útil para verificar los datos de presión y calcular el volumen de agua de desplazamiento necesarios para permitir que queden por lo menos 5 barriles de lechada de cemento dentro de la tubería de trabajo por encima del Cement Retainer.
- Verificar siempre el diámetro interno de la tubería de trabajo, ya que se han presentado varios problemas operacionales por obviar esta recomendación.

- El registro de producción de arena en los pozos es clave para la obtención de un mejor modelo, sin embargo, es una cifra puntual y no se tiene una medida continua que permita cuantificar el volumen vacío (caverna) en el fondo del pozo. Por lo tanto, es recomendable implementar nuevos mecanismos que permitan la medición de arena constantemente. Esto servirá no solo para este tipo de trabajo, sino para muchos otros controles y operaciones que se quieran llevar a cabo.
- Implementar la matriz para identificar los tipos de situaciones (Tipo I, II y III) y la ejecución de los procedimientos definidos en cada situación, permitirá alcanzar el 100% de éxito en los trabajos de aislamiento de zonas a través de cementaciones remediales en Cravo Norte.

BIBLIOGRAFIA

1. **GABELA, Víctor H.** Asociación ECOPETROL-Occidental Campo Caño Limón. Llanos Orientales de Colombia. II Simposio Exploración de Cuencas Subandinas. Bogotá Agosto de 1985.
2. **RIVERO RT y DOMINGUEZ JG.** Caño Limón Field Colombia: The latest giant oil reservoir in South America
3. **CLEVELAND, M.N y MOLINA, J.** Deltaic Reservoir of the Caño Limón Field, Colombia, South America. Casebook in East Science, 1990.
4. **AHUMADA, R y BERNAL, M.** Plan Integral para manejo y control de los yacimientos en Cravo Norte. Sexto Congreso Colombiano del Petróleo, memorias, tomo II.
5. **SMITH, D. y HARRIS, K.** Remedial Cementing Practices Manual. OXY Permian. 2005.
6. **Smith, D.** "CEMENTING, Monograph Volume 4 SPE". SPE, 1987.
7. <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd97/UnidadesDidacticas/53-1-upunt11.html>
8. http://www.ucv.cl/web/estadistica/cb_intro.htm
9. **Fernandez, P.** "Estadística descriptiva de los datos", 2001 referencia a Dawson-Saunders B, Trapp RG. Bioestadística Médica. 2ª ed. México: Editorial el Manual Moderno;1996.
10. <http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/7-Ayuda%20Tablas%20de%20contingencia.pdf>
11. <http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Pantalla/12contin.pdf>
12. <http://www.seh-lilha.org/rlogis1.htm>

ANEXO A

Tabla A1. Resumen de los trabajos de cementación remedial realizados en Caño Limón.

POZO	OPERACIÓN	INTENTOS	DIAS DE COMPLETAMIENTO	FORMACION	ARENA	ESPESOR INTERVALO A AISLAR	PERMEABILIDAD	POROSIDAD
G-03	ÉXITO	1	97	UPPER CARB	C5	8	2.500	23
G-03*	ÉXITO	1	214	LOWER CARB	M1	24	900	15
G-05	ÉXITO	1	310	LOWER CARB	M2+	12	800	19
C-06	ÉXITO	1	4554	UPPER CARB	C5	15	5.000	30
C-12	FRACASO	1	2657	UPPER CARB	C5	18	3.000	26
C-12	FRACASO	2	3169	LOWER CARB	M1	17	2.900	27
C-16	FRACASO	1	2691	LOWER CARB	M1	13	2.500	25
C-24	ÉXITO	1	772	UPPER CARB	C5	11	2.200	25
C-25	ÉXITO	3	2302	LOWER CARB	M1	18	1.600	23
H-10	ÉXITO	3	2247	LOWER CARB	M1	13	1.500	22
H-16	ÉXITO	1	42	UPPER CARB	C5	14	1.500	22
D-03	ÉXITO	3	6131	LOWER CARB	M1	12	4.800	30
D-06	ÉXITO	1	4648	LOWER CARB	M1	8	1.500	24
D-06*	FRACASO	2	4648	LOWER CARB	M1	17	2.000	25
D-50	ÉXITO	1	277	UPPER CARB	C5	14	2.000	30
D-55	ÉXITO	1	132	LOWER CARB	M2+	5	3.000	25
D-72	ÉXITO	1	67	LOWER CARB	M1	10	2.000	22
D-75	ÉXITO	1	155	LOWER CARB	M2+	6	3.000	27
F-09	ÉXITO	1	152	LOWER CARB	M1	10	3.000	22
A-103	ÉXITO	1	1388	UPPER CARB	C5	16	2.500	24
A-120	ÉXITO	2	1398	LOWER CARB	M2+	23	1.100	21
A-124	ÉXITO	1	44	UPPER CARB	C5	13	4.200	30
A-21	ÉXITO	4	5483	KRETACEO	K	29	3.750	27
A-39	ÉXITO	3	5860	KRETACEO	K	4	3.400	28
A-55	FRACASO	1	4416	LOWER CARB	M2+	21	3.100	26
A-55*	FRACASO	1	4416	KRETACEO	K	35	3.400	26
A-58	ÉXITO	1	2264	UPPER CARB	C5	28	2.500	25
A-62	ÉXITO	1	1804	UPPER CARB	C5	11	1.700	23
A-76	ÉXITO	3	1115	UPPER CARB	C5	13	4.000	28
A-91	ÉXITO	1	716	UPPER CARB	C5	7	1.000	27
A-99	ÉXITO	1	185	UPPER CARB	C5	23	1.200	22
B-16	FRACASO	1	280	LOWER CARB	M1	14	2.200	26
B-16	FRACASO	1	280	UPPER CARB	C5	3	3.500	28
B-48	ÉXITO	1	25	UPPER CARB	C5	9	2.000	25
B-51	ÉXITO	1	15	LOWER CARB	M2+	5	700	14
B-53	ÉXITO	1	42	UPPER CARB	C5	10	2.500	22
E-11	ÉXITO	1	1248	UPPER CARB	C5	13	2.500	25
A-110	ÉXITO	1	78	UPPER CARB	C5	9	2.500	25
A-114	ÉXITO	1	1476	LOWER CARB	M2+	10	1.800	24
A-114	ÉXITO	2	78	UPPER CARB	C5	16	2.600	24
B-19	ÉXITO	1	386	KRETACEO	K	5	3.000	28
A-05	FRACASO	1	3977	LOWER CARB	M1	43	4.000	30
B-10	FRACASO	2	393	LOWER CARB	M1	17	3.500	28
B-08	FRACASO	2	3844	KRETACEO	K	73	4.000	29
A-33	FRACASO	3	2787	LOWER CARB	M2+	33	4.500	30
A-53	FRACASO	1	1317	LOWER CARB	M1	16	4.500	30
A-53*	ÉXITO	2	1322	LOWER CARB	M1	28	4.000	29
A-32	FRACASO	4	2393	LOWER CARB	M2+	30	5.000	31
A-60	ÉXITO	1	1270	LOWER CARB	M2+	15	2.000	25
A-12	FRACASO	5	4380	LOWER CARB	M1	19	3.200	28
A-02	ÉXITO	2	2322	LOWER CARB	M1	35	1.900	24
B-11	ÉXITO	2	1914	LOWER CARB	M2+	13	600	24
A-45	ÉXITO	1	489	LOWER CARB	M2+	4	1.500	23
E-03	ÉXITO	2	2209	LOWER CARB	M1	22	700	30
B-19	ÉXITO	1	338	KRETACEO	K2A1S	5	300	23
A-28	ÉXITO	1	418	LOWER CARB	M1	24	1.300	27

