

**Desarrollo de un Software Analógico para el Análisis de Aseguramiento de la Etapa de  
Ignición del Proceso de Inyección de aire**

**Paula Viviana Perea Días**

**Yanet Medina Rojas.**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**Eider Niz Velásquez**

**Ph.D en Ingeniería Química y del Petróleo**

**Codirectora**

**Marta Liliana Trujillo Portillo**

**M.Sc en Ingeniería de Hidrocarburos**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2018**

### Dedicatoria

*A Dios por darme la oportunidad de llegar hasta este momento de mi vida, por guiarme y no desampararme en cada paso que daba y por darme la fortaleza necesaria y perseverancia para cumplir mis metas.*

*A mis padres, por ser el motor de mi vida y por el cual pude llegar hasta esta etapa, el amor, la confianza y la comprensión que me brindaron son la clave que me permitieron salir adelante.*

*A mis hermanos en especial Nelson por ser mi apoyo incondicional, por los grandes y sabios consejos que me da, los cuales me ayudan a ser mejor persona cada día.*

*A mis sobrinos, el cual quiero ser un ejemplo e inspiración para ellos, inculcándoles una buena educación y ayudándolos a que cumplan siempre sus metas.*

*A toda mi familia por confiar siempre en mí, en especial a mi tía Alida y abuela Francelina por quererme como a una hija y por brindarme su cariño y colaboración desinteresada.*

*Al profesor Guillermo, por brindarme su confianza y perseverancia para culminar con esta etapa.*

*A Claudia, por ser mi amiga incondicional, por apoyarme toda la vida a seguir adelante y por estar siempre conmigo a pesar de la distancia.*

*A Mayerly por ser esa amiga fiel, comprensiva y amorosa, por sus buenos consejos y por la alegría que me trasmite en cada momento y a Isabella que ha traído felicidad a mi vida.*

*A Paula por su cariño, comprensión, apoyo y por toda la paciencia durante la elaboración de este proyecto.*

*A todos mis amigos que me han acompañado en esta travesía y que de un modo u otro me han apoyado en cada momento.*

**Yanet Medina**

### Dedicatoria

*Quiero dedicar este momento de mi vida en primer lugar a Dios por darme salud y fortaleza para afrontar cada momento de mi vida.*

*A mis padres Nelson y Rubiela, porque me han brindado su cariño y amor, por ser esas personas incondicionales en mi vida, Gracias por darme la oportunidad de estudiar y enseñarme que en la vida no hay imposibles, este logro es por ustedes y para ustedes porque sé como trabajan de sol a sol para brindármelo todo.*

*A mis hermanos y a Daniel por ser mi compañía y apoyo durante todos estos años.*

*A mi segunda madre Marina por enseñarme que a la vida se le pone cara dura ante cualquier circunstancia, gracias por enseñarme el valor que tiene la vida y darme ejemplo.*

*A mis abuelos Sara y Lorenzo por ser mi inspiración de superación, gracias abuelitos por darme ejemplo de vida y cariño.*

*A mi Escuela Normal Superior, porque fue el lugar donde me formé con valores éticos y morales.*

*A mis compañeros con los que inicié clases en Socorro porque cada uno de ellos aportó un granito de arena en mí, en especial a Yanet por su compromiso con este trabajo el cual es importante para mi vida como estudiante y futura profesional.*

***Paula Perea***

### **Agradecimientos**

Al ingeniero Eider Niz por su colaboración, supervisión e interés durante el transcurso de este proyecto.

A la ingeniera Marta Trujillo por su guía, colaboración y disposición en la co-dirección de este proyecto de investigación.

Al Instituto Colombiano del Petróleo por toda la información y guía en este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por permitirnos adquirir los conocimientos necesarios en cada una de las áreas de formación de esta carrera.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	23
1. Combustión In Situ .....	25
1.1 Reacciones de Combustión In Situ .....	27
1.1.1 Reacciones de oxidación a baja temperatura. ....	28
1.1.2 Reacciones de temperatura intermedia. ....	28
1.1.3 Reacciones de oxidación a altas temperaturas. ....	29
1.2 Ignición .....	29
1.2.1 Ignición espontánea. ....	30
1.2.2 Ignición asistida. ....	32
1.2.3 Mecanismos de ignición asistida .....	32
1.2.3.1 Calentadores eléctricos .....	32
1.2.3.2 Quemadores a gas .....	34
1.2.3.3 Inyección de fluidos calientes .....	36
1.2.3.4 Inyección química.....	37
1.3 Tipos de combustión .....	40
1.3.1 Combustión convencional.....	40
1.3.1.1 Combustión seca .....	40
1.3.1.2 Combustión húmeda .....	42

---

1.3.2 Combustión inversa. ....	45
1.4 Variables para tener en cuenta en el desarrollo de la etapa de ignición .....	46
2. Análisis de los problemas presentes durante la etapa de ignición .....	48
2.1 Balaria.....	49
2.1.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Balaria.....	50
2.1.2 Métodos para detectar la ignición .....	51
2.2 Balol .....	51
2.2.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Balol.....	52
2.2.2 Métodos para detectar la etapa de ignición en el campo Balol.....	53
2.3 Bellevue .....	54
2.3.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Bellevue .....	55
2.3.2 Métodos para detectar la etapa de ignición en campo .....	56
2.4 Carlyle.....	56
2.4.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	58
2.5 Cold Lake.....	58
2.5.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Cold Lake.....	59
2.5.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	60
2.6 East Venezuela.....	61
2.6.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo East Venezuela.....	61
2.6.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	63
2.7 Kramai.....	63
2.7.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Kramai .....	64
2.7.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	64

---

2.8 Kyrock.....	65
2.8.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Kyrock .....	65
2.8.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	67
2.9 Midway Sunset.....	67
2.9.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Midway Sunset (1960).....	68
2.9.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	69
2.10 Miga .....	70
2.10.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Miga.....	71
2.10.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	72
2.11 North Tisdale .....	72
2.11.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo North Tisdale .....	73
2.11.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	74
2.12 Pauls Valley .....	74
2.12.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Pauls Valley .....	75
2.12.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	76
2.13 Pontotoc .....	76
2.13.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Pontotoc .....	77
2.13.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	78
2.14 Santhal.....	79
2.14.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Santhal .....	79
2.14.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	80
2.15 South Hospah .....	81
2.15.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo South Hospah.....	81

2.16 Suplacu de Barcau.....	83
2.16.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Suplacu de Barcau .....	84
2.16.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	85
2.17 Tia Juana.....	85
2.17.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Tia Juana.....	86
2.18 Videle.....	87
2.18.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Videle.....	87
2.18.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	89
2.19 West Casa Blanca .....	89
2.19.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo West Casa Blanca .....	90
2.19.2 Métodos para detectar la etapa de ignición.....	91
2.20 Rangos de propiedades con mayor impacto en los problemas operacionales .....	91
2.21 Rangos de las propiedades con mayor impacto en los tipos de ignición.....	101
2.22. Resumen estadístico de los métodos de ignición en la literatura.....	108
3. Análisis y metodología del desarrollo del Software D.I.S.....	111
3.1 Bases de datos relacionales para el desarrollo del software D.I.S.....	113
3.1.1 Diseño de las bases de datos relacionales.....	114
3.2 Python para el diseño del software .....	115
3.3 Módulo de analogías.....	118
3.3.1 Método del valor promedio.....	120
3.3.2 Método de Jaccard modificado .....	120
3.4 Aplicaciones del Software D.I.S.....	122
3.4.1 Información.....	123

3.4.2 Analogías .....	123
4. Caso de estudio .....	125
5. Conclusiones .....	138
6- Recomendaciones .....	140
Referencias bibliográficas.....	141
Apéndices.....	148

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Zonas de Combustión in Situ. ....	27
Figura 2. Diagrama de un calentador eléctrico .....	34
Figura 3. Diagrama de un calentador a gas.....	35
Figura 4. Diagrama esquemático de la recuperación del petróleo por combustión seca. ....	42
Figura 5. Diagrama esquemático de las principales características de la combustión húmeda y seca.....	44
Figura 6. Diferentes zonas formadas durante la combustión inversa. ....	45
Figura 7. Número de campos evaluados .....	48
Figura 8. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas.....	92
Figura 9. Variación de la porosidad de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas. ....	92
Figura 10. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas.....	92
Figura 11. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión .....	94
Figura 12. Variación de la presión del yacimiento al inicio del proyecto de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión.....	94

Figura 13. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión .....	94
Figura 14. Variación de la permeabilidad de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión .....	95
Figura 15. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías .....	96
Figura 16. Variación de la permeabilidad de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías .....	96
Figura 17. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías .....	97
Figura 18. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías .....	97
Figura 19. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta aumento de la presión de inyección .....	98
Figura 20. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta aumento de la presión de inyección .....	99
Figura 21. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas.....	100
Figura 22. Variación de la porosidad de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas.....	100
Figura 23. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas.....	100

Figura 24. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta ignición espontánea.....	102
Figura 25. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta ignición espontánea.....	102
Figura 26. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta la ignición asistida .....	104
Figura 27. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta ignición asistida.....	104
Figura 28. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta ignición asistida .....	104
Figura 29. Frecuencia del tipo de ignición.....	108
Figura 30. Frecuencia del tipo de ignición asistida.....	109
Figura 31. Frecuencia del tipo de combustión .....	109
Figura 32. Frecuencia de la ignición espontánea según el tipo de combustión .....	110
Figura 33. Frecuencia de la ignición asistida según el tipo de combustión .....	111
Figura 34. Parámetros analógicos. ....	113
Figura 35. Diagrama de flujo del Software D.I.S. ....	124
Figura 36. Ejecución de las analogías según las ponderaciones establecidas por el software....	126
Figura 37. Resultado de analogías según las ponderaciones establecidas por el sistema.....	126
Figura 38. Resultado de analogías con un porcentaje del 30% en la profundidad .....	127
Figura 39. Resultado de analogías con un porcentaje del 25% en la temperatura del yacimiento .....	128
Figura 40. Resultado de analogías con porcentaje del 30% en la presión del yacimiento .....	128
Figura 41. Resultado de analogías con porcentaje del 25% en la porosidad y permeabilidad ....	129

Figura 42. Resultado de analogías con porcentaje de 25% en el espesor y 15% en la permeabilidad.....	130
Figura 43. Resultado de analogías con 25% en espesor y 15% en permeabilidad .....	130
Figura 44. Problemas presentados en los campos análogos .....	132
Figura 45. Variación de los parámetros del campo bajo estudio según los problemas presentados en los campos análogos.....	132
Figura 46. Comparación de los parámetros cuyos campos análogos presentaron problemas en la etapa de ignición .....	133
Figura 47. Variación de los parámetros del campo bajo estudio según el tipo de ignición desarrollado en los campos análogos.....	136
Figura 48. Problemas presentados según el tipo de ignición desarrollado .....	137

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Sustancias pirofóricas sugeridos por diferentes autores .....	36
Tabla 2. Resumen de los resultados de las pruebas PDSC en ignición asistida por productos químicos a 4.136 kPa .....	38
Tabla 3. Resumen de los resultados de las pruebas PDSC en ignición asistida por productos químicos a 4.136 kPa .....	39
Tabla 4. Propiedades del campo Balaria.....	49
Tabla 5. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Balaria .....	50
Tabla 6. Problemas y soluciones presentadas .....	50
Tabla 7. Propiedades del campo Balol 1 y Balol 2 .....	51
Tabla 8. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Balol .....	52
Tabla 9. Problemas y soluciones del campo Balol .....	53
Tabla 10. Propiedades del campo Bellevue .....	54
Tabla 11. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Bellevue (1963).....	55
Tabla 12. Problemas y soluciones del campo Bellevue.....	55
Tabla 13. Propiedades del campo Carlyle.....	56
Tabla 14. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Carlyle.....	57
Tabla 15. Problemas y soluciones en el campo Carlyle.....	58
Tabla 16. Propiedades del campo Cold Lake.....	58
Tabla 17. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Cold Lake.....	59
Tabla 18. Problemas y soluciones en el campo Cold Lake.....	59
Tabla 19. Propiedades del campo East Venezuela.....	61
Tabla 20. Propiedades de la etapa de ignición en el campo East Venezuela.....	61
Tabla 21. Problemas y soluciones en el campo East Venezuela.....	62
Tabla 22. Propiedades del campo Kramai .....	63

Tabla 23. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Kramai.....	64
Tabla 24. Problemas y soluciones en el campo Kramai .....	64
Tabla 25. Propiedades del campo Kyrock .....	65
Tabla 26. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Kyrock.....	66
Tabla 27. Problemas y soluciones en el campo Kyrock .....	66
Tabla 28. Propiedades del campo Midway Sunset (1960).....	67
Tabla 29. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Midway Sunset (1960).....	68
Tabla 30. Problemas y soluciones en el campo Midway Sunset (1960).....	69
Tabla 31. Propiedades del campo Miga.....	70
Tabla 32. Propiedades de la etapa de ignición del campo Miga.....	71
Tabla 33. Problemas y soluciones en el campo Miga.....	71
Tabla 34. Propiedades del campo North Tisdale .....	72
Tabla 35. Propiedades de la etapa de ignición en el campo North Tisdale .....	73
Tabla 36. Problemas y soluciones en el campo North Tisdale .....	74
Tabla 37. Propiedades del campo Pauls Valley .....	75
Tabla 38. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Pauls Valley .....	75
Tabla 39. Problemas y soluciones presentados en el campo Pauls Valley .....	76
Tabla 40. Propiedades del campo Pontotoc .....	77
Tabla 41. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Pontotoc .....	77
Tabla 42. Problemas y soluciones presentados en el campo Pontotoc .....	78
Tabla 43. Propiedades del campo Santhal .....	79
Tabla 44. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Santhal.....	80
Tabla 45. Problemas y soluciones en el campo Santhal .....	80
Tabla 46. Propiedades del campo South Hospah.....	81
Tabla 47. Propiedades de la etapa de ignición en el campo South Hospah.....	82
Tabla 48. Problemas y soluciones en el campo South Hospah.....	82
Tabla 49. Propiedades del campo Suplacu de Barcau .....	83
Tabla 50. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Suplacu de Barcau.....	84
Tabla 51. Problemas y soluciones presentados en el campo Suplacu de Barcau .....	84
Tabla 52. Propiedades del campo Tia Juana.....	86
Tabla 53. Problemas y soluciones en el campo Tia Juana.....	86

Tabla 54. Propiedades del campo Videle.....	87
Tabla 55. Propiedades de la etapa de ignición en el campo Videle.....	88
Tabla 56. Problemas y soluciones presentes en el campo Videle.....	88
Tabla 57. Propiedades del campo West Casa Blanca .....	89
Tabla 58. Propiedades de la etapa de ignición en el campo West Casa Blanca .....	90
Tabla 59. Problemas y soluciones en el campo West Casa Blanca .....	90
Tabla 60. Aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo (n=6). .....	91
Tabla 61. Mala distribución y eficiencia del frente de combustión (n=7). .....	93
Tabla 62. Fallas en el revestimiento y tuberías (n=3). .....	95
Tabla 63. Aumento de la presión de inyección (n=3). .....	98
Tabla 64. Aumento en la producción de arena (n=3). .....	99
Tabla 65. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición espontánea (n=11). .....	101
Tabla 66. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición asistida (n=18) .....	103
Tabla 67. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por calentadores eléctricos (n=9). .....	105
Tabla 68. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por quemadores de gas (n=10). .....	106
Tabla 69. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por inyección química (n=1). .....	106
Tabla 70. Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por calentadores catalíticos (n=2). .....	107
Tabla 71. ....	121
Tabla 72. Parámetros analógicos del campo bajo estudio .....	125

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Recopilación de los problemas generados durante la etapa de ignición.....	148
Apéndice B: Manual de usuario del software D.I.S.....	150

## Resumen

**TÍTULO:** DESARROLLO DE UN SOFTWARE ANALÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE ASEGURAMIENTO DE LA ETAPA DE IGNICIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AIRE\*

**AUTORES:** YANET MEDINA ROJAS & PAULA VIVIANA PEREA DIAZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** combustión in situ, analogías, ignición, problemas en la ignición, software D.I.S.

### DESCRIPCIÓN:

La combustión in situ (CIS) es un método de recobro mejorado que consiste en la inyección de un compuesto oxigenado (por lo general aire), alternado en algunos casos con agua. Este proceso tiene como objetivo disminuir la viscosidad del crudo para mejorar su movilidad y así, junto a mecanismos de desplazamiento por gas de combustión, agua caliente y vapor, aumentar el factor de recobro. Este método ha sido estudiado extensivamente en laboratorio, obteniendo buenos resultados y metodologías para su caracterización. Sin embargo, las implementaciones en campo llevadas a cabo en masa entre las décadas de 1970 y 1980 dejaron una gran cantidad de dudas debido a los problemas que se presentaron durante su ejecución. Muchas de las dificultades presentadas se derivaron de la imposibilidad de lograr con éxito la ignición. Estudiar los factores que alteran esta etapa se convierte, entonces, en un tema importante para la implementación futura de este método de recobro.

El presente trabajo está enfocado en la revisión de las diversas aplicaciones del proceso de inyección de aire en campos de crudo pesado a nivel mundial, específicamente de la etapa de ignición, con el objetivo de alimentar una base de datos que se pueda consultar a través de un software analógico. Esta herramienta permitirá agilidad en el estudio de los problemas operacionales que se pueden presentar durante la ignición y las alternativas de solución de estos. Adicionalmente, mediante un proceso analógico, se podrá identificar el tipo de ignición más apropiado para un campo bajo estudio, por medio de la determinación de los campos análogos, junto con el análisis del tipo de ignición que se empleó en estos campos y sus resultados asociados.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Eider Niz Velásquez, Ph.D Codirectora. Marta Liliana Trujillo Portillo

## Abstract

**TITLE:** DEVELOPMENT OF AN ANALOG SOFTWARE FOR THE ASSURANCE ANALYSIS OF THE IGNITION STAGE OF THE AIR INJECTION PROCESS\*

**AUTHORS:** YANET MEDINA ROJAS & PAULA VIVIANA PEREA DIAZ\*\*

**KEYWORDS:** combustion in situ, ignition, problems in the ignition, analogy, software D.I.S.

### DESCRIPTION:

In situ combustion (ISC) is an improved oil recovery method that involves the injection of an oxygenated compound (usually air), alternated in some cases with water. The objective of this process is to reduce the viscosity of the crude oil to improve its mobility and thus, along with displacement mechanisms of flue gas, hot water, and steam flooding, to increase the recovery factor. This method has been studied extensively in the laboratory, obtaining good results and methodologies for its characterization. However, field implementations carried out in masse between the 1970s and the 1980s left a great deal of doubt due to the problems that arose during execution. Many of the difficulties presented were derived from the impossibility of successfully achieving ignition. Studying the factors that alter this stage becomes, then, an important issue for the future implementation of this recovery method.

The present work is focused in reviewing the applications of the ISC process in heavy oil fields worldwide, specifically at the ignition stage, with the objective of feeding a database that can be consulted through an analog software. This tool will allow agility in the study of the operational problems that may occur during the ignition and their solution alternatives. Additionally, by means of an analogical process, it will be possible to identify the most appropriate type of ignition for a field under study, by means of the determination of the analogous fields, together with the analysis of the type of ignition that was used in them and their associated results.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Eider Niz Velásquez, Ph.D  
Codirectora Marta Liliana Trujillo Portillo

## Introducción

Actualmente la mayor parte de reservas de petróleo en el mundo son representadas por crudo pesado, es decir, con una gravedad API baja y alta viscosidad, lo que genera dificultad para su extracción, transporte y comercialización (Riva & Atwater, 2016). En consecuencia, es necesario el uso de métodos de recuperación que logren alterar las características y propiedades ya sea de la roca o del fluido. Al conjunto de dichos métodos se les conoce como Recobro Mejorado, EOR por sus siglas en inglés, cuyo objetivo principal es aumentar el Factor de recobro de crudo.

Los métodos de recobro mejorado involucran el uso de químicos, gases y energía térmica (Omar *et al*, 2010). Los métodos térmicos buscan aumentar la temperatura promedio del yacimiento, disminuyendo la viscosidad y densidad del crudo, mejorando la relación de movilidad y aumentando su recuperación. Tales métodos son: la inyección de vapor, de agua caliente y la generación de energía térmica por medio de la combustión del petróleo en el yacimiento (Omar *et al*, 2010).

La Combustión In Situ consiste básicamente en inyectar aire comprimido al yacimiento y así quemar una fracción del crudo presente para liberar calor. Esta porción es aproximadamente el 10%, y corresponde a la fracción más pesada y de menor valor comercial denominada “coque” (Awoleke, 2007). Este proceso exotérmico aumenta la temperatura en el yacimiento, facilitando el desplazamiento del crudo hacia los pozos productores, mejorando así la eficiencia de barrido.

El proceso de CIS se ha visto limitado debido a los diversos problemas que se han presentado, como: dificultad en el control del frente de combustión, generación de emulsiones, efectividad en

el proceso de ignición de la combustión, entre otros (Arias & Rodriguez, 2013). La ignición es una de las etapas más importantes de la CIS, debido a que involucra los procesos reactivos ocurridos desde el contacto del material oxidante con el crudo hasta el momento en que se obtiene un frente de reacción de alta temperatura (HTO) estable en el yacimiento de interés (Fajardo, 2016).

El presente trabajo está enfocado en la revisión de las diversas aplicaciones del proceso de inyección de aire en campos de crudo pesado a nivel mundial, específicamente de la etapa de ignición, con el objetivo de alimentar una base de datos que se pueda consultar a través de un software analógico. Esta herramienta permitirá agilidad en el estudio de los problemas operacionales que se pueden presentar durante la ignición y las alternativas de solución de estos. Adicionalmente, mediante un proceso analógico, se podrá identificar el tipo de ignición más apropiado para un campo bajo estudio, por medio de la determinación de los campos análogos, junto con el análisis del tipo de ignición que se empleó en estos campos y sus resultados asociados.

En el primer capítulo se establecen las generalidades del proceso de Combustión In Situ y las etapas que presenta este proceso, haciendo énfasis en la ignición. El segundo capítulo describe los problemas encontrados en el desarrollo de la ignición en los diferentes campos en donde se ha implementado el método de CIS, las soluciones planteadas para mitigar dichos problemas y los parámetros que influyen en esta etapa.

El tercer capítulo hace referencia a la metodología empleada para la programación del software analógico, cuyo resultado facilita la visualización de las propiedades afectadas en esta etapa, los problemas que se tienden a generar y las soluciones empleadas para cada caso.

En el cuarto capítulo se implementa la metodología a un campo colombiano de crudo pesado, se realiza el análisis de la etapa de ignición y se emiten recomendaciones.

## 1. Combustión In Situ

La CIS es un proceso de recobro térmico utilizado para disminuir la viscosidad de un crudo pesado dentro del yacimiento, mejorar su movilidad y ejercer un empuje combinado por parte del gas de combustión y el agua destilada de las zonas quemadas, en forma de vapor y agua caliente.

Este método consiste en inyectar aire o un compuesto oxigenado a la capacidad del compresor o a las presiones máximas permisibles dentro de la formación productora. Una vez el gas en el yacimiento haya hecho contacto con el crudo, se desencadenará una serie de reacciones que permitirán la liberación de calor, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos oxigenados y agua, generando un frente de combustión que se propagará a lo largo de la formación productora. La conjunción de estos elementos permitirá la disminución en la viscosidad del crudo y un empuje combinado, que redundará en eficiencias volumétricas y de desplazamiento considerables. Este proceso también es denominado *fireflooding* o inyección de fuego, utilizado para connotar el desplazamiento de un frente de combustión en la formación (Awoleke, 2007).

Un conjunto de zonas se establece cerca de los pozos de inyección y se propagan a través de la formación mediante la inyección de aire de forma continua. Las zonas formadas en el yacimiento explicadas a continuación son reflejadas en la figura 1:

- Zona quemada (1): El frente de combustión ya se ha presentado en esta zona, resultando en un volumen libre de agua y aceite, debido al desplazamiento o la quema de estos.
- Zona de combustión (2): En esta zona el oxígeno reacciona con el combustible depositado, liberando gran cantidad de energía y elevando la temperatura de la formación.

- Zona de coquización (3): Como resultado de las altas temperaturas originadas en la zona de combustión, la fracción más pesada del crudo que no se vaporizó, ni se desplazó para su condensación, presentará un cambio químico denominado pirólisis. Este permite el suministro de coque o combustible sólido en la roca para llevar a cabo el desarrollo del frente de combustión de manera estable.
- Zona de condensación (4): La fracción más liviana del crudo que fue liberada en las zonas anteriores, se condensará y mezclará con el crudo original, mejorando el desplazamiento a través de la formación debido a una reducción de su viscosidad.
- Zona de agua (5): A medida que el agua producto de combustión y el agua vaporizada de las zonas de más alta temperatura va transfiriendo calor al medio, se forman dos zonas distintivas: la de vapor saturado, que transfiere calor latente, y la de agua caliente, que transfiere calor sensible, hasta acabar como un desplazamiento con agua a la temperatura de formación.
- Zona de aceite (6): zona móvil, donde se ha acumulado la mayor parte de aceite desplazado de las zonas aguas arriba.
- Zona inalterada (7): en esta zona, parte de la formación del yacimiento permanece intacta, aunque se presenta un aumento en la saturación del gas, pero las propiedades del yacimiento no presentan cambios significativos.