POZO	PROD ACUMULADA	TASA DE PRODUCCION MAX	ARENA3	PRESION PRUEBA INYECTIVIDAD	VOLUMEN PRUEBA INYECTIVIDAD	RATA PRUEBA INYECTIVIDAD	DENSIDAD CEMENTO	CEMENTO DENTRO FORMACION
G-03	30.463	800	-	1.300	10	4	14,6	1
G-03*	1.633	300	-	2.029	17	1	14,6	
G-05	562.564	9.300	-	600	15	7	15,8	
C-06	58.185.198	11.000	70	2.100			14,6	
C-12	51.588	1.000	-	130	20	5	14,6	35
C-12	5.174.013	20.000	-	129	20	5	14,6	
C-16	16.452.229	10.000	4	690	13	3	14,6	25
C-24	106.378	1.000	20	110	20	4	14,6	8
C-25	13.339.313	27.000	2.100	400	65	6	14,8	20
H-10	38.333.514	21.500	157	360	70	6	14,8	30
H-16	29.920	1.900	-	2.180	11	1	14,6	3
D-03	30.573.220	18.000	50	178	80	8	14,8	26
D-06	343.099	953	25	100	45	5	14,6	1
D-06*	97.843.929	17.000	25	154	50	8	14,6	30
D-50	115.980	550	500	90	32	5	14,6	32
D-55	150.613	1.700	50	1.400	30	5	14,6	4
D-72	73.418	10.500	500	70	80	5	14,8	22
D-75	26.333	950	1.000	118	53	7	14,8	4
F-09	2.088	1.000	50	920	27	6	14,6	
A-103	1.994.407	1.700	10	40	27	5	14,6	11
A-120	17.691.773	9.250	170	55	50	7	14,8	18
A-124	105.379	1.200	20	90	14	4	14,6	14
A-21	21.394.879	10.500	8	70	25	5	14,8	39
A-39	1.627.836	1.300	180	200	40	9	14,8	11
A-55	27.370.476	11.500	150	-	60	4	14,6	50
A-55*	2.656.028	2.800	150	-	60	4	14,6	50
A-58	113.574	1.400	436	-		3	14,6	33
A-62	375.627	4.300	116	1.400	10	3	16,0	17
A-76	2.946.353	5.000	2.000	400	10	5	14,6	30
A-91	52.156	400	2	1.500	6	1	14,6	12
A-99	22.124	550	1	30	9	3	14,6	38
B-16	-	-	-	87	20	5	14,6	12
B-16	-	-	-	87	20	5	14,6	12
B-48	1.102	800	7	1.600	7	3	14,6	28
B-51	9.822	1.000	-	2.500	27	4	14,6	3
B-53	974	900	20	340	22	1	14,6	7
E-11	1.938.557	2.500	80	80	30	6	14,6	5
A-110	11.249	4.851	5	800	26	0	15,8	8
A-114	4.773	1.583	40	2.200	70	6	15,8	0
A-114	4.773	1.583	40	130	90	7	15,8	37
B-19	1.715.747	7.000	-	13	32	5	15,9	20
A-05	16.635.055	15.000	-	190	45	5	15,9	16
B-10	420.169	3.000	-	-	-	-	14,9	43
B-08	24.112.707	15.000	-	-	9	3	16,0	31
A-33	10.187.971	7.000	-	-	8	3	15,8	15
A-53	8.253.481	10.000	-	-	20	2	15,7	-
A-53*	10.789.350	10.000	-	1.300		2	16,0	19
A-32	32.063.622	18.000	-	80	16	5	16,0	35
A-60	14.144.487	10.500	-	-	-	-	14,5	-
A-12	35.368.808	20.000	-	90	5	2	16,0	-
A-02	12.914.441	18.000	-	26	10	2	16,0	16
B-11	10.684.821	6.000	-	120	17	4	16,0	37
A-45	2.138.612	6.000	-	75	15	3	16,0	30
E-03	29.469.628	8.500	-	770	16	3	16,0	53
B-19	1.728.037	6.700	-	155	13	5	16,0	20
A-28	5.300.985	10.000	-	127	10	4	16,0	19

ANEXO B

Tabla B. Historia de Iteración del modelo de Regresión Logística.

Iteration	-2 Log likelihood	Coefficients														
		Constant	PERMEABILIDAD2(1)	PERMEABILIDAD2(2)	PERMEABILIDAD2(3)	POROSIDAD(1)	RATADERODUCCION MAX2(1)	RATADERODUCCION MAX2(2)	DIAS_COMPLETAMIENTO(1)	DIAS_COMPLETAMIENTO(2)	ESPESORIN TervaloAAI SLAR2(1)	ESPESORIN TervaloAAI SLAR2(2)	ESPESORIN TervaloAAI SLAR2(3)	PRODACUM ULADA2(1)	PRODACUM ULADA2(2)	PRODACUM ULADA2(3)
Step 1	41,971	-1,036	,928	,697	-,030	1,087	1,517	,909	,631	,112	,563	,586	-,490	-1,180	-,695	-,247
2	35,872	-1,472	1,585	,828	-,304	1,903	1,701	1,325	,681	-,141	1,164	1,082	-,567	-1,357	-,424	-,031
3	33,638	-1,837	2,629	,859	-,509	2,623	1,288	1,661	,484	-,618	1,675	1,602	-,508	-,859	,549	,479
4	33,014	-2,051	3,964	,902	-,570	3,055	,927	1,822	,273	-1,087	1,938	1,888	-,459	-,354	1,339	,991
5	32,873	-2,110	5,191	,918	-,576	3,208	,767	1,852	,198	-1,299	2,019	1,955	-,436	-,149	1,633	1,224
6	32,833	-2,116	6,239	,920	-,576	3,228	,743	1,853	,191	-1,327	2,028	1,961	-,434	-,124	1,669	1,256
7	32,819	-2,116	7,248	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
8	32,814	-2,116	8,251	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
9	32,812	-2,116	9,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
10	32,811	-2,116	10,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
11	32,811	-2,116	11,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
12	32,811	-2,116	12,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
13	32,811	-2,116	13,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
14	32,811	-2,116	14,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
15	32,811	-2,116	15,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
16	32,811	-2,116	16,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
17	32,811	-2,116	17,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
18	32,811	-2,116	18,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
19	32,811	-2,116	19,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
20	32,811	-2,116	20,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
21	32,811	-2,116	21,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
22	32,811	-2,116	22,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
23	32,811	-2,116	23,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
24	32,811	-2,116	24,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
25	32,811	-2,116	25,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
26	32,811	-2,116	26,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
27	32,811	-2,116	27,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
28	32,811	-2,116	28,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
29	32,811	-2,116	29,252	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
30	32,811	-2,116	30,253	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
31	32,811	-2,116	31,253	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
32	32,811	-2,116	32,253	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
33	32,811	-2,116	33,253	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
34	32,811	-2,116	34,257	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
35	32,811	-2,116	35,266	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
36	32,811	-2,116	36,254	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
37	32,811	-2,116	37,103	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
38	32,811	-2,116	37,847	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
39	32,811	-2,116	38,892	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
40	32,811	-2,116	40,378	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257
41	32,811	-2,116	40,378	,920	-,576	3,229	,742	1,853	,191	-1,328	2,028	1,961	-,434	-,123	1,671	1,257

- a. Method: Enter
- b. Constant is included in the model.
- c. Initial -2 Log Likelihood: 65,085
- d. Estimation terminated at iteration number 41 because parameter estimates changed by less than ,001.

ANEXO C

Figura C1. Grafica de dispersión - Días de Completamiento. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.