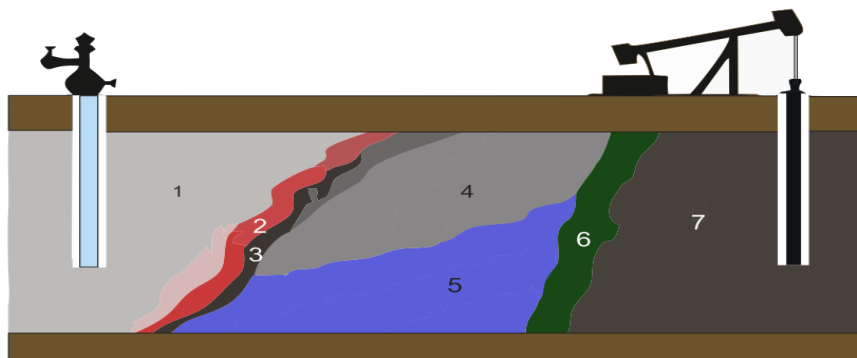


Figura 1. Zonas de Combustión in Situ.

Adaptado de Awoleke, O. (2007). An experimental investigation of in-situ combustion in heterogeneous media.

### 1.1 Reacciones de Combustión In Situ

La combustión in situ cuenta con numerosas reacciones químicas que son producidas a diferentes escalas de temperatura. Para su estudio, estas reacciones son agrupadas en tres clases: las reacciones de adición, también denominadas como oxidación a baja temperatura (Régimen LTO), reacciones de temperatura intermedia (ITO), que son reacciones de pirólisis y *cracking* térmico, y las reacciones de rompimiento de enlaces, que corresponden a oxidaciones a alta temperatura (Régimen HTO) (Berzaba, Collado, & Alberto, 2012).

La ignición de un proceso de combustión in situ involucra los procesos reactivos ocurridos desde el contacto del material oxidante con el crudo hasta el momento que se obtiene un frente de reacciones en régimen HTO estable en el yacimiento de interés. Esta fase ocurre si se logra un aumento sostenido de temperatura en la zona cercana al pozo inyector hasta alcanzar una temperatura superior a los 700 °F, como resultado de las reacciones iniciales del proceso (régimen LTO). Por encima de los 700 °F se considera que se da inicio a las reacciones de oxidación a alta temperatura (Berzaba *et al.*, 2012); este aumento de temperatura muestra que la liberación de

energía fruto de las reacciones exotérmicas supera las pérdidas que el sistema puede tener, permitiendo así el desarrollo de esta fase.

**1.1.1 Reacciones de oxidación a baja temperatura.** Estas reacciones ocurren cuando el oxígeno inyectado se adiciona a las moléculas del crudo a temperaturas desde la inicial del yacimiento, y paulatinamente incrementando a medida que se libera calor, en la mayoría de los casos hasta temperaturas inferiores a los 400°F, dependiendo de la composición del aceite.

Factores como la condensación de componentes de bajo peso molecular, el incremento del contenido de asfaltenos del aceite y el aumento de la viscosidad del petróleo, están presentes en el transcurso de este régimen de reacción, disminuyendo drásticamente la movilidad del crudo pesado. Sin embargo, para crudos livianos este tipo de reacciones no afectan drásticamente su movilidad. Un hecho positivo es que estas reacciones son exotérmicas y se caracterizan por la producción de agua e hidrocarburos parcialmente oxigenados como: ácidos carboxílicos, cetonas, aldehídos, alcoholes e hidroperóxidos, los cuales contribuyen con el aumento del contenido de combustible, sustentan las reacciones de craqueo y proporcionan la energía suficiente para lograr el desarrollo de las reacciones del régimen HTO (Burger, J. G., Sahuquet, B. C. 1972).

Una forma para evidenciar el éxito del desarrollo de estas reacciones es determinada por el incremento del oxígeno consumido debido a la generación de óxidos de carbono.

**1.1.2 Reacciones de temperatura intermedia.** Son reacciones endotérmicas y homogéneas que ocurren desde los 400 °F hasta los 600 °F. El consumo de oxígeno en este régimen de reacción es bajo, lo cual sugiere que el tren de reacciones predominante no requiere de oxígeno, y que el poco consumo observado representa una continuidad a menor escala del LTO y el inicio del HTO.

A medida que la temperatura asciende en el yacimiento, el aceite presenta cambios asociados con el proceso de pirólisis (Berzaba *et al.*, 2012), ocurriendo una depositación de coque y carbón pesado, los cuales son las fuentes principales para la combustión propiamente dicha.

**1.1.3 Reacciones de oxidación a altas temperaturas.** Este tipo de reacciones alcanzan temperaturas superiores a los 700°F, dependiendo de la reactividad del crudo y de las condiciones generales del caso de estudio. Son reacciones exotérmicas en las cuales el aire inyectado reacciona con el coque, liberando óxidos de carbono ( $CO$  y  $CO_2$ ), agua y energía, los cuales son suficientes para propagar el frente de combustión de forma más estable, disminuyendo de esta manera la viscosidad del crudo y aumentando la movilidad del mismo (Berzaba *et al.*, 2012).

## 1.2 Ignición

La ignición es la etapa inicial del proceso de combustión in situ, e involucra los procesos reactivos ocurridos desde el contacto del material oxidante con el crudo hasta la generación y estabilización del frente de combustión.

Para lograr la ignición en la combustión in situ, es necesario que la temperatura de la formación cercana al pozo inyector aumente rápidamente, alcanzando un valor superior a la temperatura a la cual comenzará a ser quemado el crudo, generando una tasa de calor mayor a la que el yacimiento pueda disipar. La liberación suficiente de energía dependerá de las condiciones del crudo; sin embargo, no todos los yacimientos de crudo pesado presentarán las condiciones adecuadas para lograr esta etapa. En muchos casos, se hará necesario el uso de una fuente externa de calentamiento

que permita elevar la temperatura del yacimiento, encendiendo así el aceite. Por tal motivo, los métodos de ignición se pueden clasificar en: ignición espontánea e ignición asistida.

**1.2.1 Ignición espontánea.** Al aumentar la temperatura de manera endógena gracias a las reacciones exotérmicas en régimen LTO y por efectos de la presión de inyección de aire, la ignición ocurre de forma natural.

El tiempo requerido para elevar la temperatura inicial de la formación dependerá de la reactividad del crudo a esta condición. Algunos yacimientos contienen crudos que son suficientemente reactivos como para hacer ignición espontáneamente cuando el aire es inyectado al cabo de un tiempo no excesivo para el desarrollo del proceso (Burger, 1976). El retardo de ignición es considerado como el tiempo requerido para que la temperatura máxima en la zona investigada alcance la temperatura de ignición (210°C o 410°F); este puede variar desde unos pocos días hasta un periodo indefinido si la velocidad de disipación de calor al entorno del volumen de reacción llega a ser tan alta como la velocidad de liberación de calor. (Burguer, 1976). La expresión que gobierna el tiempo que toma la ignición en tener lugar es la siguiente:

$$t_i = \frac{(\rho c) * T_R (1 + 2R \frac{T_R}{Ea})}{\emptyset * \rho_O * S_O * Q * (P_{O_2}^o)^n * Ea / (RT_R M_{O_2})} e^{Ea/RT_R} \quad (1)$$

T = temperatura absoluta (°K)

$P_{O_2}$  = presión de oxígeno parcial

n = orden de la reacción con respecto al oxígeno

K = tasa de reacción específica

Ea/R= activación térmica (°K)

Q = calor liberado por las reacciones de oxidación por mol de oxígeno.

$\emptyset$  = Porosidad

$\rho_o$  = Densidad del aceite

$S_o$  = Saturación del aceite

$T_R$  = Temperatura del yacimiento

Según la ecuación, es necesario conocer sobre la energía de activación, el orden de reacción y el factor de frecuencia para el cálculo del tiempo de ignición (Tadema & Weijdema, 1970).

Uno de los métodos para calcular estos parámetros cinéticos, es el método diferencial. Según este método, para la combustión in situ se encuentra una expresión de velocidad de reacción, donde el orden de reacción se supone como uno, debido a que la masa de aceite quemado es muy inferior respecto a la masa inicial (Burguer, 1976):

$$r = \frac{\Delta m_{O_2}}{m_o \Delta t} = k P_{O_2}^n = k_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P_{O_2}^n; n = 1 \quad (2)$$

T = temperatura absoluta (K)

$P_{O_2}$  = presión de oxígeno parcial

n = orden de la reacción con respecto al oxígeno

K = tasa de reacción específica

$m_o$  = masa de crudo *in place*

$\frac{\Delta m_{O_2}}{\Delta t}$  = masa del oxígeno consumido por unidad de tiempo

$k_o$  = factor pre-exponencial

$E_a/R$  = activación térmica (K)

Por otra parte, para el caso de los estudios a nivel de laboratorio, se tiene una expresión para la velocidad de reacción en función de la temperatura, la presión, el volumen de reacción, el tiempo y las masas de oxígeno y de aceite (Gadelle).

$$r = \frac{P * V * \Delta [O_2] M_{O_2}}{2 R * t * m_{oil} T} \quad (3)$$

Igualando ambas expresiones se obtiene una forma de calcular la constante de Arrhenius a partir de datos de tiempo, temperatura y composición de gases a la salida, siendo el resto de los términos constantes, tal que:

$$k = \frac{P*V*\Delta[O_2]M_{O_2}}{2C_{O_2}R*t*m_{oil}} \frac{1}{T} \quad (4)$$

Así, con valores de la constante de Arrhenius para diferentes temperaturas se obtienen valores para la energía de activación y el factor de frecuencia (Tadema & Weijdema, 1970).

Gadelle et al. (1981) estiman que es más probable que se produzca ignición espontánea cuando la temperatura del yacimiento es superior a 131°F o 140°F.

**1.2.2 Ignición asistida.** En algunos yacimientos no es prácticamente posible lograr una ignición espontánea o bajo unas condiciones deseadas (Fajardo, 2016). En estos casos la ignición se puede lograr aumentando la temperatura del yacimiento mediante algunos mecanismos o dispositivos como son: calentadores eléctricos en el fondo del pozo, quemadores de gas en el fondo del pozo, calentadores catalíticos, inyección de fluidos calientes y métodos químicos (Li *et al.*, 2008).

**1.2.3 Mecanismos de ignición asistida** Como se mencionó anteriormente, se presentan una serie de técnicas o mecanismos que permiten el aumento rápido de la temperatura del yacimiento denominados “mecanismos de asistencia a la ignición”, los cuales se describen a continuación.

**1.2.3.1 Calentadores eléctricos.** Esta técnica es una de la más usadas en la industria de los hidrocarburos debido a su simplicidad y su bajo costo, ya que el único requisito que se necesita es una fuente de energía eléctrica en la cabeza del pozo (Belgrave & Chhina, 2006) . Para usar esta técnica, se hace bajar al pozo un calentador a través de un cable. En la Figura 2 se puede observar

un modelo de estos calentadores. Este cable es blindado y soporta el peso del calentador. Además de esto, puede existir la variante de que el cable también suministre calor y transmita señales de medición. Luego el aire inyectado al pozo es calentado por resistores a una temperatura dependiendo de la entrada de energía y del flujo de aire, hasta llegar a la temperatura de ignición (Quijada, 2015). La capacidad calorífica promedio del aire por unidad de volumen estándar es alrededor de  $1.2 \text{ kJ m}^{-3}\text{k}^{-1}$ . Por lo tanto, el incremento de la temperatura del aire puede ser calculado a partir de la potencia efectiva del elemento eléctrico  $P_u$ :

$$[\Delta T_a] = \frac{3000 P_u}{\dot{v}_a} \left[ \frac{\text{sm}^3}{\text{h}} \right] \quad (5)$$

Donde  $\dot{v}_a$  es la tasa de flujo de aire en  $\frac{\text{sm}^3}{\text{h}}$ . El delta está calculado para grados Celsius y/o Kelvin. Sin embargo, la tasa máxima de energía que pueden entregar es de  $70,000 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$  aproximadamente ( $73,853 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$ ) (Jamaluddin, Mehta, & Moore, 1998).

Los calentadores eléctricos se ven limitados por la profundidad debido a las pérdidas de energía eléctrica en el cable.

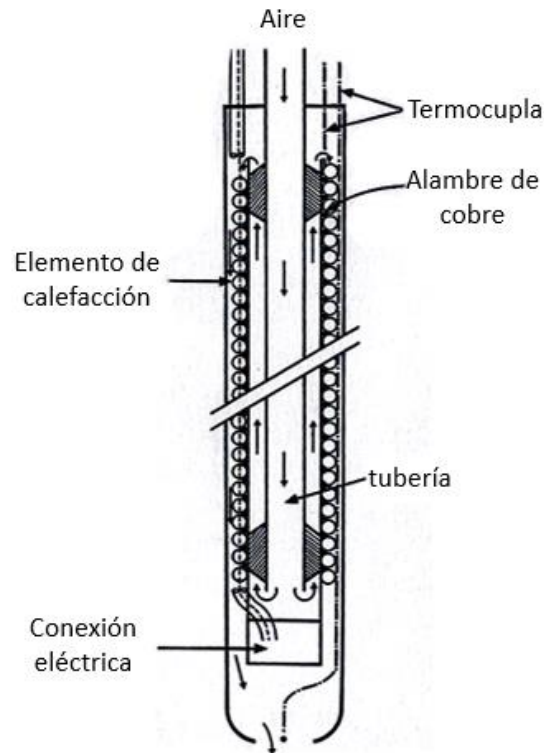
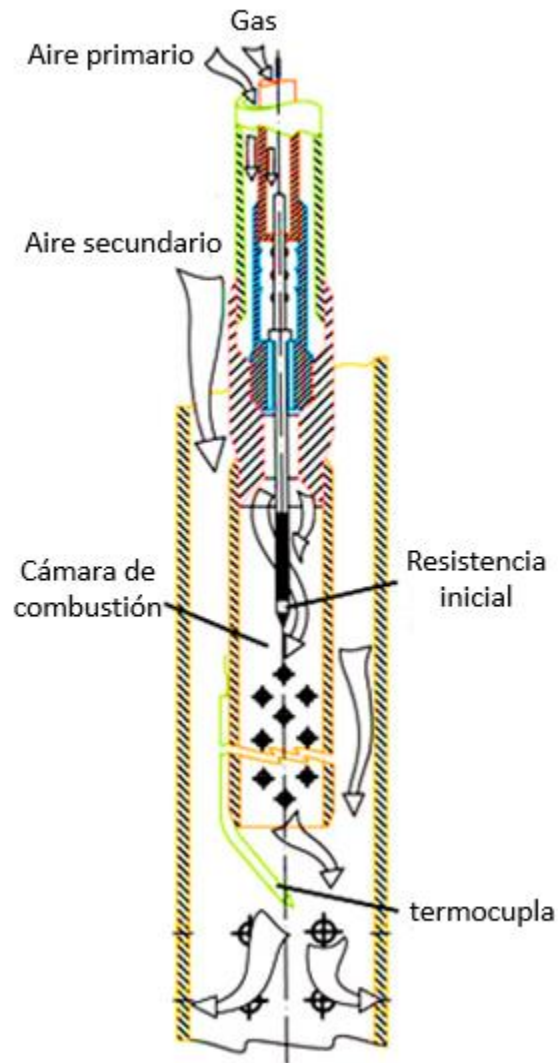


Figura 2. Diagrama de un calentador eléctrico

Adaptado de Document Groupe d'Étude de Gazéification Souterraine (GEGS), France

**1.2.3.2 Quemadores a gas.** La técnica de quemado a gas permite un buen control de la temperatura de los gases inyectados y puede funcionar a una profundidad mayor que otros métodos. El sistema de un quemador a gas de fondo de pozo está compuesto por un quemador de fondo, un equipo de suministro en superficie de gas y aire a alta presión, y una tubería de fondo que conduce la mezcla gaseosa al quemador. El quemador necesita un mecanismo de encendido que permite la ignición del gas combustible. El más sencillo de estos es la bujía incandescente activada desde la superficie a través del cable. Sin embargo, este mecanismo posee problemas importantes: (1) la bujía sufre grandes daños por las temperaturas alcanzadas en la ignición de los

gases, lo que impide que pueda ser utilizada nuevamente; (2) la tasa de flujo de los gases debe ser controlada cuidadosamente, ya que de lo contrario la ignición no ocurrirá.



*Figura 3.* Diagrama de un calentador a gas

Adaptado de Document Groupe d'Étude de Gazéification Souterraine (GEGS), France

Un mecanismo de encendido alternativo es el uso de resistencias eléctricas, que consisten en alambres de nicromo (aleación de níquel 60%, cromo 16% y hierro 24%) conectados en delta, cuyo diseño robusto y resistente lo hacen reutilizable (Depriester & Pantaleo, 1968).

En algunos diseños de quemadores se requiere la inyección de una sustancia pirofórica en lugar de un dispositivo eléctrico. Estas sustancias se caracterizan por quemarse espontáneamente en presencia del oxígeno y pueden ser introducidas en el quemador en forma pura o diluida (Depriester & Pantaleo, 1968). Algunas de las principales sustancias pirofóricas para quemadores pueden ser observadas en la tabla 1.

Tabla 1.

*Sustancias pirofóricas sugeridos por diferentes autores*

<b>Principales sustancias pirofóricas</b>	
Fosforo de calcio	(Kaasa, 1960)
Aceite de linaza	(Rees, 1967)
Silano/Disilano	(Bousaid, 1973)

Adaptado de “Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner. SPE 732”; 1968.

**1.2.3.3 Inyección de fluidos calientes.** Una opción para inducir la ignición es inyectar al yacimiento fluidos calientes, con el fin de elevar la temperatura en las cercanías del pozo inyector; este precalentamiento disminuye significativamente el tiempo de retraso de la ignición.

El vapor de agua es el fluido de calentamiento preferido en la mayoría de los casos debido a su alto contenido de calor.

El vapor inyectado a la formación también es capaz de desplazar gran cantidad de crudo, lo que reduce la tasa de oxígeno requerida para hacer ignición. Para los propósitos de ignición, el vapor normalmente se genera en la superficie. No obstante, se han desarrollado generadores de vapor de fondo de pozo que permiten que el vapor no se condense al ser inyectado (Shallcross, 1989). Una

limitación de esta técnica es la pérdida de calor que puede existir en la inyección de vapor, lo que puede hacer que fracase la ignición.

**1.2.3.4 Inyección química.** Esta técnica consiste en inyectar una cantidad de compuestos químicos que, al contacto con el oxígeno inyectado, puedan liberar una gran cantidad de calor y provocar las reacciones de oxidación necesarias para que ocurra la ignición al inyectar aire. Con frecuencia estos compuestos son fluidos pirofóricos que liberan más calor que el crudo presente en el yacimiento. Algunos ejemplos de estos son los aceites de origen vegetal, aceite rojo, aceite de ricino, trementina y el aceite de pino. Estos aceites contienen compuestos insaturados (como olefinas y aceites oleicos), los cuales se descomponen fácilmente en radicales libres para iniciar reacciones de oxidación en cadenas a baja temperatura (Li *et al.*, 2008), lo que genera respuestas exotérmicas tempranas en el crudo. En las tablas 2 y 3 se observan las propiedades fisicoquímicas de varios aditivos, en los que se evaluó la efectividad en la mejora de la ignición de un crudo de 30°API. Estos experimentos se llevaron a cabo mediante el análisis térmico de barrido de presión diferencial presurizado (PDSC) y pruebas de calorimetría de velocidad de aceleración (ARC) (Li, Zalewski, Mehta, Van Fraassen, & Gordon Moore, 2008).

Tabla 2.

*Resumen de los resultados de las pruebas PDSC en ignición asistida por productos químicos a 4.136 kPa*

Ejemplos	Baja temperatura exotérmica				
	Temp. de inicio(°C)	Rango de reacción (°C)	Temperatura máxima (°C)	Calor Generado (J/g)	Energía de activación (kJ/mol)
Aceite base	204	204-352	308	7,448	106,4
60% Aceite base + 20% aceite linaza + 20% hexadecano	170	170-353	250/302	7,557	69,3
33.3% Aceite base + 33.5% aceite linaza + 32.3% hexadecano	91	91-360	237/290	7,288	56,3
Aceite base + 0.17% catalizador de hierro	161	161-340	242	7,521	65,2
Aceite base + 1.8% catalizador de hierro	156	156-342	239	7,641	58,4
Aceite base + 2.7% catalizador de hierro	156	156-346	239	8,142	51,4
60% Aceite base + 20% aceite linaza + 19.92% n-hexadecano + 0.18% catalizador de hierro	130	130-352	205	8,626	44,4

Adaptado de Chemically Assisted Ignition Technologies for a Light Oil Air Injection Process

(2008). Universidad de Calgary, Canadá

Tabla 3.

*Resumen de los resultados de las pruebas PDSC en ignición asistida por productos químicos a 4.136 kPa*

Samples	Alta temperatura exotérmica		
	Rango de reacción (°C)	Temperatura máxima (°C)	Calor Generado (J/g)
Aceite base	344-468	454	1,651
60% Aceite base + 20% aceite linaza + 20% hexadecano	353-470	458	1,397
33.3% Aceite base + 33.5% aceite linaza + 32.3% hexadecano	359-474	454	994
Aceite base + 0.17% catalizador de hierro	342-461	438	2,886
Aceite base + 1.8% catalizador de hierro	342-460	437	2,976
Aceite base + 2.7% catalizador de hierro	342-460	435	3,189
60% Aceite base + 20% aceite linaza + 19.92% n-hexadecano + 0.18% catalizador de hierro	352-471	416	1,581

Adaptado de Chemically Assisted Ignition Technologies for a Light Oil Air Injection Process (2008). Universidad de Calgary, Canadá

En las tablas 2 y 3 se resumen el rango de temperatura de la reacción exotérmica, la temperatura correspondiente al caudal de calor máximo local y el calor generado en los rangos de temperatura baja y alta para cada caso de prueba. Disminuir la energía de activación del petróleo reducirá el retardo de ignición. Por lo tanto, las pruebas de detección PDSC muestran que los aditivos como el aceite de linaza, n-hexadecano y el catalizador de hierro mejoran la reactividad del aceite base, lo que puede ayudar con la ignición en aplicaciones de campo (Li, Zalewski, Mehta, Van Fraassen, & Gordon Moore, 2008).

También existen técnicas de asistencia catalítica que se enfocan en aumentar la velocidad de las reacciones con el objetivo de acrecentar la tasa a la que se libera energía y superar la tasa a la que el yacimiento la pierde, generando un aumento en la temperatura y por consiguiente, la ocurrencia de la ignición (Li, Zalewski, Mehta, Van Fraassen, & Gordon Moore, 2008).

### 1.3 Tipos de combustión

Las variaciones de la técnica de inyección de aire dependen de la dirección de propagación del flujo, por lo cual se clasifican en: combustión convencional y combustión inversa.

**1.3.1 Combustión convencional.** Conocida como “*forward combustion*” o combustión frontal, ocurre cuando la ignición se da cerca al pozo inyector y el frente de combustión se mueve desde el inyector hacia los pozos productores, es decir, avanza en la misma dirección del flujo de aire (Chu, 1977). Este método se caracteriza por la aplicación de dos variantes denominadas combustión seca y húmeda.

**1.3.1.1 Combustión seca.** Este proceso es denominado combustión convencional o seca debido a que no se inyecta agua junto con el aire, ocurriendo la ignición en la vecindad del pozo inyector y transportándose el frente de combustión desde éste hacia el pozo productor. La figura 2 representa un esquema del proceso de combustión in situ. Una vez inyectado el aire o algún gas oxidante adecuado dentro de la formación, se da la ignición del aceite en el pozo inyector y un frente de combustión se mueve en la dirección del flujo de gas (Ramey, 1971). Después de que el frente se desplaza una distancia significativa hacia los pozos productores, se genera una región quemada desde la cara de las arenas de inyección hasta el frente de combustión, como puede ser observado en la figura 2. La temperatura de esta región aumentará a partir de la temperatura del aire inyectado en la arena, frente a una temperatura máxima en el frente de combustión. La inyección continua de aire frío recupera el calor de la arena quemada y lo mueve hacia el frente de combustión (Ramey, 1971).

Este frente de combustión es una región estrecha del orden de pulgadas de espesor. Todo el combustible residual depositado delante del frente se consume en esta región si la temperatura de combustión es lo suficientemente alta. El movimiento del frente de combustión es el resultado de la combustión completa de todo el combustible que puede consumirse en las condiciones existentes.