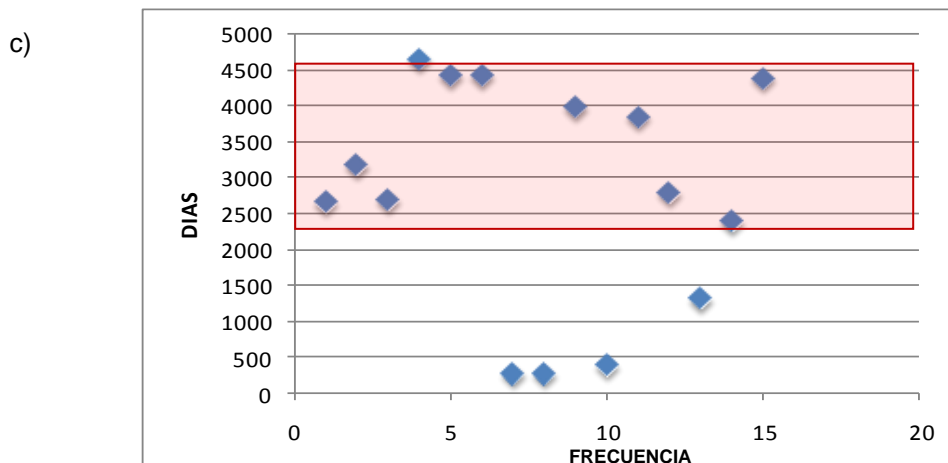
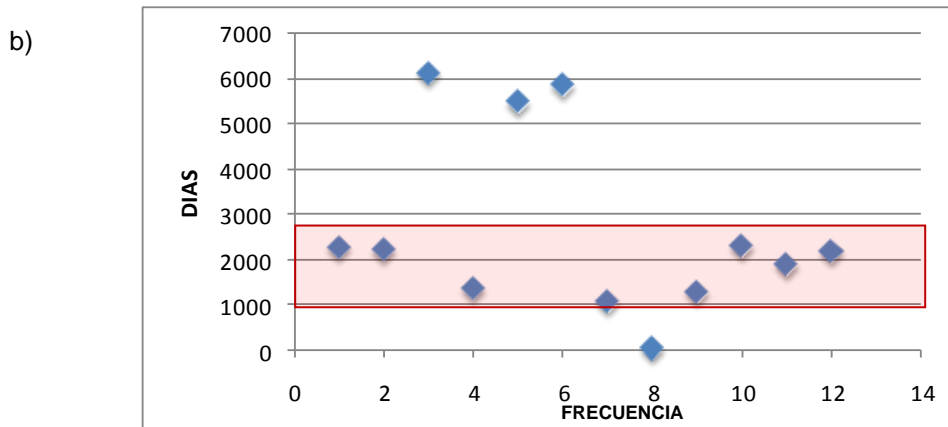
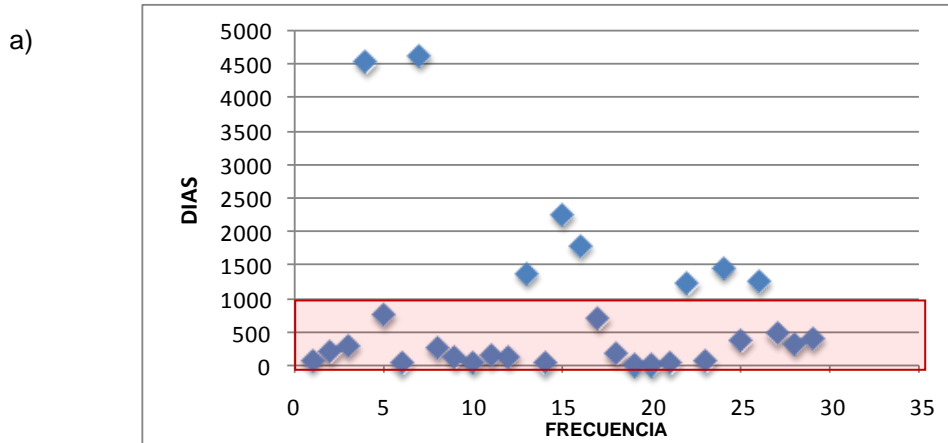
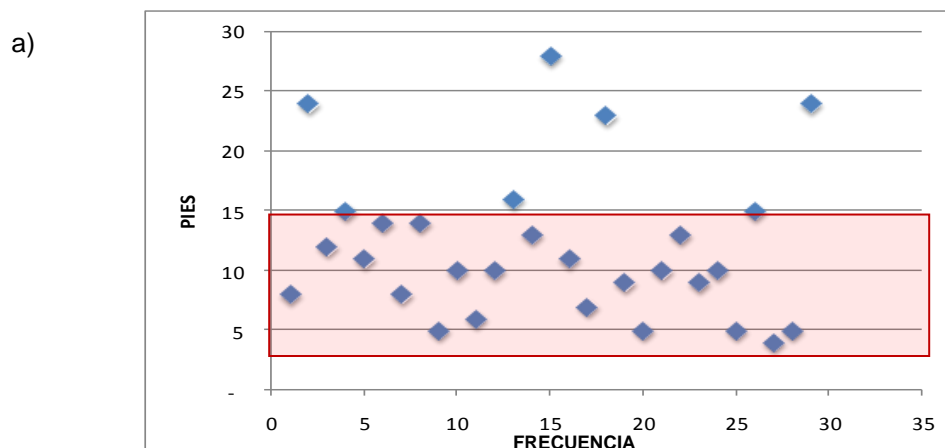


TABLA C1. Análisis descriptivo – Días de Completamiento.

	DIAS DE COMPLETAMIENTO - + DE 1 INTENTO	DIAS DE COMPLETAMIENTO - 1 INTENTO	DIAS DE COMPLETAMIENTO - FRACASO
Núm. de val. min.	1	1	2
% de val. min.	8,333	3,448	13,333
Mínimo	78,000	15,000	280,000
Primer cuartil	1360,000	87,500	1317,000
Mediana	2228,000	310,000	2787,000
Tercer cuartil	3902,500	1259,000	4380,000
Máximo	6131,000	4648,000	4648,000
Media	2698,417	814,000	2776,533

En la grafica C1(a) se puede observar que la mayoría de los trabajos que tuvieron éxito en un intento, que son en la mayoría tipo III llevaban menos de mil días de completado, lo que se puede corroborar con la tabla C1, donde el tercer cuartil es de 1259, lo que indica que el 75% de los datos se encuentran por debajo de este valor. Así mismo se puede observar que en el 75% de los trabajos que presentaron problemas (más de un intento y los que fallaron) tenían más de 3900 días de completado y tan solo el 25% se encontraban por debajo de los 1300 días, es decir que un 50% de los trabajos problemáticos tenían de 1300 a 3900 días de haberse completado.

Figura C2. Grafica de dispersión – Espesor del Intervalo. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.



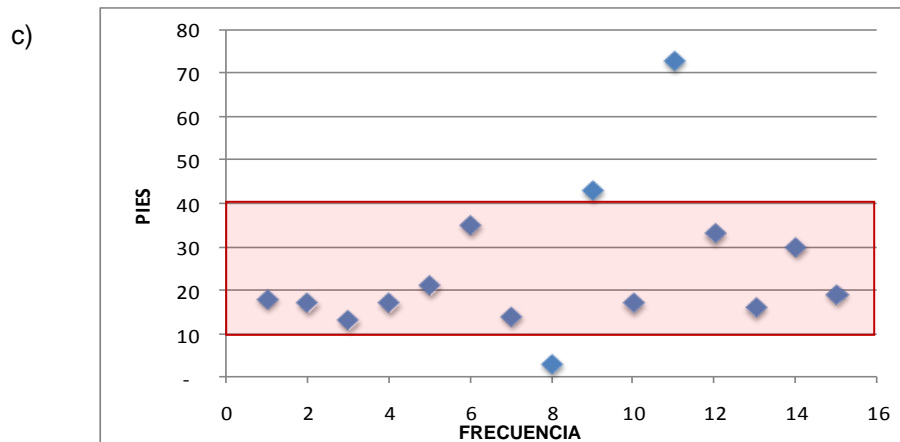
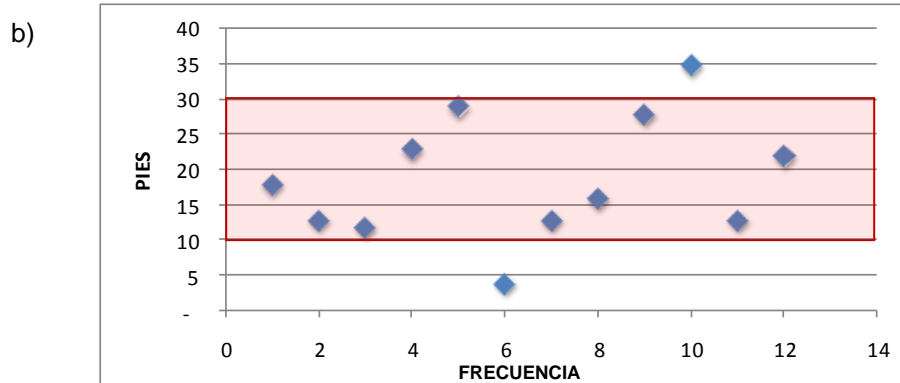