Inmediatamente antes del frente de combustión, la temperatura desciende rápidamente a través de una zona de evaporación y craqueo. En esta zona, toda el agua y los componentes livianos del crudo se vaporizan, dejando un combustible residual (Ramey, 1971).

Antes de la zona de evaporación hay una zona de condensación. Si el gradiente de presión es bajo en el sistema, la temperatura puede ser razonablemente constante y cercana en magnitud al punto de ebullición del agua y a la presión parcial del agua en la fase vapor. Por tal motivo, esta zona de condensación a menudo es conocida como *steam plateau* (Ramey, 1971).

Delante de la zona de condensación, la temperatura desciende gradualmente a la temperatura de formación inicial. Por lo general, se puede identificar un banco de agua "fresca" y crudo "liviano", antes de la región de condensación.

Durante la combustión seca actúan varios mecanismos como: el empuje por gas, el desplazamiento miscible, la vaporización y condensación. Estos mecanismos son apoyados por reacciones y procesos físico-químicos: oxidación, destilación, desintegración catalítica y polimerización, los cuales ocurren paralelamente en la zona de combustión (Alvarado, 2002).

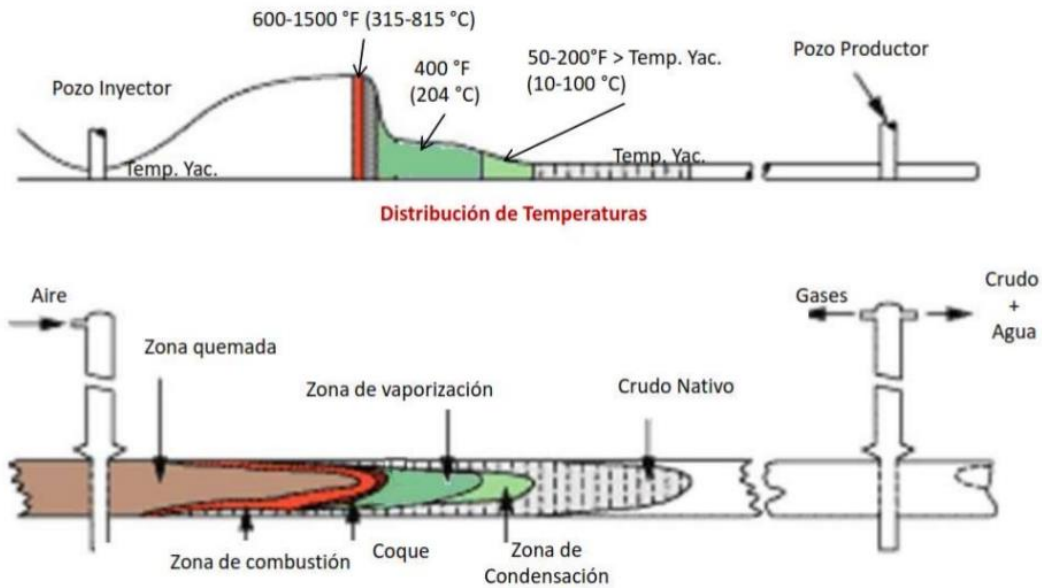


Figura 4. Diagrama esquemático de la recuperación del petróleo por combustión seca.

Adaptado de Ramey, H.J. (1971, January 1). In Situ Combustion. World Petroleum Congress.

**1.3.1.2 Combustión húmeda.** Es un método que utiliza la inyección de agua alternada o simultáneamente con el aire una vez que se ha logrado la ignición del crudo in situ (Vera, 2011).

Cuando solamente se inyecta aire, un volumen significativo del yacimiento, aguas arriba del frente de combustión, se mantiene a una temperatura elevada, perdiéndose un porcentaje considerable de este calor en las formaciones vecinas. Por tal motivo, surgió la idea de combinar agua con la inyección de aire después del inicio de la combustión, para aprovechar la capacidad térmica del agua, ya que esta transporta el calor hacia zonas más frías del yacimiento, dando como resultado un mayor rendimiento (Murillo, 2010).

Es decir, si se agrega agua a la corriente de inyección de aire, el calor sensible de la corriente de gas inyectado aumenta. El calor sensible para el aire seco es tan bajo que el aire inyectado no puede recuperar el calor de la roca caliente y seca tan rápido como el frente de combustión puede calentar la roca. Por lo tanto, la adición de agua a la corriente de aire aumenta la capacidad de la

corriente de inyección para recuperar calor y aumenta la velocidad de la onda de convección que normalmente sigue al frente de combustión (Ramey, 1971).

La combustión húmeda se clasifica en combustión húmeda normal, incompleta y super húmeda. Esta clasificación ha sido propuesta con base en las características de los perfiles de temperatura y saturación originados durante el proceso.

En el caso de combustión húmeda incompleta el agua inyectada, al estar en contacto con la zona quemada, se evapora y fluye a través del frente de combustión como parte de la fase gaseosa, puesto que la máxima temperatura del frente de combustión es, en este caso, mayor que la temperatura de evaporación del agua a la presión del sistema.

El proceso se denomina de combustión húmeda normal cuando el coque depositado se consume completamente. Por el contrario, cuando el agua inyectada hace que el combustible depositado no se quemé por completo, entonces se trata de una combustión húmeda incompleta.

La combustión super húmeda se logra cuando la cantidad de calor disponible en la zona quemada no es suficiente para vaporizar toda el agua inyectada al sistema. En este proceso, la máxima temperatura de combustión desaparece y la zona de vaporización-condensación se esparce por todo el medio poroso. Este tipo también ha sido denominado combustión parcialmente apagada (Dietz & Weijdema, 1968).

Una forma de ver estos procesos es por medio de la concentración de combustible, como se indica en la Fig. 3. La combustión seca consume una porción del crudo y desplaza al resto mediante el movimiento del frente de combustión. La combustión húmeda consume la misma cantidad de combustible, pero desplaza más crudo en una ubicación dada de frente de combustión en virtud del hecho de que los bancos de vapor y agua caliente se mueven por delante del frente de combustión. Claramente, debería haber alguna condición óptima como se observa en la Fig. 3. La

combustión "parcialmente apagada" da como resultado una reducción en la temperatura máxima de combustión de manera que se consume menos de la concentración normal de combustible. Esto da como resultado un menor requerimiento de volumen de aire de la unidad y un costo menor de operación. El requerimiento de aire en una combustión húmeda óptima puede ser un tercio del requerido para una combustión seca si el desplazamiento frontal es el principal mecanismo de recuperación de petróleo.

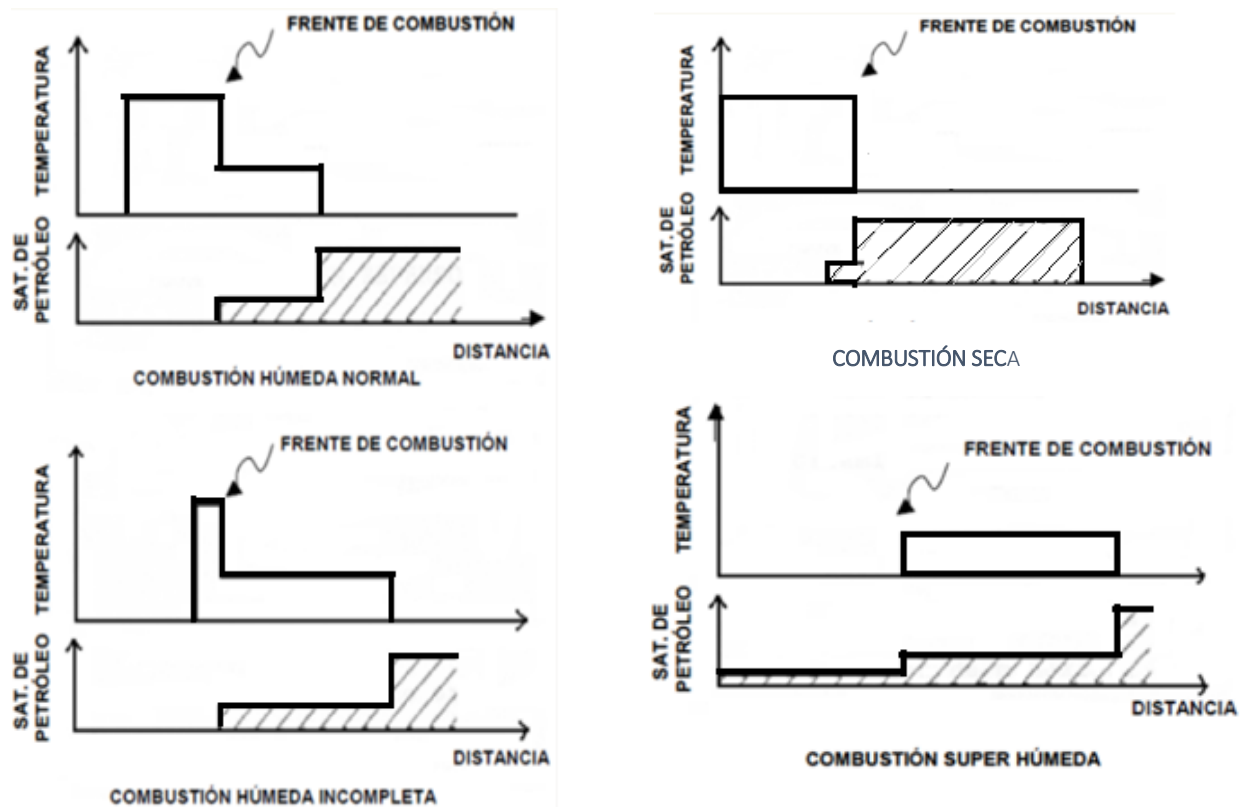


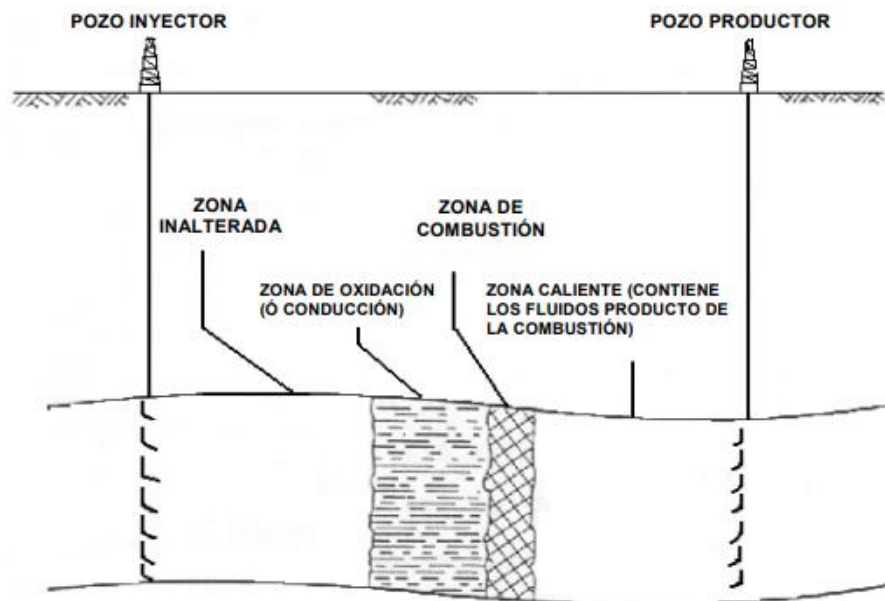
Figura 5. Diagrama esquemático de las principales características de la combustión húmeda y seca.

Adaptado de Ramey, H. J. (1971, January 1). In Situ Combustion. World Petroleum Congress, Stanford University, California, U.S.A.

**1.3.2 Combustión inversa.** En este proceso, la ignición ocurre cerca al pozo productor, ocasionando el desplazamiento del frente de combustión en dirección opuesta al flujo de aire inyectado. Esta configuración reduce la falta de desplazamiento del crudo de baja movilidad que se acumula e impide el paso del aceite caliente en las zonas cercanas al pozo.

Las desventajas de este tipo de combustión son los altos costos presentes durante su operación, causados por el aumento de oxígeno requerido para propagar el frente de combustión, los problemas generados en los pozos productores y la gran cantidad de crudo quemado como combustible (Hernández, 2014).

La figura 6 representa un esquema simplificado de este proceso con las zonas formadas dentro del yacimiento.



Sentido del movimiento del frente de combustión

Figura 6. Diferentes zonas formadas durante la combustión inversa.

Adaptado de Douglas A. Alvarado, Carlos Bánzer S. (2002). Recuperación Térmica de Petróleo.

Caracas, Venezuela

#### 1.4 Variables para tener en cuenta en el desarrollo de la etapa de ignición

Existen una serie de parámetros de yacimiento y operacionales que tienen un impacto en el desempeño de la ignición. Los parámetros que serán evaluados para realizar las analogías en este proyecto son los siguientes: permeabilidad, porosidad, saturación de crudo, presión al inicio de inyección, tasas de inyección, temperatura y porcentaje de concentración de oxígeno.

- **Porosidad**

Para el proceso de ignición, es favorable un buen porcentaje de porosidad, ya que representa una cantidad de crudo considerable (combustible), que permite elevar rápidamente la temperatura del yacimiento, dando como resultado un inicio exitoso de la ignición. Por el contrario, si el yacimiento presenta una porosidad reducida, la cantidad de materia disponible a reaccionar será menor y el tiempo de ignición será más prolongado (Fajardo, 2016).

- **Permeabilidad**

La permeabilidad debe ser la adecuada para permitir el desplazamiento de los fluidos presentes en el yacimiento una vez sea inyectado el gas en la formación. Tener un sistema de baja permeabilidad implica un aumento en la presión de inyección de aire, disminuyendo la mínima cantidad de flujo necesario para sostener la combustión. No obstante, una formación muy permeable involucra un rápido desplazamiento del agente oxidante, reduciendo la acumulación de la energía liberada en las reacciones de oxidación en las zonas cercanas al pozo, prolongando así el inicio de la ignición (Fajardo, 2016).

- **Saturación de crudo**

Este factor hace referencia al contenido de aceite disponible en el medio poroso. Un mayor porcentaje de saturación de aceite indica una baja saturación de agua; esta relación es conveniente

para la etapa de ignición, ya que disminuyen las pérdidas de calor causadas por el agua, la cual posee mayor calor específico que el petróleo (González, 2005).

- **Temperatura**

La temperatura se considera como un parámetro importante que puede ser controlado mediante ingeniería, durante el proceso de inyección de aire al yacimiento. Mantener una temperatura alta trae efectos positivos, porque permite el desarrollo de las reacciones de forma rápida y con mayor facilidad.

Las técnicas asistidas como calentadores eléctricos y quemadores de gas en el fondo tienen gran influencia sobre la temperatura, logrando un aumento de esta en el aire y en las zonas cercanas a la inyección, favoreciendo así el buen desarrollo de la etapa de ignición (González, 2005).

- **Presión al inicio de inyección**

La tasa de reacción depende de la presión parcial del oxígeno en el sistema (Ecuación 2). A mayores presiones, en consecuencia, se tendrá una mayor velocidad de reacción. Si además se mantiene constante la tasa de inyección a condiciones estándar, habrá un mayor tiempo de residencia a la mayor presión.

- **Porcentaje de concentración de oxígeno**

Un alto porcentaje de concentración de oxígeno favorecerá el aumento de temperatura de las zonas cercanas al pozo, de la misma forma como lo favorece un incremento en la presión del sistema. Esto permitirá una alta liberación de energía si existe una considerable cantidad de crudo que favorezca el desarrollo de las reacciones, ayudando así al proceso de ignición (Fajardo, 2016).

- **Tasas de inyección**

La tasa de inyección de aire presenta dos efectos: uno positivo y otro negativo. El primero es que al aumentar la tasa de inyección de aire, aumenta la cantidad de oxígeno para llevar a cabo las

reacciones de oxidación, es decir que el oxígeno es el reactivo limitante y el crudo el reactivo en exceso, dando como resultado un aumento en la temperatura, permitiendo el inicio de la ignición.

Al haber una alta tasa de reactivo en el yacimiento, la temperatura aumenta rápidamente, lo que genera una ignición temprana en las cercanías del pozo inyector, ocasionando daños operacionales y presentando riesgos para el proceso. Por este motivo, es importante desarrollar una planeación correcta de la distancia a la cual va a ocurrir la ignición (González, 2005).

## 2. Análisis de los problemas presentes durante la etapa de ignición

A partir de una revisión bibliográfica de campos de crudo pesado a nivel mundial, se identificaron 71 de ellos en los cuales se implementó el proceso de combustión in situ. De estos 71 campos, solo en 32 se encontraron datos específicos del proceso de ignición y en 19 de ellos se reportaron problemas durante la implementación del proceso.

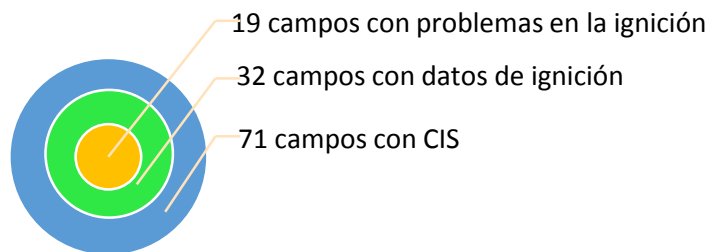


Figura 7. Número de campos evaluados

En este capítulo se presentan las características de los campos seleccionados y se hace énfasis en las propiedades de la etapa de ignición, los problemas generados durante el desarrollo de ésta, además de las soluciones y los mecanismos implementados para detectar los inconvenientes. El

análisis de estos problemas permite mejorar el entendimiento de la etapa de ignición, y determinar así las situaciones que pueden afectar la eficiencia de este proceso, además de las variables operacionales más influyentes.

## 2.1 Balaria

Este campo fue descubierto en Rumania en 1960. El proyecto de combustión in situ fue desarrollado como piloto en 1975 y operado por IFP (Institut Francais du Petrole) / ICPPG. Tras la implementación de CIS, la producción aumentó en un poco más del doble, pasando de un promedio de 41 BOPD a 147 BOPD, indicando el éxito del proceso. (Gadelle *et al.*, 1981).

En la siguiente tabla se verán reflejadas algunas propiedades del campo Balaria, específicamente las requeridas para la realización de las analogías.

Tabla 4.

### *Propiedades del campo Balaria*

<b>Propiedades Balaria</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	2625
Espesor neto [ft]	9-49
Litología	Areniscas
Permeabilidad, [mD]	506
Porosidad, [%]	30
Temperatura del yacimiento, [°F]	113-118
Gravedad del aceite, [API]	19
Viscosidad del aceite [cP]	120

Adaptado de “Heavy Oil Recovery by In Situ Combustion, Two Field Cases in Rumania”. 1981.

**2.1.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Balaria** De acuerdo con la información reportada por (Melorose *et al.*, 1997), (Carcoana, 1982) y (Chieh Chu, 1982), las siguientes tablas caracterizan la etapa de ignición en el campo Balaria.

Tabla 5.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Balaria*

<b>Propiedades Balaria</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Calentadores eléctricos con una potencia de 30 kW y quemadores de gas
Tiempo de ignición [días]	200

Adaptado de “State of the Art Review of Fireflood Field Projects”; 1982, Enhanced Oil Recovery in Rumania; 1982, Heavy Oil Recovery by In Situ Combustion, Two Field Cases in Rumania”; 1981.

Tabla 6.

*Problemas y soluciones presentadas*

<b>Problemas del campo Balaria</b>	<b>Solución</b>
Durante el craqueo de los hidrocarburos se generó un aumento en la estabilidad de las emulsiones.	Se utilizaron plantas de tratamiento vertical, donde se dio lugar a la separación del agua libre en 2 etapas. Durante la primera etapa se separa y descarga el agua fría. En la segunda etapa, la emulsión se pone en contacto con el agua caliente residual del primer estado, mezclado con un agente desemulsificante.

Adaptado de “State of the Art Review of Fireflood Field Projects”; 1982, Enhanced Oil Recovery in Rumania; 1982, Heavy Oil Recovery by In Situ Combustion, Two Field Cases in Rumania”; 1981.

**2.1.2 Métodos para detectar la ignición** En laboratorio, se midieron las tasas de oxidación del aceite de Balaria a diferentes temperaturas bajo una presión de 6 MPa para determinar mediante un modelo numérico las pérdidas de calor alrededor del pozo y calcular así el retardo de ignición.

## 2.2 Balol

El campo descubierto en 1968 está ubicado en el norte de Gujarat, India. El proceso de combustión húmeda e inversa fue implementado en el campo como piloto en 1990 y fue operado por ONGC (Oil and Natural Gas Corporation Limited) (Doraiah, Ray, & Gupta, 2007). El piloto se consideró un éxito en términos de establecer una combustión y ganancias adicionales de aceite. El proyecto arrojó buenos resultados en términos de mantenimiento de combustión, reducción del corte de agua e incremento de la producción (Rao, Roychaudhury, Sapkal, Gupta, & Sinha, 1997).

En la siguiente tabla se reportan las propiedades relevantes del campo Balol para la realización de las analogías.

Tabla 7.

*Propiedades del campo Balol 1 y Balol 2*

<b>Propiedades Balol 1</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	3440
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	8000-15000
Porosidad, [%]	28
Temperatura del yacimiento, [°F]	158
Gravedad del aceite, [API]	15
Viscosidad del aceite [cP]	100-150
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	70-85

Adaptado de Extension of In-Situ Combustion Process from Pilot to Semi-Commercial Stage in

Hea SPE 37547

**2.2.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Balol** En este campo se desarrolló una prueba piloto el 16 de marzo de 1990, posterior a lo cual se desarrolló una prueba semi-comercial el 1 de enero de 1992 (Roychaudhury *et al.*, 1997), (Rao *et al.*, 1997). Las tablas 9 y 10 resumen el proceso de ignición.

Tabla 8.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Balol*

<b>Propiedades Balol</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión	Seca y húmeda. En la escala piloto, la fase seca duró 110 días después de lograda la ignición; después de esto, inició la combustión húmeda. La escala semi-comercial, inició con la fase seca, y en la tercera semana de abril de 1992 se inició la combustión húmeda, en ciclos de 6 días de inyección de aire y un día de inyección de agua.
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Para escala piloto se usó un quemador de gas de 6.64 MMkcal (26.34 MMBTU); para la escala semi-comercial se usó quemador de gas de (12.34 MMBTU).
Tiempo de ignición en laboratorio para la escala semi-comercial [Días]	1.46 - 2.72
Tiempo de Ignición campo [Días]	Para la escala piloto la ignición duró 7 días y para la escala semi-comercial duró 5 días.
Distancia a la cual ocurrió la ignición desde el pozo inyector [ft]	5

Adaptado de SPE 105248-MS In-situ Combustion Technique to enhance heavy oil recovery at Mehsana, ONGC - A s

Tabla 9.

*Problemas y soluciones del campo Balol*

<b>Problemas del campo Balol</b>	<b>Solución</b>
Se registró gran cantidad de H <sub>2</sub> S en los pozos productores del piloto.	
Se presentó incendio en el quemador de dos pozos debido a una alta diferencia de presión y una rápida reacción entre el gas y el aire, aumentando la temperatura a 910°C.	Para superar este problema, el equipo de ignición colocó un bache de gas inerte en el tubing antes de comenzar la inyección de gas, proporcionando suficiente tiempo para regular la velocidad de inyección del gas y evitar la formación de una mezcla de combustible indeseable.
El pozo productor para la escala semi-comercial IC#29 poseía un corte de agua del 95% y se convirtió en pozo inyector debido al patrón de la prueba. Sin embargo, no tenía suficiente saturación de aceite para dar inicio a la ignición.	Se inyectaron 100 m <sup>3</sup> de crudo de Balol para asegurar la saturación del pozo; esta inyección fue desplazada con salmuera. Después de esto, el pozo fue lavado con agua caliente y detergentes para asegurar un ambiente libre de aceite en el pozo.

Adaptado de SPE 105248-MS In-situ Combustion Technique to enhance heavy oil recovery at

Mehsana, ONGC - A s

### 2.2.2 Métodos para detectar la etapa de ignición en el campo Balol

- El inicio de la combustión fue confirmado por el aumento en el porcentaje de CO<sub>2</sub> en la corriente de gas producida en los pozos IC-15, IC-18, IC-19.
- Para determinar el tiempo de retardo de ignición en laboratorio, los experimentos se llevaron a cabo en una celda de alta presión que contenía una mezcla de aceite y arena. La celda se llevó a la temperatura de yacimiento en una atmósfera inerte para evitar la oxidación prematura. Después de esto, el gas inerte fue remplazado por aire a alta presión. Al haber transcurrido el tiempo necesario, dependiendo de la temperatura, se determinó el porcentaje de O<sub>2</sub> utilizado dentro de la celda.

En campo la ignición se determinó mediante el aumento de  $N_2$  y  $CO_2$  en los pozos de observación y se consideró que la ignición fue iniciada aproximadamente a 5 ft del pozo inyector.

### 2.3 Bellevue

El campo se encuentra ubicado en el noroeste de Louisiana, Estados Unidos y descubierto en 1921. El proyecto de CIS fue desarrollado como piloto en 1963 y operado por Getty Oil Company. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca y húmeda; sin embargo, el proceso de combustión húmeda fue más efectivo, incluso en el aumento del factor de recobro. Este proyecto fue evaluado como técnica y económicamente exitoso (Ralph, Long, & Mark, 1982), (Joseph & Pusch, 1980).

En la siguiente tabla se presentan las características del campo Bellevue, tomadas en cuenta para la realización de las analogías.

Tabla 10.

#### *Propiedades del campo Bellevue*

<b>Propiedad Bellevue</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	300 - 400
Espesor neto [ft]	10-83
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	540 - 1100
Porosidad, [%]	33 - 39
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	40
Temperatura del yacimiento, [°F]	75
Gravedad del aceite, [API]	19
Viscosidad del aceite [cP]	450-660
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	52-72
OOIP [MBbl]	35

Adaptado de SPE 10708-MS A Study of Getty Oil Co.'s Successful In-Situ Combustion Project in the Bellevue F

**2.3.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Bellevue** Con información de (Ralph, Long, Mark, & Nuar, 1982), (W.H. Pusch & Joseph, 1980) y (William H. Pusch & Garvey, 1981), se reportan las tablas 11 y 12.

Tabla 11.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Bellevue (1963)*

<b>Propiedad Bellevue</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Quemadores de gas en el fondo del pozo y calentadores eléctricos con 30 kW de potencia
Tiempo de Ignición campo [días]	180
Distancia entre los pozos de observación e inyectores [ft]	20
Contenido de combustible en el sistema roca-fluido [lb/ft <sup>3</sup> ]	0.68
Consumo del combustible en campo [bbl/acre-ft]	90.2

Adaptado de SPE 7992 A Field Comparison of Wet and Dry Combustion (1963)

Tabla 12.

*Problemas y soluciones del campo Bellevue*

<b>Problemas del campo Bellevue</b>	<b>Solución</b>
Este campo presentó problemas para comenzar la ignición sólo en el patrón con espesor de arena inferior a 22 ft.	No se establecieron detalles de la solución.
El frente de quema no se propagó uniformemente y tampoco de manera estable, involucrando así un problema en el desarrollo de la ignición. Esto afectó de manera significativa a los pozos de observación, calentándose a una	Para poder controlar y estabilizar el frente de combustión, se convirtió el pozo de inyección de aire en un pozo de inyección simultánea de aire y agua; este fue perforado 10 ft arriba de la formación en una zona continua de cal fosilífera de buena porosidad y baja permeabilidad vertical; de

<b>Problemas del campo Bellevue</b>	<b>Solución</b>
temperatura superior de la considerada para el aseguramiento de ellos.	esta forma se continuó la inyección de aire en la parte inferior del tubing y la inyección de agua fresca fue realizada a través de las perforaciones superiores.

Adaptado de SPE DOE 10052 Economics of In Situ Combustion - The Bellevue Field (1963)

**2.3.2 Métodos para detectar la etapa de ignición en campo** Se tomaron perfiles de temperatura en los pozos de observación 5-10 y 6-7 ubicados a 20 pies de los dos pozos inyectoros. Estos registros fueron tomados una vez cada dos semanas durante los seis primeros meses de la combustión seca con el objetivo de determinar la ignición en la formación.

## 2.4 Carlyle

El campo se encuentra ubicado en el estado de Kansas, Estados Unidos y fue descubierto en 1990; el proyecto de combustión in situ se desarrolló como piloto en febrero de 1963 y operado por Sohio Petroleum Company, este fue un proyecto que se evaluó como exitoso y se llevó a cabo mediante combustión húmeda (Elikns, Skov, Martin, & Lutton, 1974), (Smith, 1965).

En la siguiente tabla se presentan las características del campo Carlyle, tomadas en cuenta para la realización de las analogías.

Tabla 13.

### *Propiedades del campo Carlyle*

<b>Propiedad Carlyle</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	860
Espesor neto [ft]	35-45
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	2,000

Propiedad Carlyle	Valor
Porosidad, [%]	25
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	230
Temperatura del yacimiento, [°F]	74
Gravedad del aceite, [API]	19
Viscosidad del aceite [cP]	700
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	40-50
Producción primaria [MBbl]	3
OOIP[MBbl]	100

Adaptado de SPE 01170 Simultaneous Underground Combustion and Water Injection In the Carlyle Pool, Iola Field, Kansas

#### 2.4.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Carlyle

Con información de (Pool & Field, 1966) y (Elkins *et al.*, 1974), se reportan las tablas 14 y 15.

Tabla 14.

##### *Propiedades de la etapa de ignición en el campo Carlyle*

Propiedades Carlyle	Descripción
Tipo de combustion	Combustión Húmeda
Tipo de ignición	Ignición espontánea
Tiempo de Ignición campo [Días]	240-300
Distancia entre los pozos de observación e inyectores [ft]	75
Consumo del combustible en campo [Bbl]	9,000

Adaptado de SPE 01170 Simultaneous Underground Combustion and Water Injection In the Carlyle Pool, Iola Field, Kansas

Tabla 15.

*Problemas y soluciones en el campo Carlyle*

<b>Problemas del campo Carlyle</b>	<b>Solución</b>
La temperatura de fondo de pozo alcanzó picos de 700 a 800 ° F.	Las altas temperaturas fueron controladas por circulación de agua de refrigeración.

Adaptado de SPE 01170 Simultaneous Underground Combustion and Water Injection In the Carlyle Pool, Iola Field, Kansas

**2.4.2 Métodos para detectar la etapa de ignición** La ignición ocurrió cerca de los pozos de inyección 16 D y 17 CA. Mediante una prueba de producción se observó que los gases de combustión eran producidos con menos del 1% de  $O_2$ .

## 2.5 Cold Lake

El campo se encuentra ubicado en Alberta, Canadá. El proyecto de combustión in situ BP Canada's Oxygen Wolf Lake (OWL) fue desarrollado como piloto en 1978, operado por BP Canadá (50%) y Petro-Canadá (50%). Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión húmeda y fue evaluado como exitoso (Mehra, 1991), (Galas & Ejiogu, 1993).

Tabla 16.

*Propiedades del campo Cold Lake*

<b>Propiedades Cold lake</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	1,400
Espesor neto [ft]	75
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	2,000
Porosidad, [%]	33

<b>Propiedades Cold lake</b>	<b>Valor</b>
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	391
Temperatura del yacimiento, [°F]	61
Gravedad del aceite, [API]	12
Viscosidad del aceite [cP]	200,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	65

Adaptado de Performance Analysis of In-Situ Combustion Pilot Project

**2.5.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Cold Lake** La siguiente información fue tomada de (Pool & Field, 1966) (Elkins *et al.*, 1974).

Tabla 17.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Cold Lake*

<b>Propiedades Cold Lake</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Se presentó un proceso de combustión cíclica, basado en las fases de presurización y despresurización del yacimiento.
Tiempo de Ignición campo [Días]	1

Adaptado de Performance Analysis of In-Situ Combustion Pilot Project

Tabla 18.

*Problemas y soluciones en el campo Cold Lake*

<b>Problemas del campo Cold Lake</b>	<b>Solución</b>
Se necesitaba retrasar el avance frontal por el canal calentado para propagarlo en otros canales antes de llegar a los pozos productores.	Para retrasar el avance del frente, fue necesario limitar la tasa de extracción del gas, estrangular la tubería de los pozos conectados o reducir la velocidad de la bomba, lo cual generaba un aumento de la presión de yacimiento, logrando así propagar el frente de combustión a las regiones más frías del yacimiento.
Problemas con la comunicación entre los pozos productores e inyectores, afectando drásticamente la zona de	Para mejorar la comunicación entre los pozos productores e inyectores, se realizó una estimulación en los pozos de producción con

Problemas del campo Cold Lake	Solución
combustión y evitando que el proceso de desplazamiento fuese exitoso.	inyección de vapor a bajas tasas ( $30\text{ m}^3/\text{d}$ ) cerca de la presión de fractura, para obtener una adecuada inyectividad y proteger los pozos productores. Esto reduciría el riesgo de acumulación de oxígeno en el <i>casing</i> y evitaría una mezcla explosiva. La inyección de vapor también permitiría desviar el frente de combustión a una dirección deseada.
Se presentó un exceso de temperatura de $212^{\circ}\text{F}$ .	

Adaptado de Enhancement of In-Situ Combustion by Steam Stimulation of Production Wells

### 2.5.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Para determinar el grado de reacción a baja temperatura y combustión incompleta en experimentos de laboratorio, se controlaban 2 parámetros: la relación de hidrógeno a carbono (H/C) y monóxido de carbono a los gases de óxido de carbono totales ( $\text{CO}/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ ). Ya que un aumento en la relación H/C indica la proliferación de oxidación a baja temperatura.
- El alcance de la oxidación a baja temperatura en campo se determinó mediante el control de la relación de gases producidos durante el ciclo de presión a los gases reaccionados.
- Se realizaron pruebas calorimétricas para determinar la temperatura del yacimiento requerida para asegurar la ignición del aceite.

## 2.6 East Venezuela

Este campo fue operado por Mene Grande Oil Company en 1960 para llevar a cabo un piloto que desarrolló el proceso de combustión seca (Farouq Ali, 1972). A continuación, se establecen las características del campo presentes para la realización de las analogías.

Tabla 19.

### *Propiedades del campo East Venezuela*

<b>Propiedad East Venezuela</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	4,500
Espesor neto [ft]	19
Permeabilidad, [mD]	2,000-5,000
Porosidad, [%]	35
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	1,360
Gravedad del aceite, [API]	9-12
Viscosidad del aceite [cP]	400
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	94

Adaptado de SPE 3350-PA A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests

**2.6.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo East Venezuela** La siguiente información del campo East Venezuela fue tomada de (Farouq Ali, 1972), (C Chu, 1977) y (Chieh Chu, 1982).

Tabla 20.

### *Propiedades de la etapa de ignición en el campo East Venezuela*

<b>Propiedades East Venezuela</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición espontánea
Velocidad del frente de combustión campo [ft/día]	1

Propiedades East Venezuela	Descripción
Tiempo de Ignición campo [Días]	4
Contenido de combustible en el sistema roca-fluido [lb/ft <sup>3</sup> ]	1.46
Eficiencia de la utilización de oxígeno campo [%]	100

Adaptado de SPE 3350-PA A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests

Tabla 21.

*Problemas y soluciones en el campo East Venezuela*

Problemas del campo East Venezuela	Solución
Se presentó un aumento en la producción de arenas, tan pronto como aumentó la temperatura para dar inicio a la ignición.	Una medida correctiva para la producción de arenas es el uso de <i>gravel pack</i> y revestimientos ranurados.
Se presentó taponamiento en los pozos productores durante la fase de ignición.	Para evitar el taponamiento de los pozos y reducir la posibilidad de una explosión en las líneas de inyección de aire, se utilizó un extractor de niebla para eliminar los contaminantes del aire de inyección. Una medida correctiva implementada para el taponamiento de los pozos productores fue el lavado con aceite caliente, GLP, queroseno y Diesel de los pozos; sin embargo, estos presentaron solo un efecto temporal.
Justo antes y después del avance de la zona de combustión, la temperatura de los fluidos producidos era alta y el agua altamente corrosiva, provocando fallas en el revestimiento y tuberías. Las temperaturas de 700 ° a 800 ° F causaron daños en el acero de la tubería.	El control cuidadoso de las temperaturas del fondo del pozo ayudó a prevenir la corrosión. La adición de soda cáustica al agua de refrigeración para mantener el pH del agua producida por encima de 7,0 ayudó a prevenir la corrosión del equipo del pozo.
Al calentar demasiado los pozos, ocurrió un agrietamiento térmico, provocando que el pozo se tapara con coque.	
El corte de agua aumentó a medida que el frente de combustión se acercó a un pozo de producción, generando emulsiones inversas con un alto contenido de agua.	

Adaptado de SPE 5821-PA A Study of Fireflood Field Projects (includes associated paper 6504)

### 2.6.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Para detectar la ignición espontánea, se tuvo en cuenta el incremento generado en la presión de inyección. Para este caso se presentó un aumento de 1425 a 1700 psi.
- Los registros neutrón y de resistividad se utilizaron para ubicar el intervalo quemado, ya que la resistividad de esta zona sería de 2 a 10 veces mayor que la de la formación original.

## 2.7 Kramai

Este campo está ubicado en China y se encuentran afloramientos en donde se realizó la prueba piloto que aquí se reporta. El proyecto implementó combustión seca en el año 1966 y no se reportó producción antes de desarrollar el proceso de combustión in situ (Lang). A continuación, se presentan las características del afloramiento asociado al campo Kramai, que se tienen en cuenta para el desarrollo de las analogías.

Tabla 22.

### *Propiedades del campo Kramai*

Propiedad Kramai	Valor
Profundidad, [ft]	10-17
Espesor neto [ft]	3
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	2377
Porosidad, [%]	21-27
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	14
Temperatura del yacimiento, [°F]	95
Gravedad del aceite, [API]	25
Viscosidad del aceite [cP]	21-22

Adaptado de SPE 10571-MS In-Situ Combustion Test on Outcrops in Kramai Oil Field

**2.7.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Kramai** La siguiente información del campo Kramai fue tomada de (Shun-zong, n.d.).

Tabla 23.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Kramai*

<b>Propiedades Kramai</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Eléctrica

Adaptado de SPE 10571-MS In-Situ Combustion Test on Outcrops in Kramai Oil Field

Tabla 24.

*Problemas y soluciones en el campo Kramai*

<b>Problemas del campo Kramai</b>	<b>Solución</b>
La ignición eléctrica falló en las 3 primeras pruebas por un inadecuado control, produciendo una cantidad total de 756.7 kg de crudo y 183.4 kg de agua. Debido a las heterogeneidades del yacimiento, especialmente con la presencia de fracturas y fisuras, el frente de combustión no se desplazó uniformemente, dejando algunas zonas sin barrer.	Se inyectó calor al yacimiento en una cuarta prueba para elevar las temperaturas a 480°-550°C. El frente de fuego se desplazó rápidamente al pozo de prueba, provocando así una combustión rápida.

Adaptado de SPE 10571-MS In-Situ Combustion Test on Outcrops in Kramai Oil Field

### **2.7.2 Métodos para detectar la etapa de ignición**

- La ignición del yacimiento en la cuarta prueba fue determinada con el incremento del porcentaje de  $CO_2$  y la disminución del  $O_2$  en los pozos productores.

- Se distribuyeron puntos de inspección de temperatura a 40-50 cm en una sección abierta del pozo de prueba para observar el movimiento del frente de combustión y la temperatura de combustión.

## 2.8 Kyrock

El campo se encuentra ubicado en el estado de Kentucky, Estados Unidos. El proyecto de CIS fue desarrollado en 1959 como piloto y operado por Gulf Research and Developm Co. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca (Terwilliger, 1975).

Las propiedades del campo Kyrock empleadas para la realización de las analogías son establecidas en la siguiente tabla.

Tabla 25.

### *Propiedades del campo Kyrock*

Propiedades Kyrock	Valor
Profundidad, [ft]	100
Espesor neto [ft]	20
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	2,000
Porosidad, [%]	22
Temperatura del yacimiento, [°F]	56
Gravedad del aceite, [API]	10
Viscosidad del aceite [cP]	150,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	64

Adaptado SPE 5568-MS Fireflooding Shallow Tar Sands - A Case History

**2.8.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Kyrock** La siguiente información fue tomada de(Terwilliger, 1975).

Tabla 26.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Kyrook*

<b>Propiedades Kyrook</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Uso de quemadores de gas
Velocidad del frente de combustión campo	El 9 de octubre se observó a una tasa de 2.2 ft/día; 10 días después fue observado a una tasa de 1 ft/día. En el cuadrante sureste, el frente avanzó a una tasa de 0.8 ft/día.
Tiempo de Ignición campo [días]	132
Distancia entre los pozos de observación e inyectores [ft]	70
OOIP (MBbl)	5

Adaptado de SPE 5568-MS Fireflooding Shallow Tar Sands - A Case History

Tabla 27.

*Problemas y soluciones en el campo Kyrook*

<b>Problemas del campo Kyrook</b>	<b>Solución</b>
Se registraron presiones de sobrecarga en la presión de inyección, debido a un aumento en el volumen efectivo del gas.	Para disminuir la presión de sobrecarga, fue necesario apagar el quemador, disminuyendo así la presión de inyección de aire.
Se observó en los perfiles de temperatura, un avance no radial de la zona de combustión a los cuatro días después de ocurrida la ignición.	
Se presentaron daños en los pozos de producción debido al frente de combustión.	Para evitar que la zona de combustión provocara daños a los pozos más productivos, se redujo el flujo, evitando así que el frente los golpeará prematuramente. Cuando el frente llegó a los pozos, estos se mantuvieron en producción parcial durante largos períodos, aplicando diferentes grados de contrapresión de acuerdo con la temperatura del pozo y el contenido de oxígeno del gas producido.

<b>Problemas del campo Kyrock</b>	<b>Solución</b>
La falta de combustión completa del oxígeno disminuyó la eficiencia de la CIS e incrementó la relación aire-aceite.	Con el fin de mejorar la eficiencia del barrido, se mantuvo una ligera contrapresión en los pozos productores y se agregó periódicamente combustible suplementario al aire que se estaba inyectando.

Adaptado de SPE 5568-MS Fireflooding Shallow Tar Sands - A Case History

### 2.8.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- La ignición fue detectada en el yacimiento a través de cambios en la composición del gas producido, esto fue posible debido a que el gas se movía rápidamente a través de una fractura.

## 2.9 Midway Sunset

El campo se encuentra ubicado en el estado de Kansas, Estados Unidos y fue descubierto en 1957.

El proyecto de CIS fue desarrollado en 1960 y operado por Mobil Oil Company. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca (Counihan, 1977), (Field, 1987) y (Curtis, 1989).

A continuación, se presentan las características del campo Midway Sunset (1960) que se tienen en cuenta para la realización de las analogías.

Tabla 28.

*Propiedades del campo Midway Sunset (1960)*

<b>Propiedad Midway Sunset (1960)</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	2,100-2,700
Espesor neto [ft]	129
Litología	Arenisca

<b>Propiedad Midway Sunset (1960)</b>	<b>Valor</b>
Permeabilidad, [mD]	1,500
Porosidad, [%]	36
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	950
Temperatura del yacimiento, [F]	125
Gravedad del aceite, [API]	14
Viscosidad del aceite [cP]	110
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	74
Producción primaria Bbl]	160,000
OOIP[MBbl]	38

Adaptado de SPE 6525-MS A Successful In-Situ Combustion Pilot in the Midway-Sunset Field, California

**2.9.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Midway Sunset (1960)** La siguiente información del campo Midway Sunset fue tomada de (Gates & Sklar, 1971), (Counihan, 1977), (Field, 1987), (Curtis, 1989).

Tabla 29.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Midway Sunset (1960)*

<b>Propiedades Midway Sunset (1960)</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición espontánea
Tiempo de Ignición campo [Días]	18
Contenido del fluido de combustible en el sistema roca-fluido [lb/ft <sup>3</sup> ]	2
Eficiencia de la utilización de oxígeno campo [%]	100

Adaptado de SPE 46244-MS Combustion Front and Burned Zone Growth in Successful California ISC Projects

Tabla 30.

*Problemas y soluciones en el campo Midway Sunset (1960)*

<b>Problemas del campo Midway Sunset (1960)</b>	<b>Solución</b>
Se presentaron pérdidas de aire a alta presión de yacimiento.	Para disminuir la pérdida de aire, fue necesario reducir la tasa de inyección y presión en el pozo inyector actual, para poder convertir así otro pozo en inyector de aire.
Durante la perforación de un pozo a 262.5 ft del inyector de aire Moco 504, se generaron pérdidas de circulación, causando explosiones en el pozo. El pozo se perdió y el aire de la zona de Moco comenzó a filtrarse a la zona superior de Webster, provocando la ignición en esa zona y presentando aumentos de la tasa de petróleo en los pozos de la zona Webster cerca de la fuga.	Se procedió a la inyección de agua, perforación y cementación del pozo perdido.
Debido a la variación de la formación presente en el campo, el petróleo drenó por gravedad al calentarse, agregando combustible a las reacciones y generando altas temperaturas en los pozos de inyección semanas e incluso meses después de la ignición inicial, esto se evidenció debido a que la ignición posterior tuvo lugar en las arenas a diferentes profundidades y tiempos, causando así daños en el revestimiento de los pozos inyectores.	Para reducir el daño en el pozo inyector debido a las altas temperaturas, fue necesario completar los inyectores con revestimientos cementados y perforados de tubería API de grado J55 para proporcionar aislamiento térmico y resistencia mecánica.

Adaptado de SPE 46244-MS Combustion Front and Burned Zone Growth in Successful California

ISC Projects

### 2.9.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Para determinar la etapa de ignición, se utilizaron registros eléctricos y de temperatura, datos de temperatura y presión de los pozos que produjeron fluidos calientes; se analizaron

cambios en las características de la producción de los pozos antes del frente de combustión (incrementos en la temperatura, gravedad del aceite, corte de agua y disminución en el pH del agua producida).

## 2.10 Miga

Este campo se encuentra ubicado en el estado de Wyoming, Estados Unidos y descubierto en 1952; el proyecto de CIS fue desarrollado en 1961 y operado por Continental Oil Co. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca (Terwilliger, 1975).

En la siguiente tabla se establecen las características analógicas del campo Miga.

Tabla 31.

### *Propiedades del campo Miga*

Propiedades Miga	Valor
Profundidad, [ft]	4,000-4,350
Espesor neto [ft]	15-25
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	1,000-10,000
Porosidad, [%]	22
Temperatura del yacimiento, [°F]	146
Gravedad del aceite, [API]	13-14
Viscosidad del aceite [cP]	280-430
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	75
Producción primaria [MBbl]	1
OOIP [MBbl]	23

Adaptado de SPE 4765-PA Fireflood of the P2-3 Sand Reservoir in The Miga Field of Eastern

Venezuela

**2.10.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Miga** La siguiente información del campo Miga fue tomada de (Terwilliger & Co, 1964).

Tabla 32.

*Propiedades de la etapa de ignición del campo Miga*

<b>Propiedades Miga</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición espontánea
Consumo del combustible en campo [lb/ft <sup>3</sup> ]	1.36
Consumo del combustible en laboratorio [lb/ft <sup>3</sup> ]	2
Eficiencia de la utilización de oxígeno campo [%]	100

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application to Comb

Tabla 33.

*Problemas y soluciones en el campo Miga*

<b>Problemas del campo Miga</b>	<b>Solución</b>
La presión del yacimiento había comenzado a aumentar excesivamente y el pozo MG-592 tuvo que ser retirado de la producción cuando la temperatura del fondo del pozo había alcanzado el límite superior seguro de 400 ° F.	Para controlar las presiones elevadas, se requirió una moderada reducción de la velocidad de inyección.
Durante los primeros 5 años, el pozo MG-525 sirvió exitosamente como el único inyector de aire para el proyecto. Sin embargo, se hizo evidente que continuar la inyección en el pozo MG-525 significaría la pérdida de los pozos de descarga MG-819 y MG-524 para el avance del frente.	Se perforó y se completó el pozo de inyección MG-825 para reemplazar el pozo de inyección MG-525 y maximizar la vida útil de los pozos de extracción existentes.

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application to Comb

### 2.10.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Se realizaron estudios de modelos potenciométricos del yacimiento para determinar la fracción barrida del yacimiento por la combustión.
- Para determinar la fracción quemada, la localización del frente de fuego, algunos parámetros de yacimiento y condiciones de la cara del pozo de inyectores y productores, se usaron datos transitorios de presión. El estudio se basó en datos de caída de presión tomados con un manómetro de cristal de alta resolución, con un sistema automático de adquisición y procesamiento de datos.

## 2.11 North Tisdale

El campo se encuentra ubicado en California, Estados Unidos. El proyecto de combustión in situ fue desarrollado como piloto en 1976 y operado por Husky Oil Co., este proyecto se llevó a cabo por combustión húmeda. La combustión fue fácil de establecer, las estimulaciones a los pozos fueron efectivas y más económicas que la estimulación con vapor, la combustión asistida por flujo de agua es técnicamente más factible y económicamente promisoría que para otros procesos realizados en el campo North Tisdale (Martin, Alexander, Dew, & Tynan, 1972).

En la siguiente tabla se establecen las propiedades analógicas del campo North Tisdale.

Tabla 34.