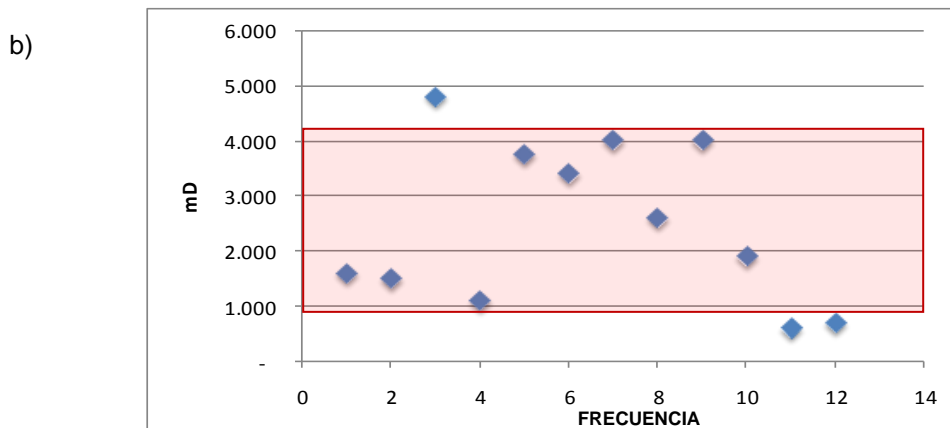
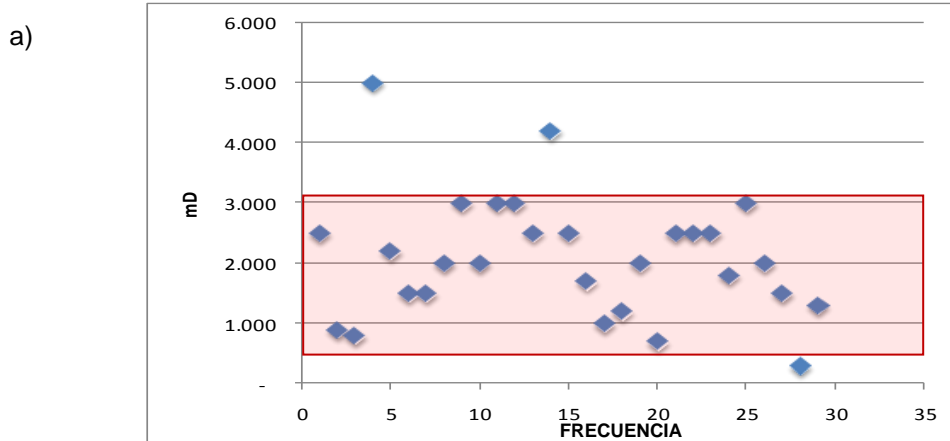
TABLA C2. Análisis descriptivo – Espesor Intervalo a Aislar.

	ESPESOR INTERVALO A AISLAR - + DE 1 INTENTO	ESPESOR INTERVALO A AISLAR - 1 INTENTO	ESPESOR INTERVALO A AISLAR - FRACASO
Núm. de val. min.	1	1	1
% de val. min.	8,333	3,448	6,667
Mínimo	4,000	4,000	3,000
Primer cuartil	13,000	7,500	16,000
Mediana	17,000	10,000	18,000
Tercer cuartil	25,500	14,500	33,000
Máximo	35,000	28,000	73,000
Media	18,833	11,862	24,600

Tanto con la figura C2 como con la tabla C2 se puede concluir que la mayoría de los trabajos exitosos no tuvieron más de 15 pies de espesor, mientras que en la

mayoría de los trabajos donde se tuvo que realizar más de un intento o fallaron tenían un espesor promedio de 25-30 pies.

Figura C3. Grafica de dispersión – Permeabilidad. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.



c)

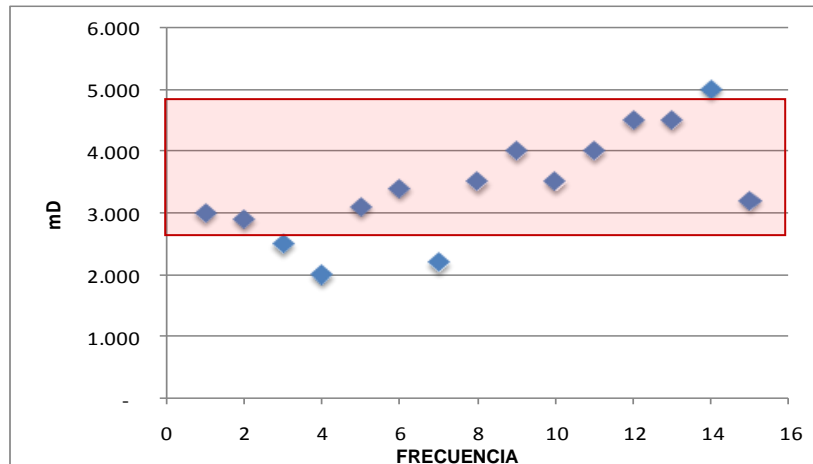
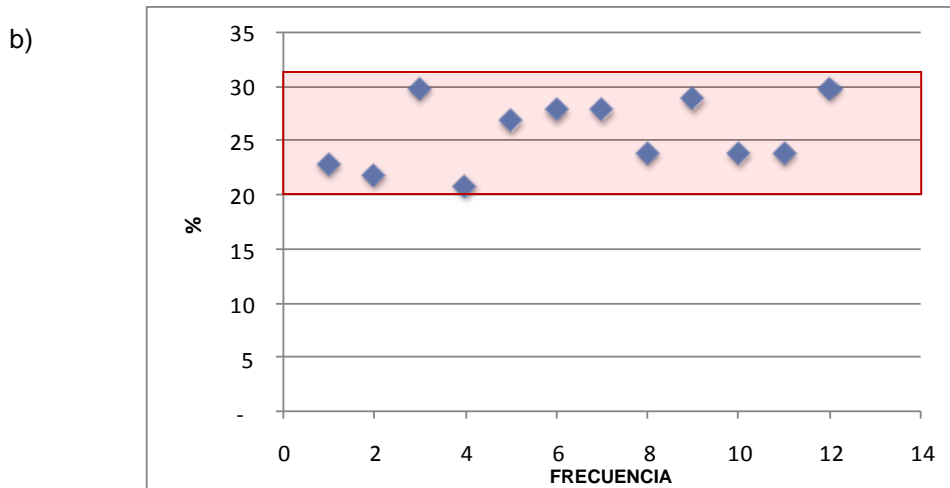
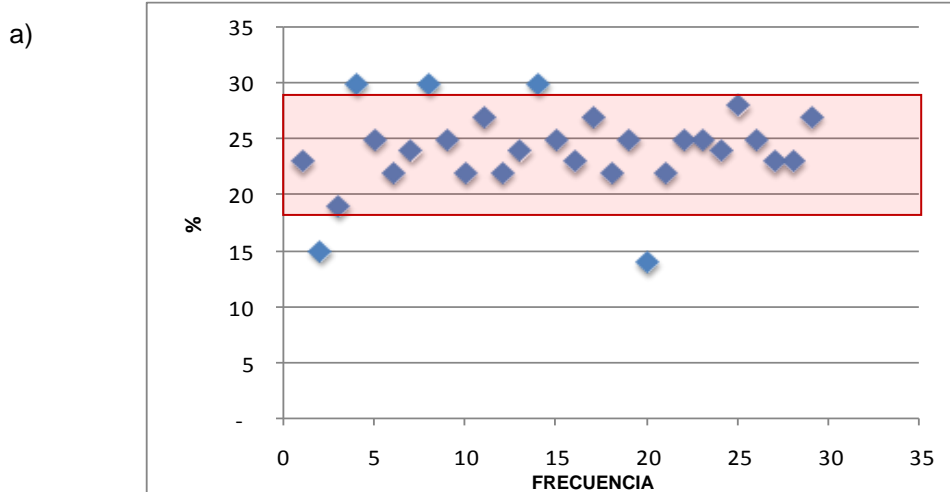


TABLA C3. Análisis descriptivo – Permeabilidad.

	PERMEABILIDAD - + DE 1 INTENTO	PERMEABILIDAD - 1 INTENTO	PERMEABILIDAD - FRACASO
Núm. de val. min.	1	1	1
% de val. min.	8,333	3,448	6,667
Mínimo	600,000	300,000	2000,000
Primer cuartil	1300,000	1500,000	2900,000
Mediana	2250,000	2000,000	3400,000
Tercer cuartil	3875,000	2500,000	4000,000
Máximo	4800,000	5000,000	5000,000
Media	2495,833	2089,655	3420,000

En las figuras de C3 no se puede observar muy bien los rangos, ya que hay bastante dispersión, sin embargo con la tabla C3 se puede concluir que el 75% de los trabajos exitosos realizados en un solo intento tenían una permeabilidad menor a 2500 mD, mientras que el 75% de los trabajos problemáticos estaban por debajo de los 4000 mD y un 25% estaba por debajo de los 2200 mD promedio, es decir se encontraban en un rango de 2200 a 4000 mD aproximadamente.

Figura C4. Grafica de dispersión – Porosidad. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.



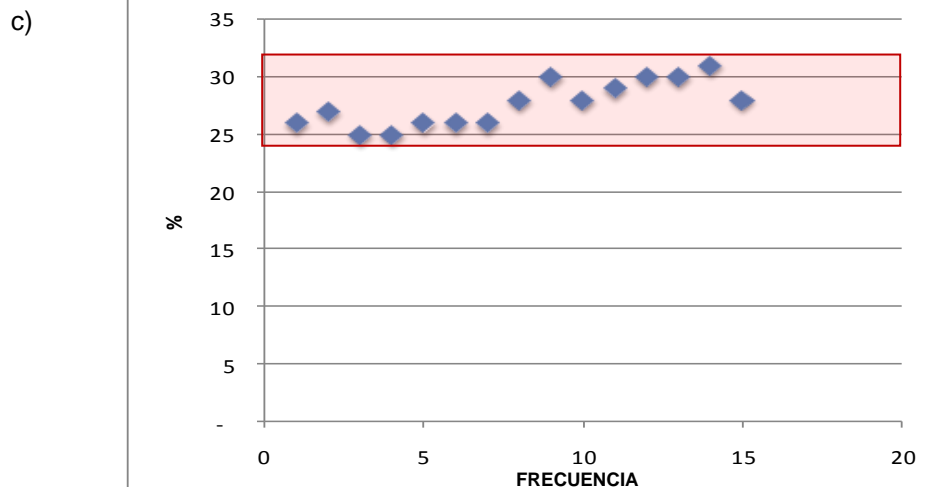


TABLA C4. Análisis descriptivo – Porosidad.