*Propiedades del campo North Tisdale*

<b>Propiedades North Tisdale</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	776-1,090
Espesor neto [ft]	50

<b>Propiedades North Tisdale</b>	<b>Valor</b>
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	1,034
Porosidad, [%]	24
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	290
Temperatura del yacimiento, [°F]	73
Gravedad del aceite, [API]	21
Viscosidad del aceite [cP]	175
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	61
Producción primaria OOIP[MBbl]	15

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application to Comb

**2.11.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo North Tisdale** La información del campo North Tisdale presente a continuación fue tomada de (Martin *et al.*, 1972), (Farouq Ali, 1972) y (Chieh Chu, 1982).

Tabla 35.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo North Tisdale*

<b>Propiedades North Tisdale</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Uso de calentadores eléctricos de 40 kW
Velocidad del frente de combustión campo [ft/día]	0.5
Tiempo de Ignición campo [días]	19
Distancia entre los pozos de observación e inyectores [ft]	202
Consumo del combustible en campo [lb/ft <sup>3</sup> ]	1.8
Eficiencia de la utilización de oxígeno campo [%]	72

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application to Comb

Tabla 36.

*Problemas y soluciones en el campo North Tisdale*

Problemas del campo North Tisdale	Solución
Baja inyectividad de aire y baja eficiencia del barrido vertical del frente de combustión. Se observó una fuerte caída en los niveles de oxígeno en los gases producidos después de la ignición; el conjunto inferior de perforaciones no se había calentado a altas temperaturas, y la inyectividad del aire era menor que la deseada.	Las perforaciones inferiores se reactivaron para aumentar la inyectividad y maximizar la eficiencia del barrido vertical del frente de combustión.

Adaptado de SPE 3350-PA A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests

### 2.11.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Se registró de manera continua el dióxido de carbono en los gases producidos. Se realizaron análisis de Orsat una vez a la semana para esos gases y el monóxido de carbono.
- Las temperaturas de fondo del pozo fueron medidas con termocuplas.
- Dos pozos de información fueron perforados para determinar la localización, el tamaño y la temperatura de la zona de combustión.

### 2.12 Pauls Valley

El campo se encuentra ubicado en el condado de Kansas, Estados Unidos y descubierto en 1957.

El proyecto de CIS fue desarrollado como piloto en 1960 y operado por Mobil Oil Company. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca y técnicamente el proyecto se consideró exitoso, pero no para su expansión. Económicamente no fue viable debido a: 1. necesidad de

inyectar aceite diluido; 2. separación y prevención de arenamientos; 3. tratamientos a problemas de emulsión severos. (Pauls, Elkins, Morton, Co, & Blackwell, 1968).

En la siguiente tabla se presentan las características analógicas presentes en el campo Pauls Valley.

Tabla 37.

*Propiedades del campo Pauls Valley*

<b>Propiedad Pauls Valley</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	4,300
Espesor neto [ft]	100
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	878-2,505
Porosidad, [%]	39
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	1,400
Temperatura del yacimiento, [°F]	110
Gravedad del aceite, [API]	10
Viscosidad del aceite [cP]	7,000-8,000
Producción primaria [Bbl]	930,000
OOIP [MBbl]	28

Adaptado de SPE 4086-MS Experimental Fireflood in a Very Viscous Oil-Unconsolidated Sand Reservoir, S.E. Pa

**2.12.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Pauls Valley** La siguiente información del campo Pauls Valley fue tomada de (Pauls *et al.*, 1968).

Tabla 38.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Pauls Valley*

<b>Propiedades Pauls Valley</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Quemador de gas

Propiedades Pauls Valley	Descripción
Tiempo de Ignición campo [Días]	8

Adaptado de SPE 4086-MS Experimental Fireflood in a Very Viscous Oil-Unconsolidated Sand Reservoir, S.E. Pa

Tabla 39.

*Problemas y soluciones presentados en el campo Pauls Valley*

Problemas del campo Pauls Valley	Solución
La entrada del aire fue limitada debido al crudo pesado y la arena pesada que se encontraba en el pozo.	Se realizó una limpieza en el pozo para remover la arena y el crudo presente en este.

Adaptado de SPE 4086-MS Experimental Fireflood in a Very Viscous Oil-Unconsolidated Sand Reservoir, S.E. Pa

### 2.12.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Las muestras de cabeza de pozo de gases producidos se analizaron periódicamente mediante cromatografía para monitorear las reacciones en el yacimiento.

### 2.13 Pontotoc

El campo se encuentra ubicado en Oklahoma, Estados Unidos. El proyecto de CIS fue desarrollado como piloto y operado por Mangolia Petroleum Co. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca e incrementó en 4 veces la tasa de aceite (Moss, White, & McNiel, JR., 1959).

En la siguiente tabla se establecen las características del campo Pontotoc presentes para la realización de las analogías.

Tabla 40.

*Propiedades del campo Pontotoc*

Propiedad Pontotoc	Valor
Profundidad, [ft]	950
Espesor neto [ft]	17
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	7,680
Porosidad, [%]	27
Temperatura del yacimiento, [°F]	66
Gravedad del aceite, [API]	18
Viscosidad del aceite [cP]	76

Adaptado de SPE 1102-G In Situ Combustion Process. Results of a Five-Well Field Experiment in Southern Okla

### 2.13.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Pontotoc

La información del campo Pontotoc fue tomada de (Moss, White, & McNiel, JR., 1959).

Tabla 41.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Pontotoc*

Propiedades Pontotoc	Descripción
Tipo de combustión	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Calentadores eléctricos de 50 kW
Tiempo de Ignición campo [Días]	5
Velocidad del frente de combustión en campo [ft/día]	0.16 – 0.20
Distancia entre los pozos de inyección y productores [ft]	40
Consumo de combustible en laboratorio [lb/ft <sup>3</sup> ]	1.9
Consumo de combustible en campo [lb/ft <sup>3</sup> ]	1.68
Eficiencia de la utilización de oxígeno en laboratorio [%]	75

<b>Propiedades Pontotoc</b>	<b>Descripción</b>
Eficiencia de la utilización de oxígeno en campo [%]	87

Adaptado de SPE 1102-G In Situ Combustion Process. Results of a Five-Well Field Experiment in Southern Okla

Tabla 42.

*Problemas y soluciones presentados en el campo Pontotoc*

<b>Problemas del campo Pontotoc</b>	<b>Solución</b>
No se presencié un barrido simétrico en el frente de combustión. El frente de combustión comenzó a desplazarse en dirección suroeste, mientras que, en dirección noreste, el frente se había detenido; se realizaron varios intentos de aumento de flujo de aire para volver a encender la formación hacia esa dirección, pero no fue exitoso.	Se abrieron dos nuevos pozos de producción ubicados a 56 ft al sur-oeste y al sudeste del pozo de inyección para permitir que el frente de combustión continúe en la dirección preferencial de movimiento de quema.

Adaptado de SPE 1102-G In Situ Combustion Process. Results of a Five-Well Field Experiment in Southern Okla

### 2.13.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Se perforaron 4 pozos de observación, instalados con termocuplas para monitorear la temperatura y el frente de combustión.

## 2.14 Santhal

Este campo se encuentra ubicado en el estado de Gujarat, India y fue descubierto en 1952. El proyecto de CIS fue un piloto desarrollado en junio de 1996 y operado por Oil and Natural Gas Corporation. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca y húmeda y fue evaluado como técnica y económicamente exitoso (Suyan, Dasgupta, & Jain, 2006).

Las propiedades establecidas para realizar la analogía del campo Santhal son presentadas en la siguiente tabla.

Tabla 43.

### *Propiedades del campo Santhal*

Propiedades Santhal	Valor
Profundidad, [ft]	3450
Espesor neto [ft]	9-50
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	3,000-5,000
Porosidad, [%]	28
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	1,450
Temperatura del yacimiento, [°F]	158
Gravedad del aceite, [API]	18
Viscosidad del aceite [cP]	50-200
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	70

Adaptado de SPE 105248-MS In-situ Combustion Technique to enhance heavy oil recovery at Mehsana, ONGC - A s

**2.14.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Santhal** La información del campo Santhal fue tomada de (Suyan, Dasgupta, & Jain, 2006) y (Chattopadhyay, Binay Ram, Bhattacharya, & Das, 2004).

Tabla 44.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Santhal*

<b>Propiedades Santhal</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca y húmeda
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Uso de quemadores de gas

Adaptado de SPE 105248-MS In-situ Combustion Technique to enhance heavy oil recovery at

Mehsana, ONGC - A s

Tabla 45.

*Problemas y soluciones en el campo Santhal*

<b>Problemas del campo Santhal</b>	<b>Solución</b>
Incendio del quemador en dos pozos. El quemador fue conectado en el extremo inferior del tubing, el aire fue inyectado a través del anular y el gas natural a través del tubing. Un tapón de aluminio en la punta del quemador evitaba que el aire y el gas se mezclaran; cuando la presión del gas era mayor que la presión del fondo, este se retiraba automáticamente. Debido a una alta diferencia de presión y una rápida reacción entre el gas y el aire se generó un incendio en el quemador, llegando a una temperatura de 910°C. fondo del pozo había alcanzado el límite superior seguro de 400 ° F.	Para superar este problema, el equipo de ignición colocó un bache de gas inerte en el tubing antes de comenzar la inyección de gas. En el momento en que se retira el tapón, el gas inerte se libera primero y luego el gas natural entra en contacto con el aire. Este bache proporciona suficiente tiempo para regular la velocidad de inyección del gas y evitar la formación de una mezcla de combustible indeseada.

Adaptado de SPE 39537 Pipeline Transportation of HeavyViscous Crude Oil as Water Continuous

Emulsion

### 2.14.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Se usaron termocuplas para registrar los aumentos de temperaturas generados por la ignición y el frente de combustión.

## 2.15 South Hospah

Este campo se encuentra ubicado en el estado de Mckinley County, condado New Mexico, Estados Unidos. Comenzó su primera producción en 1974. El proyecto de CIS fue un piloto desarrollado en 1980 y 1981, operado por Tenneco Oil Co. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión seca y fue abortado debido al poco incremento en la producción de aceite (Struna & Poettmann, 1988).

En la siguiente tabla se presentan las características establecidas para la analogía del campo South Hospah.

Tabla 46.

### *Propiedades del campo South Hospah*

<b>Propiedades South Hospah</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	1,625
Espesor neto [ft]	28
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	1,100
Porosidad, [%]	27
Temperatura del yacimiento, [°F]	80
Gravedad del aceite, [API]	25
Viscosidad del aceite [cP]	55
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	15
Producción primaria	Acuífero activo

Adaptado de SPE 14917-PA In-situ Combustion in the Lower Hospah Formation, McKinley County New Mexico

**2.15.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo South Hospah** La información presentada en las tablas 54 y 55 fue tomada de (Struna & Poettmann, 1988).

Tabla 47.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo South Hospah*

Propiedades South Hospah	Descripción
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición espontánea
Tiempo de ignición en campo [Días]	25
Consumo del combustible en laboratorio [Bbl/acre-ft]	217

Adaptado de SPE 14917-PA In-situ Combustion in the Lower Hospah Formation, McKinley

County New Mexico

Tabla 48.

*Problemas y soluciones en el campo South Hospah*

Problemas del campo South Hospah	Solución
El frente de combustión no abarcó todas las zonas de la formación, presentando mala distribución del barrido areal, debido a la baja permeabilidad presentada en las zonas superiores de la formación Lower Hospah que no permitió el paso del aire a través de esta zona. El aire inyectado migró preferentemente a través de la zona de transición y la zona de agua superior, procesando rocas del yacimiento con bajas saturaciones de petróleo. Las temperaturas no fueron suficientes para sostener la combustión debido a las pérdidas de calor en el acuífero.	No se presentó la solución establecida.

Adaptado de SPE 14917-PA In-situ Combustion in the Lower Hospah Formation, McKinley

County New Mexico

## 2.16 Suplacu de Barcau

Este campo se encuentra ubicado en Rumania; fue descubierto en 1959 y desarrollado mediante producción por mecanismos primarios (gas disuelto y bombeo). El proyecto de CIS fue un piloto desarrollado en 1964, operado por Petrom S.A. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión húmeda y fue considerado técnico y económicamente exitoso y posteriormente desarrollado por completo a través de CIS (Carcoana, 1982), (Carcoana A. , 1990), (Petit, Le Thiez, & Lemonnier, 1990), (Panait-Patica, Serban, & Ilie, 2006).

Las propiedades establecidas para realizar las analogías del campo Suplacu de Barcau están presentes en la siguiente tabla.

Tabla 49.

### *Propiedades del campo Suplacu de Barcau*

<b>Propiedades Suplacu de Barcau</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	115-719
Espesor neto [ft]	20-89
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	1,700-2,000
Porosidad, [%]	31
Temperatura del yacimiento, [°F]	65
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	80
Gravedad del aceite, [API]	16
Viscosidad del aceite [cP]	2,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	78
Producción primaria	Gas en solución
OOIP [MBbl]	295

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application

**2.16.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Suplacu de Barcau** La información mostrada a continuación fue tomada de (Panait-Patica, Serban, & Ilie, 2006), (Petit, Le Thiez, & Lemonnier, 1990), (Carcoana, 1982) y (Carcoana A. , 1990).

Tabla 50.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Suplacu de Barcau*

Propiedades Suplacu de Barcau	Descripción
Tipo de combustión a analizar	Combustión húmeda
Tipo de ignición	Ignición asistida
Propiedades del tipo de ignición asistida	Calentadores eléctricos, 30 kW
Velocidad del frente de combustión en campo [ft/día]	0.26
Distancia entre los pozos de observación e inyectores [ft]	32.8 - 65.6 - 98.4 - 131.2
Contenido de combustible en el sistema roca-fluido [%]	1.9
Consumo de combustible en campo [lbm/ft <sup>3</sup> ]	2.2
Eficiencia de utilización de oxígeno en campo [%]	95-98

Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application

Tabla 51.

*Problemas y soluciones presentados en el campo Suplacu de Barcau*

Problemas del campo Suplacu de Barcau	Solución
Se presentó mala distribución en la propagación del frente de combustión.	Se utilizaron los siguientes métodos para controlar la propagación del frente de combustión: 1) disminución de la salida de gas por estrangulamiento y cierre de los pozos de producción. 2) Estimulación de pozos de producción mediante inyección de vapor. 3) creación de un frente de combustión secundario, perpendicular al frente principal en la zona donde el frente de combustión no

Problemas del campo Suplacu de Barcau	Solución
Adaptado de SPE 7130-PA Recovery Correlations for In-Situ Combustion Field Projects and Application	sigue las isobatas. 4) Combinación de inyección de aire y agua.

### 2.16.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- En laboratorio se utilizaron termocuplas y análisis continuo para  $O_2$ ,  $CO$  y  $CO_2$ , en la producción de gas. También para investigar la propagación de combustión, se utilizan modelos físicos unidimensionales que utilizan roca y fluidos de yacimiento en los laboratorios del IFP.

### 2.17 Tia Juana

Este campo se encuentra ubicado en Venezuela. El proyecto de CIS fue un piloto desarrollado en 1966, operado por Shell. Este proyecto se llevó a cabo mediante combustión húmeda, presentando ignición espontánea y fue considerado un proyecto técnico y económicamente exitoso (Dietz, 1970), (Farouq Ali, 1972), (Chu, 1977) y (Chu C. , 1982).

Las propiedades del campo Tia Juana establecidas para la realización de las analogías están presentes en la siguiente tabla.

Tabla 52.

*Propiedades del campo Tia Juana*

<b>Propiedades Tia Juana</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	1540-1600
Espesor neto [ft]	128
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	5000
Porosidad, [%]	39
Temperatura del yacimiento, [°F]	104
Gravedad del aceite, [API]	12-13
Viscosidad del aceite [cP]	6000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	73

Adaptado de SPE 3350-PA A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests

**2.17.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Tia Juana** A continuación, se presentan algunos problemas presentados en el campo Tia Juana encontrados en la literatura; la información que se presentará fue tomada de (Dietz, 1970).

Tabla 53.

*Problemas y soluciones en el campo Tia Juana*

<b>Problemas del campo</b>	<b>Solución</b>
Se presentaron pérdidas de pozos durante la producción posterior a la ignición, la cual fue realizada para verificar el inicio de la ignición.	No se estableció una solución para dicho problema.

Adaptado de SPE 3350-PA A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests

## 2.18 Videle

El campo se encuentra ubicado en el SE de Rumania a 72.4 millas W-SW de Bucarest, y fue descubierto en 1959. El proyecto de CIS fue desarrollado como piloto en 1980 y evaluado como exitoso (Turta & Pantazi, 1986).

En la siguiente tabla se establecen las propiedades analógicas del campo Videle.

Tabla 54.

### *Propiedades del campo Videle*

<b>Propiedades Videle</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	2132 – 2789
Espesor neto [ft]	6-32
Litología	Arenisca
Permeabilidad, [mD]	300-1500
Porosidad, [%]	30
Temperatura del yacimiento, [°F]	131
Gravedad del aceite, [API]	19
Viscosidad del aceite [cP]	30-120

Adaptado de SPE 10709-PA Development of the In-Situ Combustion Process on an Industrial Scale

### **2.18.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo Videle** La siguiente información

fue tomada de (Turta & Pantazi, 1986).

Tabla 55.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo Videle*

<b>Propiedades Videle</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de combustión a analizar	Combustión húmeda
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Se realizó ignición química en todos los pilotos del campo, haciendo uso de 6.7 a 15.5 Bbl de aceite de linaza.
Tiempo de Ignición campo [Días]	180
Contenido del fluido de combustible en el sistema roca-fluido [lb/ft <sup>3</sup> ]	2.3 - 2.4

Adaptado de SPE 10709-PA Development of the In-Situ Combustion Process on an Industrial Scale

Tabla 56.

*Problemas y soluciones presentes en el campo Videle*

<b>Problemas del campo</b>	<b>Solución</b>
Incremento de la presión en las tasas de inyección de aire.	Para prevenir el incremento de la presión de inyección de aire, fue necesario parar la inyección de agua en los pozos productores situados cerca de la ubicación del piloto.
En el pozo A2, el frente de combustión no ocurrió de manera satisfactoria. Se realizaron dos intentos para comenzar la combustión por ignición química, pero estos no fueron exitosos; el tercer intento también falló debido a la reducción severa de inyectividad.	En el pozo A2 no se desarrolló el frente de combustión, por lo que fue convertido en pozo productor. Los problemas de inyectividad fueron probablemente un resultado de la oxidación del aceite de linaza en la cara del pozo.

Adaptado de SPE 10709-PA Development of the In-Situ Combustion Process on an Industrial Scale

### 2.18.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- El retardo de ignición se determinó a partir de la variación de la relación atómica aparente de H/C antes y después de la inyección de un agente reactivo.

### 2.19 West Casa Blanca

El campo se encuentra ubicado en el condado de Duval, en Texas, Estados Unidos, el campo fue descubierto en 1940. Bajo producción primaria, debido al mecanismo de gas en solución con expansión de la capa de gas presente, alcanzó un recobro de 31%. En 1967 inició el proyecto de CIS el cual fue operado por Mobil Oil Co., y duró hasta Enero de 1972, cuando debido a varios problemas, la producción de aceite disminuyó y se decidió dar por terminado el proyecto (Eskew, 1972).

Las propiedades del campo West Casa Blanca establecidas para la realización de las analogías se presentan a continuación.

Tabla 57.

*Propiedades del campo West Casa Blanca*

<b>Propiedades West Casa Blanca</b>	<b>Valor</b>
Profundidad, [ft]	1,030
Espesor neto [ft]	10-15
Litología	Arenisca consolidada
Permeabilidad, [mD]	600
Porosidad, [%]	34
Temperatura del yacimiento, [°F]	100
Saturación de aceite al inicio del proyecto [%]	45
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	30

Propiedades West Casa Blanca	Valor
Gravedad del aceite, [API]	20
Viscosidad del aceite [cP]	150

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project, West Casa Blanca Field, Duval Coun

**2.19.1 Generalidades de la etapa de ignición en el campo West Casa Blanca** La información del campo West Casa Blanca fue tomada de (Pauls *et al.*, 1968).

Tabla 58.

*Propiedades de la etapa de ignición en el campo West Casa Blanca*

Propiedades West Casa Blanca	Descripción
Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
Tipo de ignición	Ignición asistida
Tipo de ignición asistida	Uso de calentadores eléctricos
Consumo de combustible en laboratorio [Bbl/acre-ft]	218
Eficiencia de utilización de oxígeno en campo [%]	91

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project, West Casa Blanca Field, Duval Coun

Tabla 59.

*Problemas y soluciones en el campo West Casa Blanca*

Problemas del campo	Solución
Se presentó arenamiento en el pozo formación productora	se limpió el pozo mediante un lavado con inyector hasta la parte superior de la agua.

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project, West Casa Blanca Field, Duval Coun

### 2.19.2 Métodos para detectar la etapa de ignición

- Se realizó un análisis en la producción de los pozos, evidenciándose gran cantidad de liberación de  $CO_2$  en los pozos productores.

En el apéndice A, se ilustra un resumen de los problemas generados durante la etapa de ignición junto con la frecuencia con que ocurrieron en los diversos campos estudiados.

### 2.20 Rangos de propiedades con mayor impacto en los problemas operacionales

En las tablas 60 a 64 se reportan, para cada problema operacional frecuente, el rango de propiedades de los campos en los cuales se presentó.

Tabla 60.

*Aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo (n=6).*

<b>Aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Profundidad, [ft]	400	4,350
Espesor neto [ft]	10	129
Litología	arenisca	
Permeabilidad, [mD]	650	10,000
Porosidad, [%]	22	33
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	40	1,450
Temperatura del yacimiento, [°F]	61	158
Gravedad del aceite, [API]	12	19
Viscosidad del aceite [cP]	280	200,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	40	75
Tipo de ignición	asistida	espontánea
Tipo de combustión	seca	húmeda
Tiempo de ignición (días)	1	300

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project

En las siguientes figuras se puede observar en azul el intervalo en el que se mueve la profundidad, porosidad y gravedad API para todos los yacimientos estudiados, mientras que el color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de temperaturas.

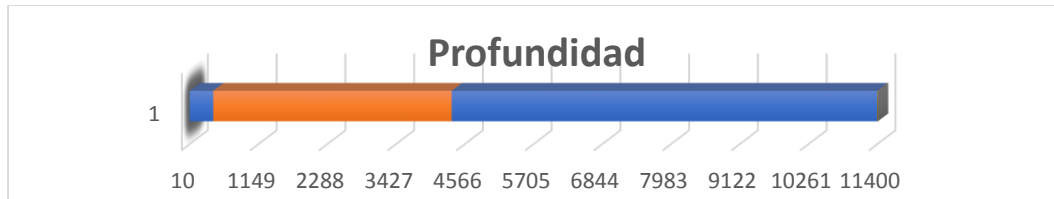


Figura 8. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas.

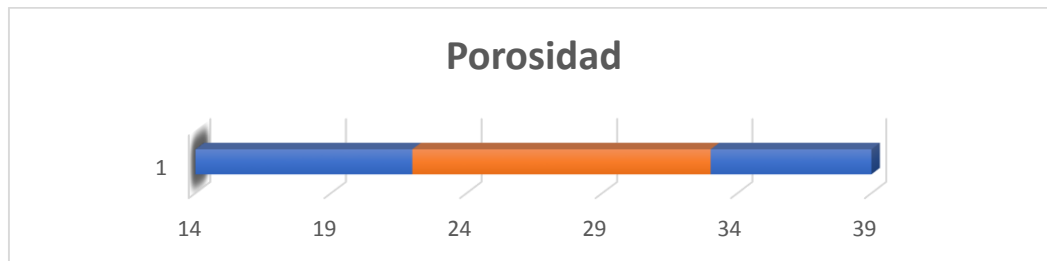


Figura 9. Variación de la porosidad de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas.

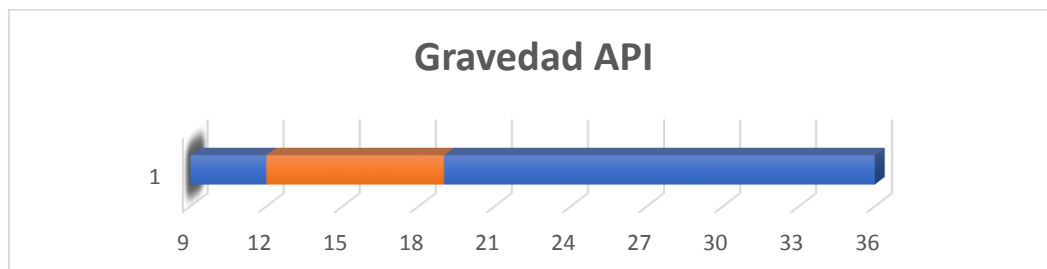


Figura 10. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta el aumento excesivo de las temperaturas.