	POROSIDAD - + DE 1 INTENTO	POROSIDAD - 1 INTENTO	POROSIDAD - FRACASO
Núm. de val. min.	1	1	2
% de val. min.	8,333	3,448	13,333
Mínimo	21,000	14,000	25,000
Primer cuartil	23,500	22,000	26,000
Mediana	25,500	24,000	28,000
Tercer cuartil	28,500	26,000	30,000
Máximo	30,000	30,000	31,000
Media	25,833	24,000	27,667

Para determinar el rango de porosidad, las graficas tampoco ayudan mucho, sin embargo se puede observar de la tabla C4 que la media de los trabajos exitosos esta en 24% de porosidad, mientras que en los trabajos con problemas tienen una media de 26-28% aproximadamente.

Figura C5. Grafica de dispersión – Producción Acumulada. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.

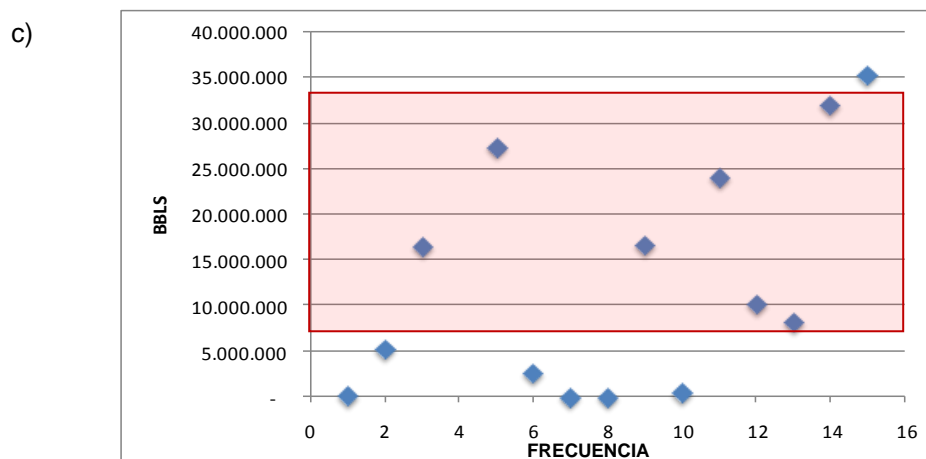
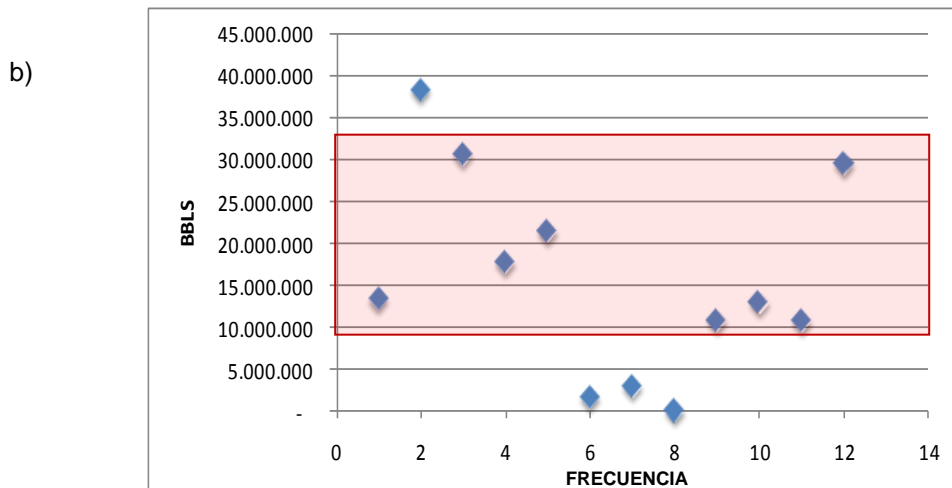
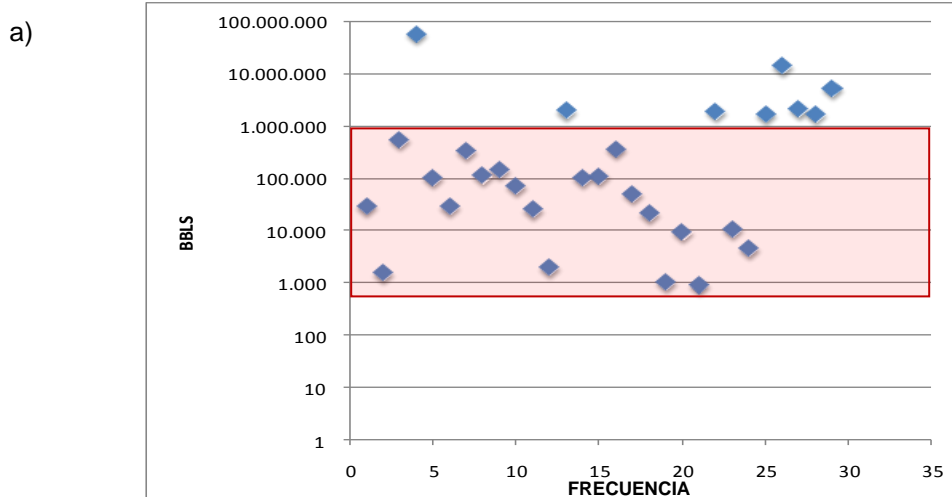
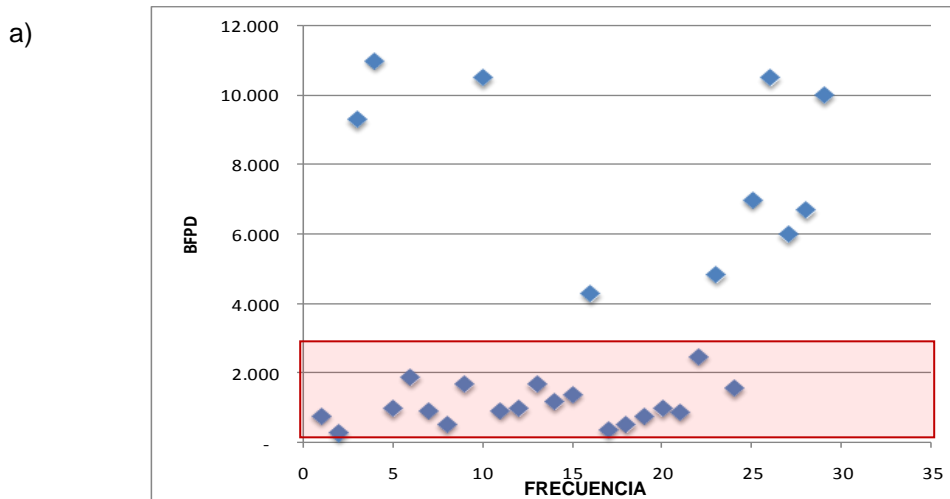