De acuerdo a las anteriores gráficas estadísticas, el aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo se ve más influenciado a profundidades no mayores de 4350 ft, con rangos intermedios de porosidad (22%-33 %) y crudos de bajo rango de gravedades API (12°-19°). Estos resultados pueden estar relacionados con una baja movilidad del crudo, frecuente en yacimientos someros y de baja gravedad API. La condición de baja movilidad puede dejar altas saturaciones de crudo alrededor del pozo inyector, evitando que el frente de combustión se propague lejos del mismo. En consecuencia, una posible mitigación sería realizar una operación de remoción de crudo de la zona cercana al pozo inyector, para que la ignición se dé a una mayor distancia del mismo. Debe diseñarse de manera que no se comprometa la ignición artificial, puesto que la temperatura al calentar con quemadores tiene también un rango de penetración que debe incluir la zona saturada con aceite.

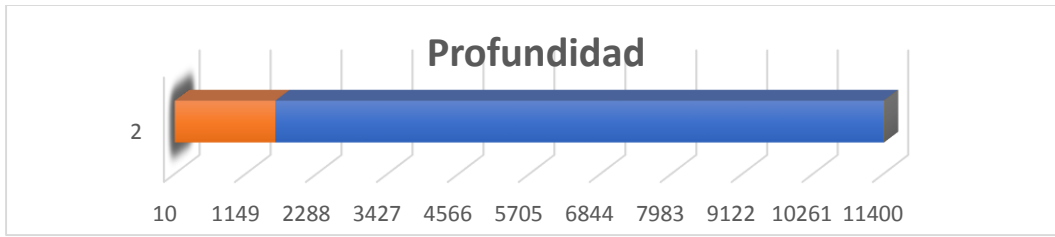
Tabla 61.

*Mala distribución y eficiencia del frente de combustión (n=7).*

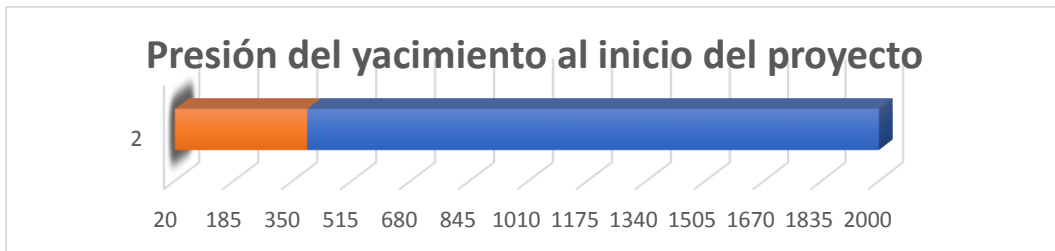
Mala distribución y eficiencia del frente de combustión		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPERIOR
Profundidad, [ft]	10	1625
Espesor neto [ft]	3	89
Litología	Arenisca	
Permeabilidad, [mD]	1034	7680
Porosidad, [%]	21	33
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	20	391
Temperatura del yacimiento, [°F]	56	95
Gravedad del aceite, [API]	10	25
Viscosidad del aceite [cP]	21	200000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	15	78
Tipo de ignición	Asistida	
Tipo de combustion	Seca y húmeda	
Tiempo de ignición (días)	1	132

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

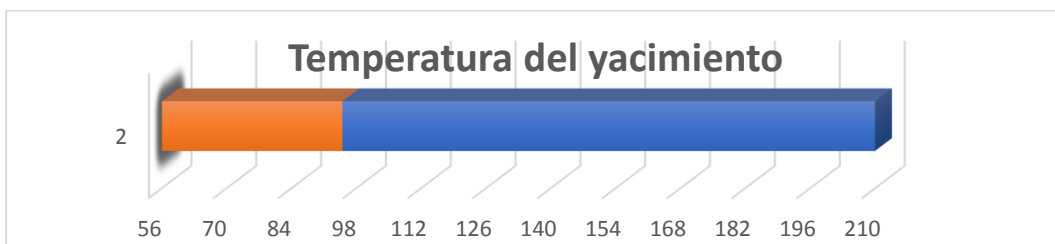
En las siguientes figuras se puede observar en azul el intervalo en el que se mueve la profundidad, presión, temperatura, permeabilidad y porosidad para todos los yacimientos estudiados, mientras que el color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión.



*Figura 11.* Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión



*Figura 12.* Variación de la presión del yacimiento al inicio del proyecto de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión



*Figura 13.* Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión

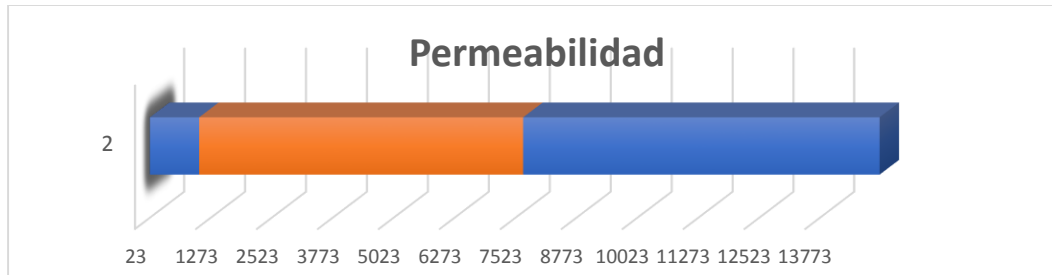


Figura 14. Variación de la permeabilidad de los campos en donde se presenta mala distribución y eficiencia del frente de combustión

La mala distribución y eficiencia del frente de combustión estadísticamente se ve reflejado en un rango de valores bajos de profundidad, presión y temperatura, no superiores a 1625 ft, 391 Psi y 95°F respectivamente. A su vez, la permeabilidad varía entre 1034 md a 7680 md, que aunque esté en un rango intermedio a bajo con respecto a los campos observados, representa valores altos convencionalmente hablando. Los anteriores resultados demuestran que al existir suficiente permeabilidad en yacimientos someros que presentan baja temperatura y presión, el aire inyectado se distribuye de manera no uniforme, facilitando la formación y el crecimiento irregular del frente de combustión.

Tabla 62.

*Fallas en el revestimiento y tuberías (n=3).*

Fallas en el revestimiento y tuberías		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPEROR
Profundidad, [ft]	100	2,700
Espesor neto [ft]	19	129
Litología	Arenisca	
Permeabilidad, [mD]	1,500	5,000
Porosidad, [%]	22	36
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	950	1,360
Temperatura del yacimiento, [°F]	56	125

Fallas en el revestimiento y tuberías		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPEROR
Gravedad del aceite, [API]	9	14
Viscosidad del aceite [cP]	110	150,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	64	94
Tipo de ignición	Asistida	Espontánea
Tipo de combustión	Seca	
Tiempo de ignición (días)	4	132

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

Al igual que en los casos anteriores, a continuación, se muestran los rangos de las propiedades profundidad, temperatura y gravedad API para los campos en donde se presentaron fallas en el revestimiento y tuberías.



Figura 15. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías

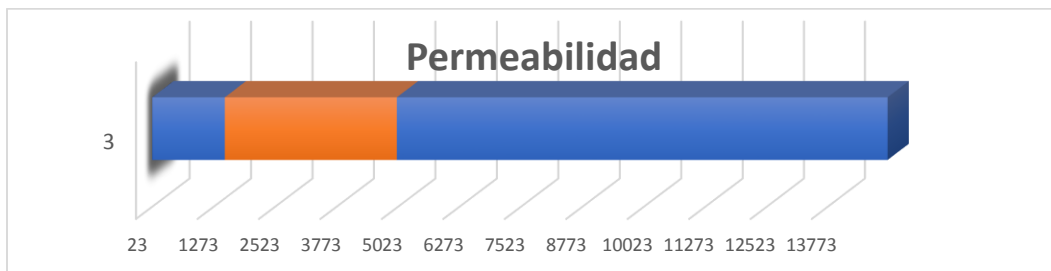
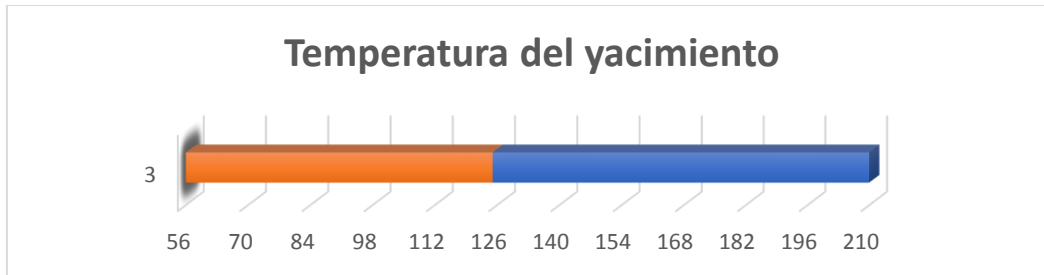
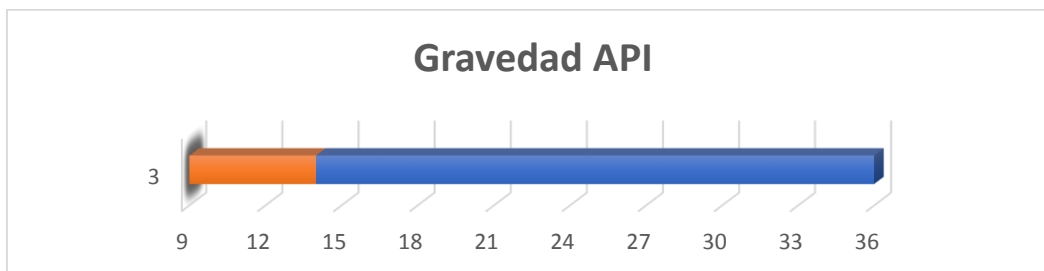


Figura 16. Variación de la permeabilidad de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías



*Figura 17.* Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías



*Figura 18.* Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta fallas en el revestimiento y tuberías

Estadísticamente las fallas que se presentan en el revestimiento y tuberías se generan en rangos de valores bajos de profundidad y temperatura, aproximadamente de 100 a 2700 ft y 56 a 125°F, con crudos de baja gravedad API (9°-14°) y un rango de permeabilidad de 1500 a 5000 md. Aparentemente, la ubicación del frente de combustión cerca de los pozos inyector es lo que genera las variaciones de presión y temperatura que resultan en deformaciones de las tuberías, acompañado de erosión, corrosión y derretimiento en algunos casos.

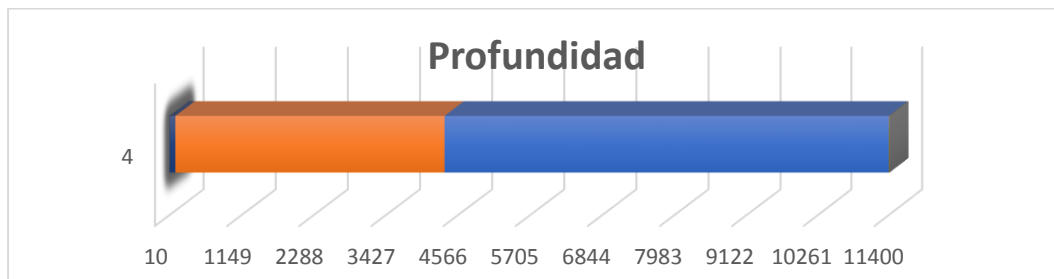
Tabla 63.

*Aumento de la presión de inyección (n=3).*

Aumento de la presión de inyección		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPERIOR
Profundidad, [ft]	100	4,350
Espesor neto [ft]	6	32
Litología	Arenisca	
Permeabilidad, [mD]	300	10,000
Porosidad, [%]	22	30
Temperatura del yacimiento, [°F]	56	131
Gravedad del aceite, [API]	10	19
Viscosidad del aceite [cP]	30	150,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	64	75
Tipo de ignición	asistida	espontánea
Tipo de combustión	seca	Húmeda
Tiempo de ignición (días)	132	180

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

En las siguientes figuras se puede observar el intervalo en el que se mueve la profundidad, porosidad y gravedad API para todos los yacimientos estudiados, donde el color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se presentan aumentos en la presión de inyección.



*Figura 19.* Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta aumento de la presión de inyección

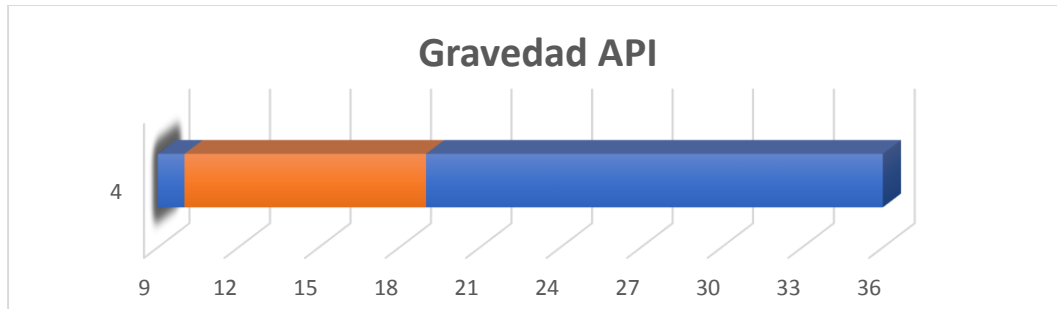


Figura 20. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta aumento de la presión de inyección

Estadísticamente, la presión de inyección tiende a aumentar en yacimientos con profundidades no superiores a 4350 ft y con crudos de rango inferior de gravedad API (no mayor a 19°). La baja movilidad del crudo es lo que mejor puede explicar este comportamiento, tanto estadística como teóricamente.

Tabla 64.

*Aumento en la producción de arena (n=3).*

<b>Aumento en la producción de arenas</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Profundidad, [ft]	1,030	4,500
Espesor neto [ft]	19	100
Litología	Arenisca	
Permeabilidad, [mD]	600	5,000
Porosidad, [%]	34	39
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	30	1,400
Temperatura del yacimiento, [°F]	100	110
Gravedad del aceite, [API]	9	20
Viscosidad del aceite [cP]	150	8,000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	45	94
tipo de ignición	asistida	espontánea
tipo de combustión	Seca	
tiempo de ignición (días)	4	8

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

En las siguientes figuras se puede observar el intervalo en el que se mueve la profundidad, porosidad y gravedad API para todos los yacimientos estudiados, donde el color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se presenta producción de arena.

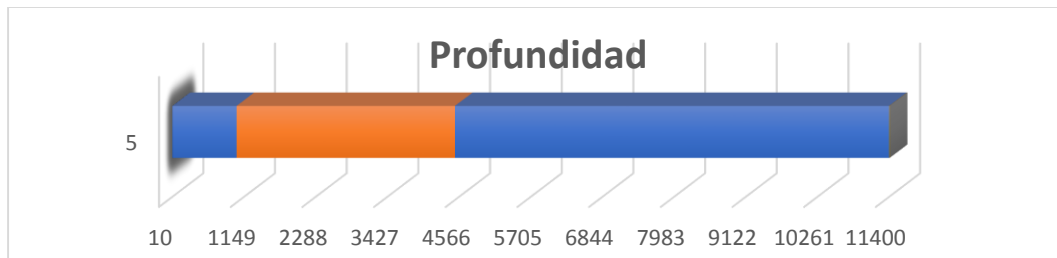


Figura 21. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas

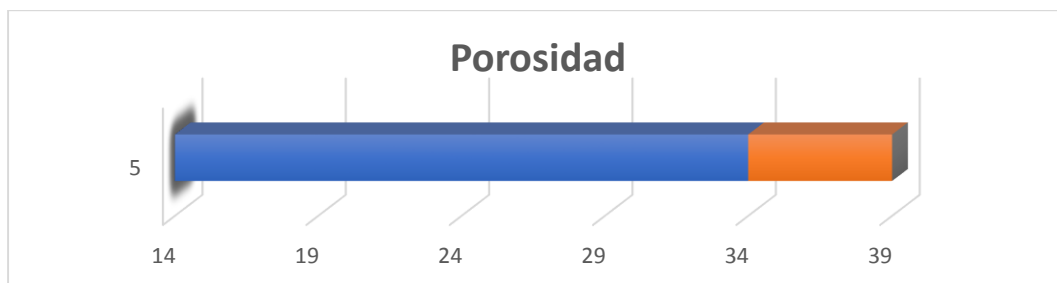


Figura 22. Variación de la porosidad de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas

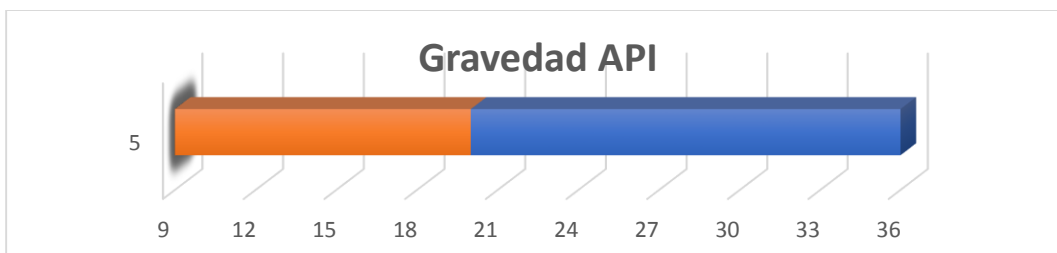


Figura 23. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta aumento de la producción de arenas

La producción de arenas es un problema que se desarrolla en la mayoría de los proyectos de recobro por método térmico y se ve muy marcado en arenas poco profundas y no consolidadas con crudos de alta viscosidad y bajas temperaturas. Al aumentar la temperatura del yacimiento con el método de CIS, se debilita el material cementante, ocasionando pérdida de la resistencia de la matriz y a su vez producción de arena. Esto se ve reflejado estadísticamente hacia las profundidades menores de 4500 ft, con crudos de baja gravedad API (9°-20°) en un rango de porosidades altas, indicativas de bajo nivel de consolidación.

### 2.21 Rangos de las propiedades con mayor impacto en los tipos de ignición

Con base en los 32 campos encontrados en la literatura e incluidos en la base de datos, se construyen las tablas 65 a 70, con el objetivo de determinar en qué condiciones es frecuente encontrar cada tipo de ignición.

Tabla 65.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición espontánea (n=11).*

<b>Ignición espontánea</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Profundidad, [ft]	1540	4500
Espesor neto [ft]	15	128
Litología	Arenisca	
Permeabilidad, [mD]	500	2000
Porosidad, [%]	25	35
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	230	950
Temperatura del yacimiento, [°F]	104	146
Gravedad del aceite, [API]	13	25
Viscosidad del aceite [cP]	26	430

Ignición espontánea		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPERIOR
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	40	94
tiempo de ignición (días)	4	300
Tipo de combustión	seca	húmeda

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

En las siguientes figuras se puede observar el intervalo en el que se mueve la profundidad, y temperatura del yacimiento para todos los yacimientos estudiados, donde el color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se presenta ignición espontánea.

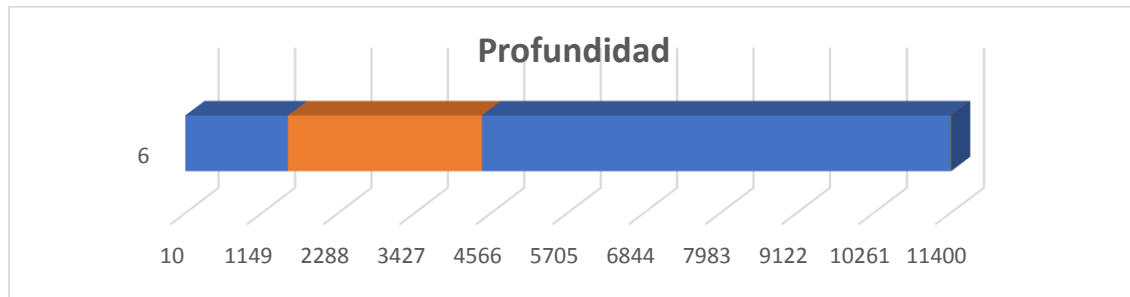


Figura 24. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta ignición espontánea

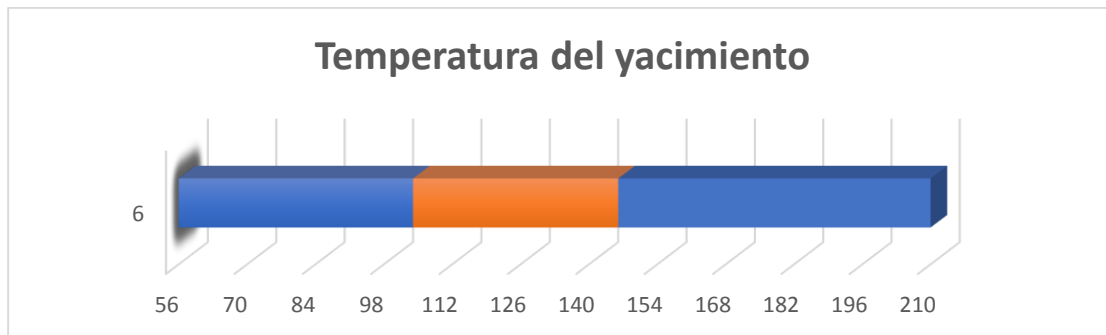


Figura 25. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta ignición espontánea

La ignición espontánea se ha aplicado en yacimientos que poseen un rango de temperaturas más elevadas ya que afecta directamente la tasa de oxidación del crudo; al presentar mayores temperaturas en el yacimiento, el crudo posee mayor tasa de oxidación y por ende el tiempo de ignición es menor para dar inicio a la ignición espontánea. Esto se ve reflejado estadísticamente en yacimientos que alcanzan profundidades de 4500 ft, con rangos intermedios de temperatura que comprenden entre 104 a 146°F.

Tabla 66.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición asistida (n=18)*

Ignición asistida		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPERIOR
Profundidad, [ft]	115	3440
Espesor neto [ft]	9	99
Litología	arenisca	arenisca semi-consolidada
Permeabilidad, [mD]	540	6000
Porosidad, [%]	22	33
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	80	800
Temperatura del yacimiento, [°F]	70	133
Gravedad del aceite, [API]	17	20
Viscosidad del aceite [cP]	30	1500
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	5	94
tiempo de ignición (días)	5	200
tipo de combustión	seca	húmeda

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

En las siguientes figuras se puede observar el intervalo en el que se mueve la profundidad, la temperatura del yacimiento y la gravedad API para todos los yacimientos estudiados, donde el

color naranja indica el rango perteneciente a la propiedad estudiada de los campos en donde se da la ignición asistida.

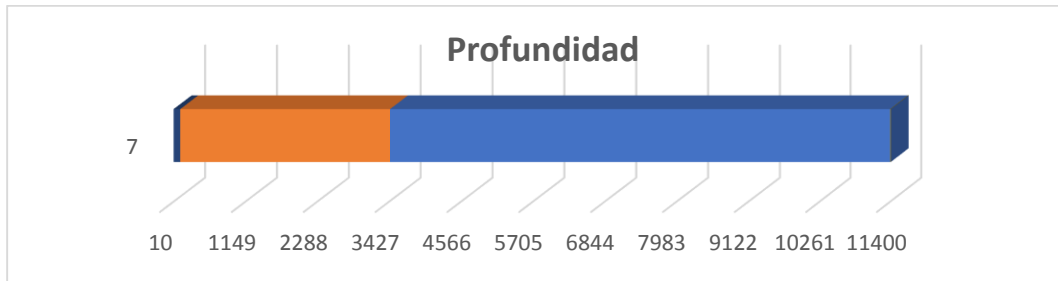


Figura 26. Variación de la profundidad de los campos en donde se presenta la ignición asistida

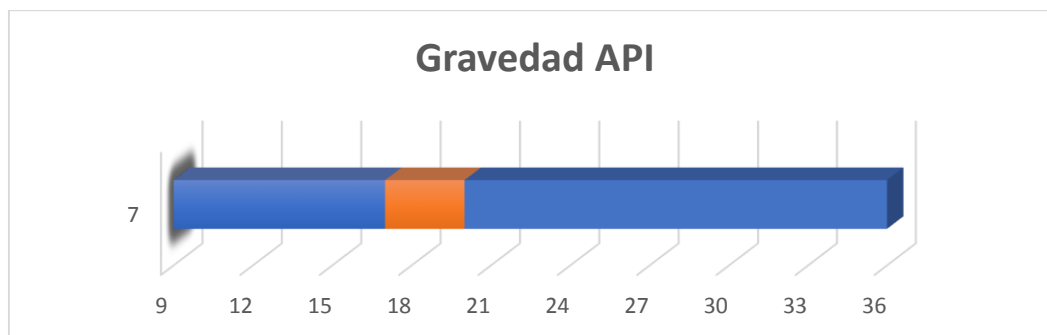


Figura 27. Variación de la gravedad API de los campos en donde se presenta ignición asistida

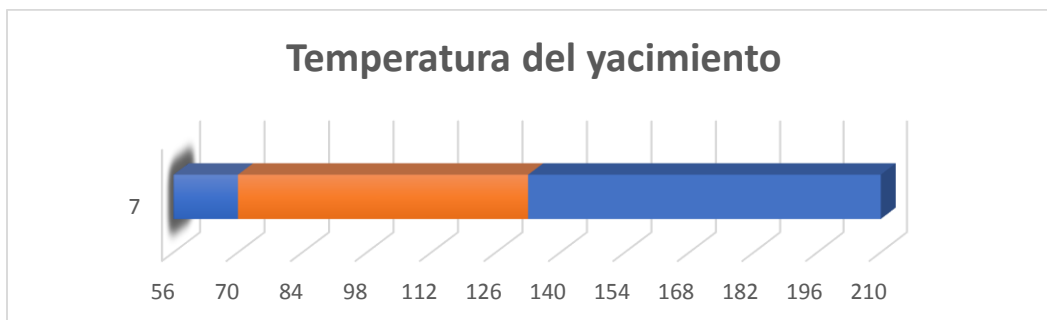


Figura 28. Variación de la temperatura del yacimiento de los campos en donde se presenta ignición asistida

La ignición asistida se da principalmente, cuando las temperaturas presentes en el yacimiento no son lo suficientemente altas para incrementar la velocidad de reacción, al ser bajas las temperaturas, se necesita de incrementar la misma con un método artificial para aumentar el éxito del proceso; esto se ve reflejada estadísticamente en yacimientos con bajos rangos de profundidad, en donde las temperaturas no superan los 133°F.