TABLA C5. Análisis descriptivo – Producción Acumulada.

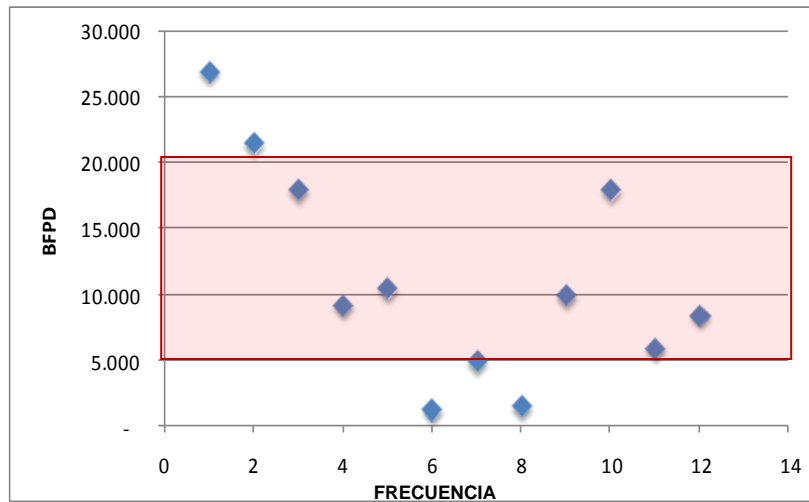
	PROD ACUMULADA - + DE 1 INTENTO	PROD ACUMULADA - 1 INTENTO	PROD ACUMULADA - FRACASO
Núm. de val. min.	1	1	2
% de val. min.	8,333	3,448	13,333
Mínimo	4.772,86	974,00	0,00
Primer cuartil	6.815.587,00	16.686,50	420.169,00
Mediana	13.126.877,00	106.378,00	10.187.971,00
Tercer cuartil	25.432.253,50	1.721.892,00	27.370.476,00
Máximo	38.333.514,00	58.185.198,00	97.843.929,00
Media	15.814.158,41	3.078.803,41	18.439.338,40

Tanto de la figura C5 como la tabla C5 se puede concluir que la mayoría de los trabajos exitosos presentan una producción acumulada de fluidos menor a un millón de barriles, así mismo se puede observar que la mayoría de los trabajos que presentaron problemas tenían una producción acumulada mayor a los diez millones de barriles de fluido.

Figura C6. Grafica de dispersión – Tasa de Producción. a) Exitoso en 1 intento b) Exitoso en más de 1 intento c) Fracaso.



b)



c)

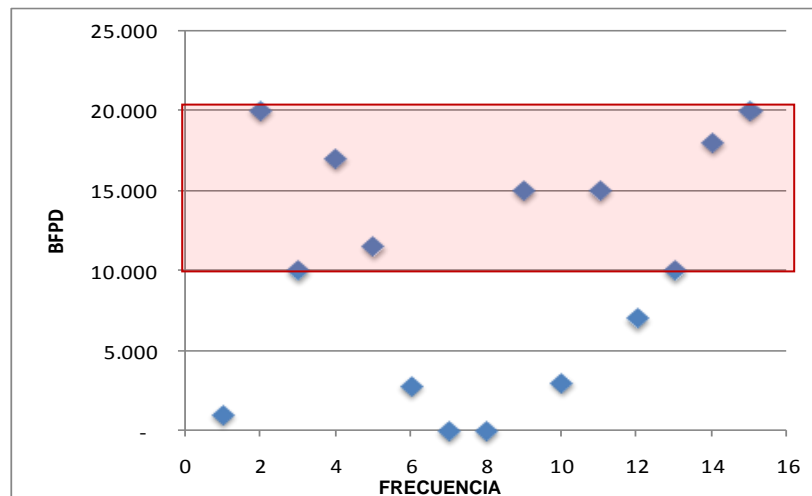


TABLA C6. Análisis descriptivo – Tasa de Producción.

	TASA DE PROD MAX - + DE 1 INTENTO	TASA DE PROD MAX - 1 INTENTO	TASA DE PROD MAX - FRACASO
Núm. de val. min.	1,00	1,00	2,00
% de val. min.	8,33	3,45	13,33
Mínimo	1.300,00	300,00	0,00
Primer cuartil	5.500,00	925,00	2.800,00
Mediana	9.625,00	1.583,00	10.000,00
Tercer cuartil	18.000,00	6.350,00	17.000,00
Máximo	27.000,00	11.000,00	20.000,00
Media	11.386,08	3.494,38	10.020,00

Como se muestra tanto en la figura C6 como en la tabla C6, los trabajos exitosos presentaron tasas de producción menor a los trabajos que presentaron problemas. En la figura se puede observar que la mayoría de los trabajos exitosos presentaron tasas menores a los 3,000 BFPD, mientras que los trabajos exitosos pero que requirieron más de un intento para aislar la zona presentaron tasas de 5,000 a 20,000 BFPD y la mayoría de los trabajos que no se logró aislar la zona presentaron tasas de 10000 a 20,000 BFPD.