Tabla 67.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por calentadores eléctricos (n=9).*

Calentadores eléctricos		
PROPIEDADES	RANGO	
	INFERIOR	SUPERIOR
Profundidad, [ft]	10	2625
Espesor neto [ft]	3	89
Litología	Arenisca y arenisca consolidada	
Permeabilidad, [mD]	506	2377
Porosidad, [%]	21	39
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	30	290
Temperatura del yacimiento, [°F]	65	118
Gravedad del aceite, [API]	16	25
Viscosidad del aceite [cP]	21	2000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	45	94
tiempo de ignición (días)	19	200
tipo de combustión	seca	húmeda

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

Estadísticamente se aprecia la limitación de la profundidad para este método de ignición (debido a pérdidas en el cable), ya que los casos presentados reportan una máxima profundidad de 2,625 ft.

Tabla 68.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por quemadores de gas (n=10).*

<b>Quemadores de gas</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Profundidad, [ft]	100	4300
Espesor neto [ft]	8	145
Litología	arenisca	
Permeabilidad, [mD]	153	15000
Porosidad, [%]	15	39
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	40	1450
Temperatura del yacimiento, [°F]	56	158
Gravedad del aceite, [API]	10	21
Viscosidad del aceite [cP]	50	150000
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	5	72
tiempo de ignición (días)	3	180
tipo de combustión	seca	húmeda

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project, West Casa Blanca Field, Duval Coun

El uso de quemadores de gas permite un buen control de la temperatura de los gases inyectados y puede funcionar a una profundidad mayor que otros métodos, como se evidencia estadísticamente en casos donde la profundidad alcanza los 4300 ft, con crudos de hasta 21° API.

Tabla 69.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por inyección química (n=1).*

<b>Inyección Química (se presentó en 1 solo campo)</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Profundidad, [ft]	2132	2789
Espesor neto [ft]	9	14
Litología	Arenisca	

<b>Inyección Química (se presentó en 1 solo campo)</b>		
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>	
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>
Permeabilidad, [mD]	600	6000
Porosidad, [%]	30	
Temperatura del yacimiento, [°F]	120	133
Gravedad del aceite, [API]	16	21
Viscosidad del aceite [cP]	30	120
tiempo de ignición (días)	180	
tipo de combustión	Húmeda	

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

El hecho de tener un solo campo de muestra para la ignición química no permite concluir estadísticamente su aplicabilidad, más allá de lo discutido en el marco teórico (Capítulo 1).

Tabla 70.

*Rangos de las propiedades de mayor impacto en la ignición por calentadores catalíticos (n=2).*

<b>Calentadores catalíticos</b>			
<b>PROPIEDADES</b>	<b>RANGO</b>		
	<b>INFERIOR</b>	<b>SUPERIOR</b>	
Profundidad, [ft]	1600	3650	
Espesor neto [ft]	4	9	
Litología	arenisca	arenisca	semi-consolidada
Permeabilidad, [mD]	500	1000	
Porosidad, [%]	28	35	
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	200	300	
Temperatura del yacimiento, [°F]	112	138	
Gravedad del aceite, [API]	20	24	
Viscosidad del aceite [cP]	26	174	
Saturación del aceite al inicio del proyecto [%]	52	55	
tipo de combustión	seca		

Adaptado de SPE 3776-MS Performance Review - In-Situ Combustion Project.

De forma similar al caso anterior, dos casos no se consideran suficientes para extraer información estadística significativa

## 2.22. Resumen estadístico de los métodos de ignición en la literatura

A continuación, se presentan algunos gráficos que resumen la frecuencia de aplicación de cada método de ignición y tipo de combustión, tomando como base los 32 campos con información disponible.

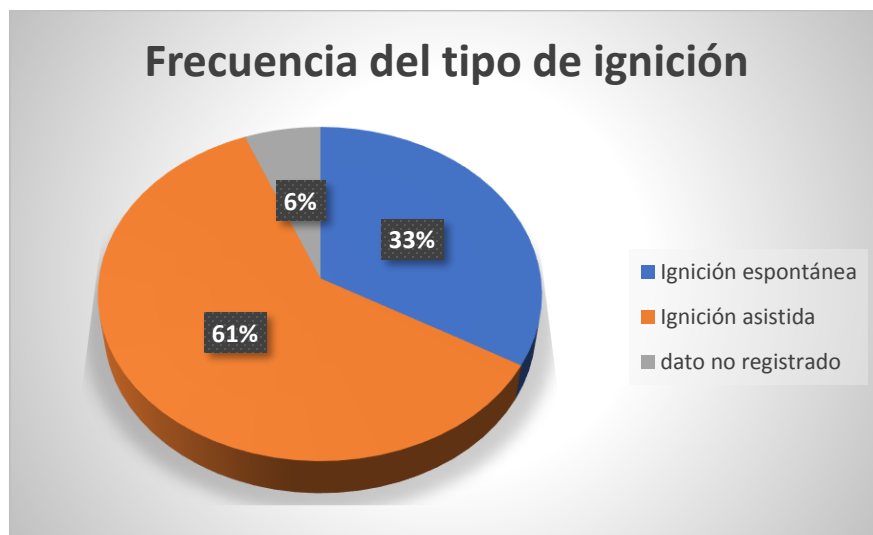


Figura 29. Frecuencia del tipo de ignición

La ignición asistida se aplicó un 61% de los campos (20 de 32), relegando a la ignición espontánea a un segundo lugar con el 33% de ocurrencia.

Del total de campos que presentaron ignición asistida (20), sólo el 5% implementó ignición por inyección química y el 48% permitió el uso de quemadores de gas, catalogándose este último como

el método más aplicado con un total de 10 campos. Estos resultados se pueden observar en la figura 30.

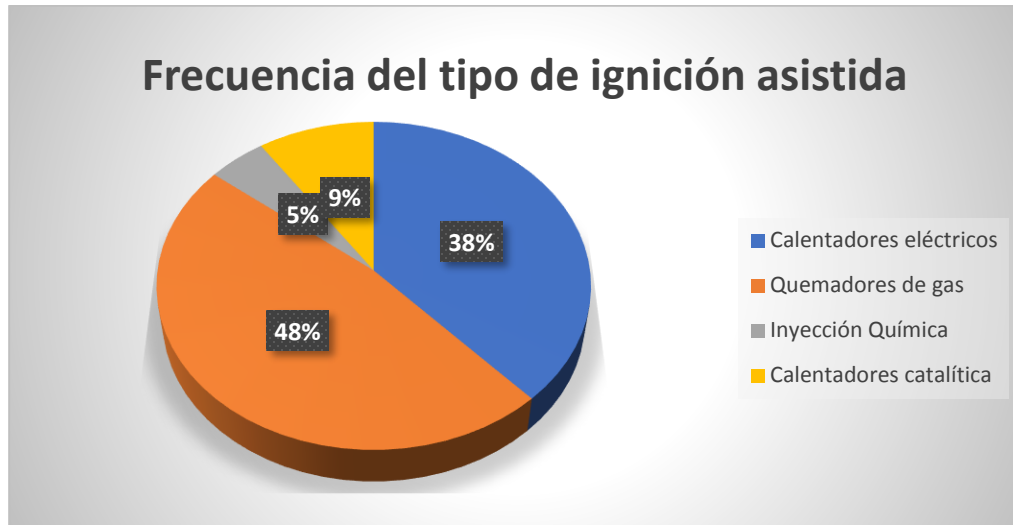


Figura 30. Frecuencia del tipo de ignición asistida

La figura 31 ilustra los porcentajes referentes al tipo de combustión que fue desarrollado en los 32 campos estudiados.

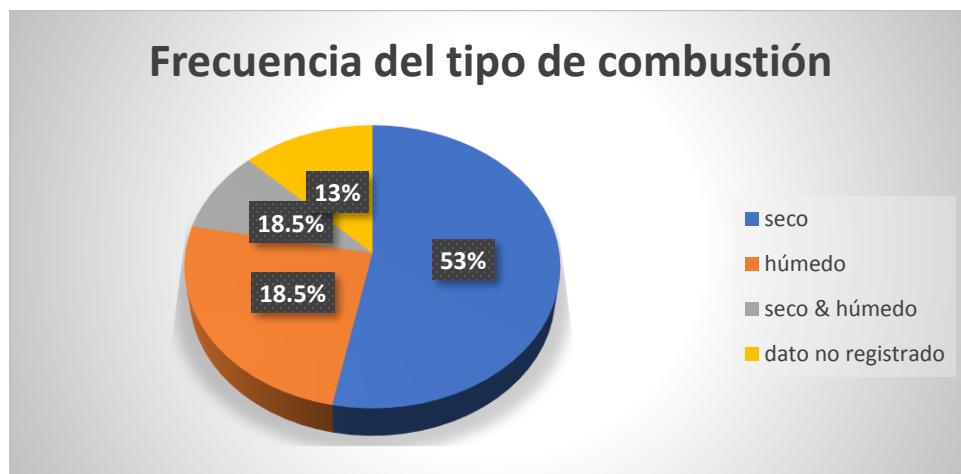
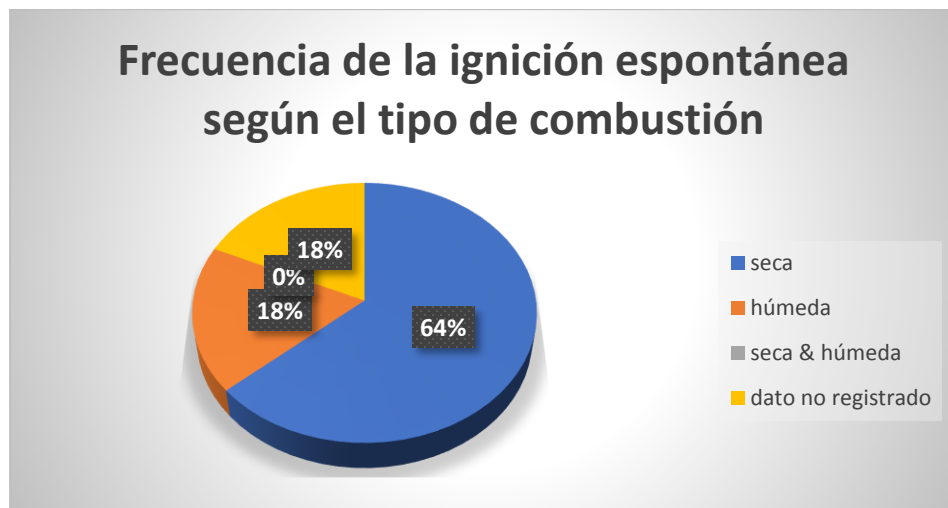


Figura 31. Frecuencia del tipo de combustión

De acuerdo con los datos obtenidos, la combustión seca fue el tipo de combustión que más se desarrolló, con 53%, equivalente a 17 campos de crudo pesado; 11 casos representan el 37% de los 32 campos estudiados, los cuales representan la implementación tanto de la combustión húmeda como de los métodos combinados.

Las figuras 32 y 33 muestran la frecuencia del tipo de combustión desarrollado para los casos de ignición espontánea y asistida, respectivamente.



*Figura 32.* Frecuencia de la ignición espontánea según el tipo de combustión



*Figura 33.* Frecuencia de la ignición asistida según el tipo de combustión

Las figuras 32 y 33 evidencian que la combustión seca se realiza más con métodos de ignición espontánea que con asistida. Esto se explica debido a que la inyección conjunta de agua reduce la temperatura del frente de combustión, del cual se tiene mayor incertidumbre si no se hizo ignición vigorosa, como es el caso de la ignición espontánea, donde es paulatina.

### 3. Análisis y metodología del desarrollo del Software D.I.S.

El objetivo principal del Software D.I.S. desarrollado en este proyecto, es establecer analogías entre un yacimiento de estudio y 32 campos de crudo pesado a nivel mundial en los que se ha implementado la combustión in situ y reportan información del proceso de ignición.

El análisis por analogías empleado disminuye la incertidumbre al encontrar yacimientos con propiedades similares, identificando el potencial comportamiento de la etapa de ignición del caso de estudio, y así proporcionar información adicional que suministre bases y criterios para la realización de estudios más detallados.

Las analogías se realizan mediante ponderaciones que permite asignar un peso relativo o grado de importancia a las variables seleccionadas como analógicas, para dar un mayor nivel de confianza en los resultados (Tavera, Muñoz, & Jimenez, 2010). El objetivo de comparar los parámetros analógicos de los campos almacenados en la base de datos con los parámetros del campo **n** (agregado por el usuario), es encontrar los primeros campos más análogos a **n**, asignándoles mediante el promedio o la media o a criterio del usuario, una puntuación relativa al campo al cual se realizará la analogía (Tavera, Muñoz, & Jimenez, 2010).

Se evaluó también la posibilidad de asignar este porcentaje mediante un modelo estadístico que asignara el peso o grado de importancia a los parámetros básicos (parámetros de screening), evaluando el grado de dispersión o la densidad de información disponible de cada parámetro a consultar; pero debido a la ausencia de valores de algunos parámetros de campos presentes en la base de datos, se presentaron errores en la realización de las analogías para el cálculo de esta ponderación.

Las variables analógicas consideradas para la realización de este software son presentadas en la siguiente figura.

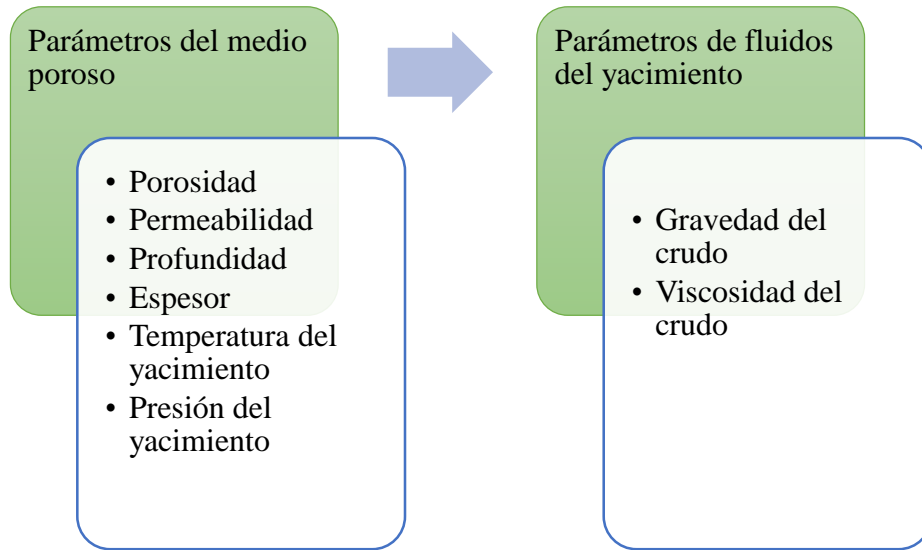


Figura 34. Parámetros analógicos.

### 3.1 Bases de datos relacionales para el desarrollo del software D.I.S.

Para el desarrollo del software se empleó el modelo relacional, el cual permite que los datos sean almacenados en tablas y se pueda acceder a ellos mediante consultas escritas en SQL, ofreciendo así las siguientes ventajas:

- Simplicidad y generalidad
- Facilidad de uso para el usuario final
- Periodos cortos de aprendizaje
- Las consultas de información se especifican de forma sencilla.

Las bases de datos relacionales están constituidas por una o más tablas que contienen la información de una forma organizada. Las tablas son un medio de representar la información de una forma más compacta y es posible acceder a dicha información contenida en dos o más tablas (Korth & Silberschatz, 1987).

Las bases de datos relacionales cumplen las siguientes leyes básicas (Korth & Silberschatz, 1987):

- Generalmente, contendrán muchas tablas.
- Una tabla sólo contiene un número fijo de campos.
- El nombre de los campos de una tabla es distinto.
- Cada registro de la tabla es único.
- El orden de los registros y de los campos no están determinados.
- Para cada campo existe un conjunto de valores posibles.

**3.1.1 Diseño de las bases de datos relacionales.** El primer paso para crear una base de datos es planificar el tipo de información que se quiere almacenar en la misma, teniendo en cuenta dos aspectos: la información disponible y la información requerida (Korth & Silberschatz, 1987).

La planificación de la estructura de la base de datos, en particular de las tablas, es vital para la gestión efectiva de la misma. El diseño de la estructura de una tabla consiste en una descripción de cada uno de los campos que componen el registro y los valores o datos que contendrá cada uno de esos campos. Es necesario definir correctamente la base de datos, ya que un mal diseño hará que el sistema sea lento y los resultados no sean los esperados (Korth & Silberschatz, 1987).

Las propiedades son los distintos tipos de datos que componen la tabla (por ejemplo: en la base de datos desarrollada en este proyecto existe una tabla denominada parámetros de analogía que consta de 8 propiedades: permeabilidad, porosidad, profundidad, espesor neto, presión de yacimiento, temperatura del yacimiento, gravedad del crudo y viscosidad del crudo). La definición de una propiedad requiere: el nombre de la propiedad, el ancho de la propiedad, etc. Generalmente

los tipos de propiedades que se pueden almacenar son los siguientes: Texto (caracteres), Numérico (números), Fecha-Hora, Lógico (informaciones lógicas), si-no, verdadero-falso, etcétera.

Los registros constituyen la información que va contenida en las propiedades de la tabla, por ejemplo: para el caso de este proyecto, en la tabla denominada “parámetros de analogía”, los registros serían los valores numéricos correspondientes a los ocho parámetros de analogía.

En resumen, el principal aspecto para tener en cuenta durante el diseño de una tabla es determinar claramente los campos necesarios, definirlos en forma adecuada con un nombre, especificando su tipo y su longitud (Korth & Silberschatz, 1987).

### **3.2 Python para el diseño del software**

El desarrollo del software se llevó a cabo mediante módulos de PYTHON. Este cuenta con un sistema práctico, permitiendo crear una interfaz interactiva, fácil de manejar y agradable al usuario.

PYTHON está orientado a la realización de programas para Windows, logrando incorporar todos los elementos de este entorno informático: ventanas, botones, cajas de diálogo y de texto, botones de opción y de selección, barras de desplazamiento, gráficos, menús, etcétera (Unibersitatea, 2000).

PYTHON es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos (Rossum, 2009). Es un lenguaje interpretado, lo cual puede ahorrar mucho tiempo durante el desarrollo, ya que no es necesario compilar ni enlazar.

El intérprete puede usarse interactivamente, lo que facilita experimentar con características del lenguaje, escribir programas descartables, o probar funciones cuando se hace desarrollo de programas de abajo hacia arriba. Python permite escribir programas compactos y legibles (Rossum, 2009). Los programas en Python son típicamente más cortos que sus programas equivalentes en C, C++ o Java por varios motivos:

- Los tipos de datos de alto nivel permiten expresar operaciones complejas en una sola instrucción.
- La agrupación de instrucciones se hace por sangría en vez de llaves de apertura y cierre.
- No es necesario declarar variables ni argumentos.

PYTHON permite separar un programa en módulos que pueden reusarse en otros programas en Python. Viene con una gran colección de módulos estándar que se puede usar como base de los programas. Algunos de estos módulos proveen cosas como entrada/salida a archivos, llamadas al sistema, sockets, e incluso interfaces a sistemas de interfaz gráfica de usuario como Tk (Rossum, 2009).

Para la programación en PYTHON, se trabajó con los siguientes módulos:

- **NUMPY:** Uno de los módulos más importantes de Python es Numpy. Este módulo es el encargado de añadir toda la capacidad matemática y vectorial a Python haciendo posible operar con cualquier dato numérico o *array*. Incorpora operaciones tan básicas como la suma o la multiplicación u otras mucho más complejas como la transformada de Fourier o el álgebra lineal. Además, incorpora herramientas que permite incorporar código fuente de otros lenguajes de programación como C/C++ o Fortran, lo que incrementa notablemente su compatibilidad e implementación (Herrera Fernández & Sánchez Brea, 2013).

- PANDAS: es una biblioteca de código abierto que proporciona estructuras de datos y herramientas de análisis de datos de alto rendimiento y fácil de usar para el lenguaje de programación Python. Este módulo hace referencia a una librería que permite trabajar con datos estructurados en filas y columnas (como una hoja de Excel) (Blanca, Cañizares, Montero Pau, Ziarsolo, & García Carpintero, 2010). Los principales tipos de datos que pueden representarse con pandas son:

- Datos tabulares con columnas de tipo heterogéneo con etiquetas en columnas y filas.
- Series temporales.

Pandas proporciona herramientas que permiten (Blanca, Cañizares, Montero Pau, Ziarsolo, & García Carpintero, 2010):

- Leer y escribir datos en diferentes formatos: CSV, Microsoft Excel, bases SQL y formato HDF5
- Seleccionar y filtrar de manera sencilla tablas de datos en función de posición, valor o etiquetas.
- Fusionar y unir datos.
- Transformar datos aplicando funciones tanto en global como por ventanas
- Manipulación de series temporales

En Pandas existen tres tipos básicos de objetos, todos ellos basados a su vez en Numpy (Blanca, Cañizares, Montero Pau, Ziarsolo, & García Carpintero, 2010):

- Series (listas, 1D): una serie se comporta tanto como un *array* o como un diccionario. La idea central es que la serie es un *array* con una indexación "más flexible".

- DataFrame (tablas, 2D): es una estructura de datos bidimensional, con columnas de distintos tipos, como una tabla de Excel o de SQL. Un DataFrame se puede generar con un diccionario de listas, *arrays* 1D o Series.
- Panels (tablas 3D): los paneles son para tipos de datos de más de dos dimensiones.
- OPENPYXL: es una librería que se utiliza para leer y escribir archivos Excel (xlsx/xlsm/xltx/xltx) permitiendo acceder a todas las filas y columnas de un fichero Excel (Herrera Fernández & Sánchez Brea, 2013).

### 3.3 Módulo de analogías

La evaluación de analogías permite, por medio de un razonamiento basado en la existencia de atributos similares entre dos campos diferentes, definir el potencial de aplicación de un determinado proceso de recuperación (León Martínez, 2013). Una vez seleccionados los campos analógicos, se pueden identificar las prácticas asociadas con la aplicación del método de recobro, incluyendo los problemas y soluciones presentes en su aplicación, al igual que los problemas relacionados con la implementación del proceso.

En este proyecto, el modelo analógico compara un campo de estudio en Colombia con 37 casos de campo a nivel mundial que implementaron la combustión in situ como método de recobro mejorado. Esta comparación se realiza por medio de las propiedades de la roca y de los fluidos.

Para el desarrollo del modelo analógico se deben tener en cuenta las siguientes variables:

- Factor de similitud: esta variable hace referencia a la similitud entre el valor de una propiedad determinada del campo en estudio, con respecto al valor de la misma propiedad que pertenece a cada uno de los campos en la base de datos.

- Puntaje: se refiere a la puntuación obtenida por un campo de la base de datos con respecto al campo de estudio. El mayor de todos estos valores indica el campo más análogo al campo en estudio.

La similitud entre el campo de estudio y los campos de la base de datos es calculada de la siguiente manera:

- Una vez seleccionadas las variables analógicas, aquellas sobre las cuales se realizará la comparación, es necesario asignarle un peso a cada una de ellas según la metodología descrita anteriormente, o de manera arbitraria, teniendo en cuenta las consideraciones de un experto.
- Para la realización de las analogías se procede a seleccionar el método de cálculo de los índices. Las opciones utilizadas en este proyecto son el método del valor promedio y el método de Jaccard modificado (ver explicación en la siguiente sección).
- Se procede a comparar cada una de las propiedades analógicas del campo de estudio con su respectiva contraparte en cada uno de los campos de la base de datos que pertenezcan a los procesos seleccionados.
- Para cada una de las propiedades numéricas se debe calcular la máxima de las diferencias absolutas entre la propiedad del campo de estudio y las propiedades de los campos de la base de datos.
- Sumar el peso de las propiedades analógicas que sí se han podido comparar, descartando aquellas propiedades que no han sido reportadas.
- Hallar la suma de los productos del peso de la propiedad por el puntaje obtenido en la comparación.

- Calcular el índice de semejanza de cada campo dividiendo la sumatoria de las semejanzas sobre la sumatoria de los pesos de las propiedades reportadas del paso anterior.
- El campo con el mayor índice es el campo más análogo al campo de estudio.

**3.3.1 Método del valor promedio** Si se utiliza el método del valor promedio, para comparar un rango de valores, se toma el valor medio y se compara como si fueran valores puntuales.

**3.3.2 Método de Jaccard modificado** En el método de Jaccard modificado se tiene que establecer un índice de concordancia de los elementos del rango (Kruskal, 1964). Por ende, se parte del cálculo del índice o coeficiente de Jaccard ( $J_j$ ) y la distancia de Jaccard. Este permite medir el grado de similitud entre dos conjuntos, sea cual sea el tipo de elementos. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes (Kruskal, 1964):

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A| + |B| - |A \cap B|} \quad (16)$$

$$d_j(A, B) = 1 - J(A, B) = \frac{|A \cup B| - |A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (17)$$

El rango de este índice va desde cero (0) cuando no hay propiedades compartidas, hasta uno (1) cuando los dos sitios comparten las mismas propiedades. Este índice mide diferencias en la presencia o ausencia de propiedades (Kruskal, 1964).

Con base en estos parámetros se establece qué tan análogo es el campo de estudio a los de la base de datos.

Tabla 71.

*Criterios del método de Jaccard modificado para analogías.*

<b>Propiedades del campo de estudio</b>	<b>Propiedades de los campos de referencia en la base de datos</b>	<b>Casos</b>	<b>Resultado</b>
Rango	Rango	El rango de las propiedades del campo de estudio está contenido completamente en el de las propiedades del campo de referencia.	Se suma al puntaje del campo todo el valor del peso de la propiedad.
		Los rangos solo comparten una parte de los valores.	Se suma el puntaje del campo el producto del peso de la propiedad por el cociente entre la intersección de los rangos sobre la unión de estos.
		Los rangos no comparten valores.	No se suma nada al puntaje del campo de referencia.
Rango	Valor puntual	El valor puntual cabe completamente en el rango de valores del campo de estudio.	Se suma el peso de la propiedad al puntaje del campo de referencia.
		El valor puntual no está en el rango.	No se le da un puntaje al campo de referencia respecto de la propiedad evaluada.
Valor puntual	Rango	El valor puntual cabe completamente en el rango de valores del campo de referencia.	Se suma el peso de la propiedad al puntaje del campo.

Propiedades del campo de estudio	Propiedades de los campos de referencia en la base de datos	Casos	Resultado
Valor puntual	Valor puntual	El valor puntual no está en el rango.	No se le da un puntaje al campo de referencia respecto de la propiedad evaluada.
			Al puntaje del campo se suma al puntaje el peso multiplicado por (1 menos el cociente entre la diferencia sobre la máxima de las diferencias). La máxima de las diferencias de una propiedad se obtiene hallando el valor absoluto entre los valores de los campos de la base de datos respecto del valor del campo de estudio. Si las propiedades tienen valores correspondientes a un rango, se toma el punto medio de este.

### 3.4 Aplicaciones del Software D.I.S.

El Software D.I.S. permite al usuario realizar las siguientes tareas:

- Consultar datos de algún yacimiento en particular que haya sido sometido al método de recobro mejorado (Combustión In Situ) que tenga información específicamente de la etapa de ignición.

- Realizar analogías o comparaciones entre potenciales prospectos y los campos que se encuentren listados en la base de datos.
- Actualizar los datos existentes de cualquier campo
- Incorporar información de un campo o un yacimiento nuevo.

Según lo dicho anteriormente, el software se divide en dos secciones: *Información y Analogías*.

**3.4.1 Información** En esta sección se muestra la información de todos los campos almacenados en la base de datos distribuida en varias categorías. Esta información es modificable con el tiempo. Adicionalmente, se pueden insertar datos de nuevos campos a la base de datos.

**3.4.2 Analogías** En esta sección se definen los datos de entrada del nuevo campo para realizar una analogía. Una vez seleccionados los parámetros de analogía, se calculan o ingresan sus respectivos pesos relativos. En una pantalla de salida de resultados se visualiza en dos secciones la descripción final del proceso de analogía:

- Campo resultado: contiene el campo cuyo puntaje le permite ser el más análogo al campo introducido. Muestra el puntaje final del campo, así como el número de campos utilizados para el proceso, su puntaje respectivo y el valor de las variables analizadas de cada uno de ellos.
- Campo descripción de resultados: presenta la descripción de la etapa de ignición de los campos más análogos expuestos en el campo resultado, los problemas y soluciones encontradas en él, junto con los métodos utilizados para detectar esa etapa.

En la figura 35 se describe el funcionamiento del Software D.I.S en un diagrama de flujo.

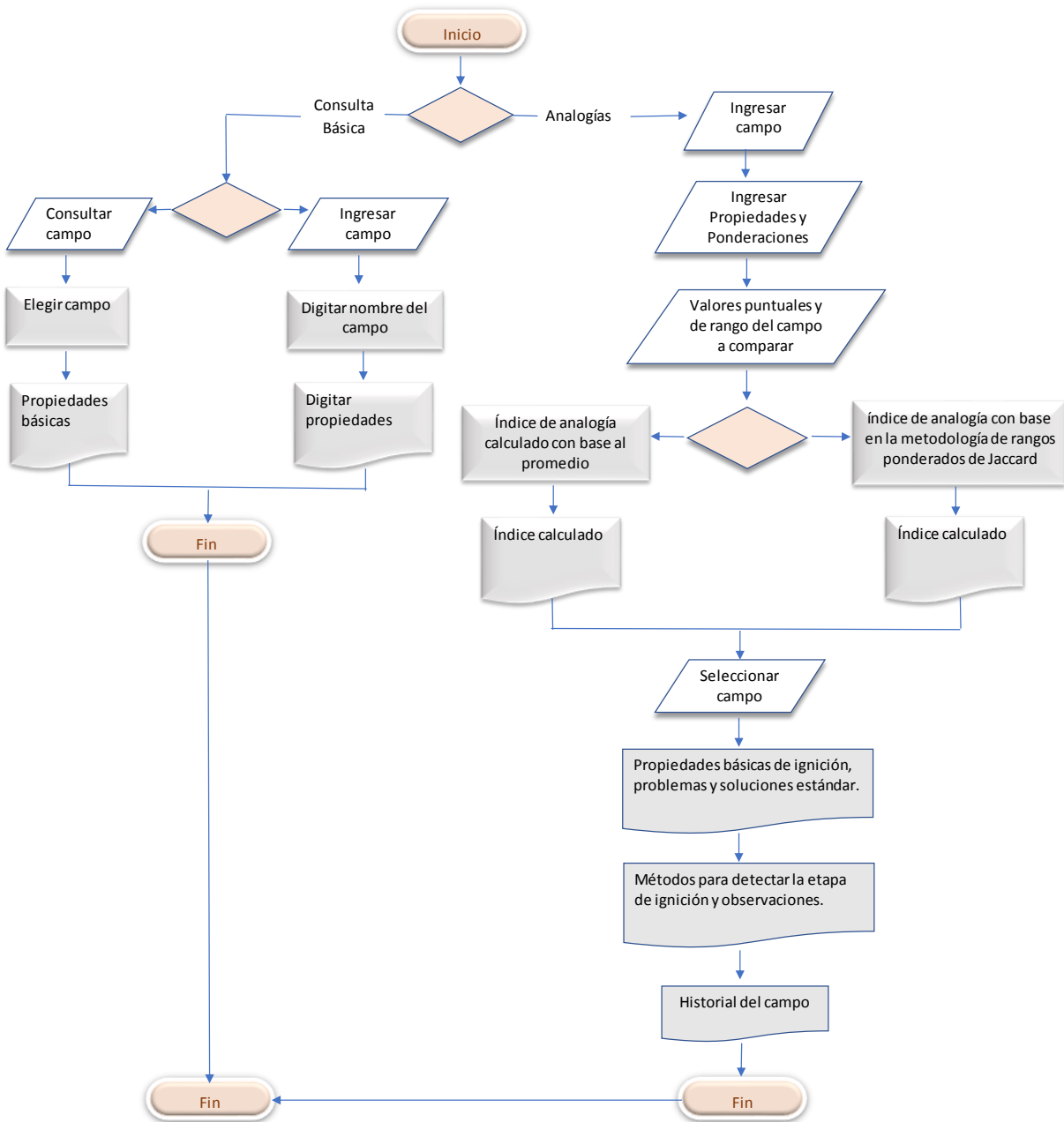


Figura 35. Diagrama de flujo del Software D.I.S.

#### 4. Caso de estudio

A continuación, se describe un campo de crudo pesado colombiano que será evaluado en el software para determinar los análogos de yacimientos sometidos al proceso de CIS, así como las diversas características de la etapa de ignición.

Tabla 72.

*Parámetros analógicos del campo bajo estudio*

Propiedades analógicas del campo bajo estudio	Valor
Profundidad, [ft]	7500 - 8500
Espesor neto [ft]	100 - 300
Permeabilidad, [mD]	2000 - 4000
Porosidad, [%]	18 - 20
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	800 - 1200
Temperatura del yacimiento, [°F]	180 - 200
Gravedad del aceite, [API]	8 - 10
Viscosidad del aceite [cP]	120 - 200

#### Desarrollo del campo de aplicación

A. Se calculan los pesos de cada parámetro de analogía teniendo en cuenta la metodología descrita en el capítulo 3. Inicialmente se evaluará el campo bajo ponderaciones establecidas por el software, las cuales poseen un valor igual para cada parámetro. Estos resultados se visualizan en la siguiente figura.

Modulo para realizar analogia de un nuevo campo

Nombre del campo:		campo estudio			
Propiedades para analogia	Unidades	Valor único	Valor minimo	Valor maximo	Ponderacion(%)
Viscosidad del crudo	cp		120	200	12.5
Espesor neto	ft		100	300	12.5
Gravedad API del crudo	°API		8	10	12.5
Permeabilidad	md		2000	4000	12.5
Porosidad	%		18	20	12.5
Presion del yacimiento al inicio del proyecto	psi		800	1200	12.5
Temperatura del yacimiento	°F		180	200	12.5
Profundidad	ft		7500	8500	12.5

Figura 36. Ejecución de las analogías según las ponderaciones establecidas por el software

B. Se procede a calcular los índices comparativos mediante el método de Jaccard y Valor Promedio para cada campo de la base de datos con respecto al campo nuevo y determinar cuáles son los campos más análogos. Estos resultados son mostrados en la siguiente tabla.

Resultado de la analogia del Campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad API	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacim	Temperatura del	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	26.870430367768293	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
3	25.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
4	25.0	Kyrook	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
5	25.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
6	15.458015267175574	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
7	12.752224975780699	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
8	12.5	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
9	12.5	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
10	12.5	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
11	12.5	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
12	12.5	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
13	12.5	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
14	12.5	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
15	12.5	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
16	12.5	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
17	12.5	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
18	11.894047222354454	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
19	4.731063335176441	Videle	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
20	3.452970297029703	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
21	3.2478721556366166	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	2.367109634551495	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
23	1.9822761194029852	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
24	1.5157406752785045	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.0038122250432687547	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0
30	0.0	SHENGLI		47.0		1100.0	26.0			4101 - 4430

Figura 37. Resultado de analogías según las ponderaciones establecidas por el sistema

C. Se repite el anterior procedimiento evaluando varios conjuntos de factores de peso para cada parámetro y comparar así yacimientos con características roca-fluidos similares. Esto se

hace teniendo en cuenta que algunos de los parámetros del caso de estudio se encuentran por fuera de los rangos presentados en los 32 campos de la base de datos, y que se deben buscar análogos diversos para poder tener una mejor idea de los escenarios en la ignición.

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 30% en profundidad y 10% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del Campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad AP	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacim	Temperatura del	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	21.496344294214637	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
3	20.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
4	20.0	Kyrook	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
5	20.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
6	12.366412213740459	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
7	10.201779980624561	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
8	10.0	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
9	10.0	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
10	10.0	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
11	10.0	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
12	10.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
13	10.0	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
14	10.0	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
15	10.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
16	10.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
17	10.0	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
18	9.51523777883565	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
19	3.7848506681411527	Videle	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
20	2.7623762376237626	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
21	2.598297724509293	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	1.8936877076411962	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
23	1.585820895622388	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
24	1.2125925402228037	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.0030497800346150038	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0		86.0	1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0

Figura 38. Resultado de analogías con un porcentaje del 30% en la profundidad

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 25% en la temperatura del yacimiento y 10.71% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad AF	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacim	Temperatura del ya	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	35.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
3	25.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
4	21.496344294214637	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
5	20.0	Kyrock	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
6	17.366412213740457	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
7	15.0	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
8	10.201779980624561	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
9	10.0	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
10	10.0	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
11	10.0	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
12	10.0	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
13	10.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
14	10.0	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
15	10.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
16	10.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
17	10.0	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
18	9.515237777883565	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
19	3.7848506681411527	Videle	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
20	2.7623762376237626	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
21	2.598297724509293	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	1.8936877076411962	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
23	1.585820895522388	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
24	1.2125925402228037	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.0030497800346150038	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0

Figura 39. Resultado de analogías con un porcentaje del 25% en la temperatura del yacimiento

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 30% en la presión del yacimiento y 10% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del Campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad AF	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacimier	Temperatura del ya	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	40.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
3	32.36641221374046	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
4	30.0	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
5	21.496344294214637	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
6	20.0	Kyrock	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
7	20.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
8	10.201779980624561	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
9	10.0	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
10	10.0	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
11	10.0	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
12	10.0	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
13	10.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
14	10.0	Gloniana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
15	10.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
16	10.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
17	10.0	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
18	9.515237777883565	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
19	3.7848506681411527	Videle	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
20	2.7623762376237626	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
21	2.598297724509293	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	1.8936877076411962	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
23	1.585820895522388	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
24	1.2125925402228037	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.0030497800346150038	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0

Figura 40. Resultado de analogías con porcentaje del 30% en la presión del yacimiento

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 25% para porosidad y permeabilidad con un 8.33% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del Campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad API	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacimiento	Temperatura del	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	33.333	Kyrook	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
3	25.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
4	25.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
5	25.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
6	20.407860735536588	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
7	17.45463444470891	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
8	16.666999999999998	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
9	16.666	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
10	14.061199090634247	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
11	10.305167938931298	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
12	8.767508598098804	Vidale	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
13	8.334	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
14	8.334	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
15	8.334	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
16	8.334	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
17	8.334	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
18	8.334	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
19	8.333	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
20	4.73421926910299	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
21	4.165341323606045	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	3.031481350557009	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
23	2.302164356435644	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
24	1.3216231343283582	Brea Oliinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
25	0.007624450086537509	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0
30	0.0	SHENGLI		47.0		1100.0	26.0			4101 - 4430

Figura 41. Resultado de analogías con porcentaje del 25% en la porosidad y permeabilidad

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 25% en viscosidad, 15% en la gravedad API y 10% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad AP	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacim	Temperatura del	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	26.496344294214637	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
3	25.0	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
4	25.0	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
5	25.0	Kyroock	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
6	25.0	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
7	25.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
8	25.0	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
9	20.501117728968932	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
10	20.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
11	15.916030534351144	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
12	11.415237777883563	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
13	10.0	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
14	10.0	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
15	10.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
16	10.0	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
17	10.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
18	10.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
19	6.905940594059406	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
20	3.876383848919185	Vidale	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
21	2.598297724509293	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
22	1.8936877076411962	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
23	1.585820895522388	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
24	1.212925402228037	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.0030497800346150038	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0
30	0.0	SHENGLI		47.0		1100.0	26.0			4101 - 4430

Figura 42. Resultado de analogías con porcentaje de 25% en el espesor y 15% en la permeabilidad

- Resultado de analogía de acuerdo con los siguientes porcentajes: 25% en el espesor, 15% en la permeabilidad y 10% para cada parámetro analógico restante.

Resultado de la analogía del Campo: campo estudio

	Puntaje(%)	Campo	Viscosidad del	Espesor neto(ft)	Gravedad AP	Permeabilidad(md)	Porosidad(%)	Presion del yacim	Temperatura del	Profundidad(ft)
1	100.0	campo estudio	120.0 - 200.0	100.0 - 300.0	8.0 - 10.0	2000.0 - 4000.0	18.0 - 20.0	800.0 - 1200.0	180.0 - 200.0	7500.0 - 8500.0
2	37.24451644132195	Pauls valley	7000 - 8000	100.0	10.0	878 - 2505	39.0	1400.0	110.0	4300.0
3	35.0	Midway Sunset	110.0	129.0	14.0	1500.0	36.0	950.0	125.0	2100 - 2700
4	25.0	West Newport_ Inyeccion de aire en crudos pesad	700.0	120.0	15.0	500 - 1070	37.0	195.0	105.0	800 - 2100
5	25.0	Tia Juana	6000.0	128.0	12 - 13	5000.0	39.0		104.0	1540 - 1600
6	25.0	Kyroock	150000.0	20.0	10.0	2000.0	22.0		56.0	100.0
7	20.0	Forest Hill	1006.0	15.0	10.0	950.0	28.0	750.0	185.0	4800 - 5000
8	15.0	Kramai	21 - 22	3.0	25.0	2377.0	21 - 27		95.0	10 - 17
9	15.0	Cold Lake	200000.0	75.0	12.0	2000.0	33.0	391.0	61.0	1400.0
10	15.0	Carlyle	700.0	35 - 45	19.0	2000.0	25.0	230.0	74.0	860.0
11	12.37285666825346	East Venezuela	400.0	19.0	9 - 12	2000 - 5000	35.0	1360.0		4500.0
12	12.366412213740459	Glen Hummel	70 - 150	8.0	21.0	1000 - 1200	36.0	800.0	114.0	1600 - 2432
13	11.869557388155382	Santhal	50 - 200	9 - 50	18.0	3000 - 5000	28.0	1450.0	158.0	3450.0
14	10.0	West Casa Blanca	150.0	10 - 15	20.0	600.0	34.0	30.0	100.0	1030.0
15	10.0	North Tisdale	175.0	50.0	21.0	1034.0	24.0	290.0	73.0	776 - 1090
16	10.0	Gloriana	174.0	4.0	20.0	1000.0	35.0	300.0	112.0	1600.0
17	10.0	Esperson Dome	90.0	21 - 45	21.0	300 - 1000	31.0	1190.0	125.0	2700.0
18	10.0	Balaria	120.0	9 - 49	19.0	506.0	30.0		113 - 118	2625.0
19	6.002530336286737	Vidale	30 - 120	9 - 114	16 - 21	600 - 6000	30.0		120 - 133	2132 - 2789
20	4.695744311273232	Mordovo		99 - 145			16 - 34			1181.0
21	3.9645522388059704	Brea Olinda	20.0	100 - 150	14 - 36	300.0	29.0	50 - 250	135.0	1400 - 3700
22	2.7623762376237626	Balol	100 - 150		15.0	8000 - 15000	28.0		158.0	3440.0
23	1.8936877076411962	wabasca	1500 - 10000	18 - 21	12 - 17	153 - 1513	15 - 28		72.0	1190.0
24	1.818888103342054	Miga	280 - 430	15 - 25	13 - 14	1000 - 10000	22.0		146.0	4000 - 4350
25	0.004574670051922505	Suplacu de Barcau	2000.0	20 - 89	16.0	1700 - 2000	31.0	80.0	65.0	115 - 719
26	0.0	West Newport (Arena B)_ Inyeccion de aire en cr	750.0		13.0	500 - 1000	37.0	86.0		1600.0
27	0.0	west heidelberg	6.0	62.0	15 - 27	85.0	14.0	1500.0	221.0	11400.0
28	0.0	Trix-Liz	26.0	9.0	24.0	500.0	28.0	200.0	138.0	3650.0
29	0.0	South Hospah	55.0	28.0	25.0	1100.0	27.0		80.0	1625.0

Figura 43. Resultado de analogías con 25% en espesor y 15% en permeabilidad

D. De acuerdo con las siete analogías realizadas anteriormente, se escogieron seis de los campos más análogos para cada resultado y se procedió a calcular un promedio de los puntajes obtenidos de cada uno de ellos, con el objetivo de determinar un ranking con base en dichos puntajes y mostrar así los diez campos más análogos para el campo bajo estudio. Estos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 73.

*Ranking de los campos más análogos*

CAMPO	SCORE	RANKING
Pauls Valley	25,074	1
Kyrock	24,047	2
Midway Sunset	20,714	3
Forest Hill	17,143	4
Glen Hummel	11,081	5
Esperson Dome	6,428	6
West Newport	3,571	7
West Casa Blanca	3,571	8
Tia Juana	3,571	9
North Tisdale	3,571	10

E. Se procede a realizar el análisis de los problemas encontrados en la etapa de ignición de los campos más análogos.

De los diez campos análogos, cinco de ellos presentan problemas, los cuales son listados en la siguiente figura.

CAMPO	Aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo	Mala distribución y eficiencia de barrido del frente de combustión	Aumento en la producción de arena	Fallas en el revestimiento y tuberías	Aumento en la presión de inyección	Falta de combustión del oxígeno	Pérdidas de aire a alta presión	Daño total del pozo	Baja inyectividad
Kyrook		x		x	x	x			
Midway Sunset	x			x			x	x	
North Tisdale		x							
Pauls Valley			x						x
Tía Juana								x	

Figura 44. Problemas presentados en los campos análogos

De la anterior tabla se puede deducir que los problemas que se repiten con mayor frecuencia son: Mala distribución y eficiencia de barrido del frente de combustión, Fallas en el revestimiento y tuberías, y Daño total del pozo.

En la figura 45 se observa el rango en el que se encuentran los parámetros analógicos para todos los yacimientos estudiados que presentaron dicho problema, donde el color rojo indica bajo qué parámetros puede influenciar la aparición de los problemas generados en los campos más análogos sobre el campo bajo estudio.

	Profundidad, [ft]	Espesor neto [ft]	Permeabilidad, [mD]	Porosidad, [%]	Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	Temperatura del yacimiento, [F]	Gravedad del aceite, [API]	Viscosidad del aceite [cP]
Campo bajo estudio	7500-8500	100-300	2000-4000	18-20	800-1200	180-200	8-10	120-200
Aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo	400-4350	10-129	650-10000	22-33	40-1450	61-158	12-19	280-200000
Mala distribución y eficiencia del frente de combustión	10-1625	3-89	1034-7680	21-33	20-391	56-95	10-25	21-200000
Fallas en el revestimiento y tuberías	100-2700	19-129	1500-5000	22-36	950-1360	56-125	9-14	110-150000
Aumento de la presión de inyección	100-4350	6-132	300-10000	22-30	56-131	100-110	10-19	30-150000
Aumento en la producción de arenas	1030-4500	19-100	600-5000	34-39	30-1400	100-110	9-20	150-8000
Baja inyectividad	2132-4300	6-100	300-2505	30-39	1400	110-131	10-19	30-8000
Daño total del pozo	1540-2700	128-129	1500-5000	36-39	950	104-125	12-14	110-6000
Pérdidas de aire a alta presión	2100-2700	129	1500	36	950	125	14	110
Falta de combustión del oxígeno	100	20	2000	22		56	10	150000

Figura 45. Variación de los parámetros del campo bajo estudio según los problemas presentados en los campos análogos

De acuerdo a la anterior figura, los problemas analizados se ven influenciados a bajos rangos de profundidad, altas porosidades y a temperaturas del yacimiento que no sobrepasan los 158°F; a pesar de que estos factores no se encuentran entre los rangos del campo bajo estudio, parámetros como permeabilidades, espesores netos y presiones del yacimiento altas, bajas gravedades API y por ende altas viscosidades del crudo, indican la influencia de aparición de dichos problemas sobre el campo a evaluar.

De forma similar a la anterior figura, en la siguiente se observa la comparación de los parámetros cuyos campos análogos presentaron problemas en la etapa de ignición, donde el color rojo indica si el valor del campo estudio se aproxima al rango analizado para cada campo análogo.

	Propiedades campo estudio	Propiedades Pauls Valley	Propiedades Kyrock	Propiedades Midway Sunset	Propiedades Tia Juana	Propiedades North Tisdale
Profundidad, [ft]	7500 - 8500	4300	100	2100-2700	1540-1600	776-1090
Espesor neto [ft]	100 - 300	100	20	129	128	50
Permeabilidad, [mD]	2000 - 4000	878-2505	2000	1500	5000	1034
Porosidad, [%]	18 - 20	39	22	36	39	24
Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	800 - 1200	1400		950		290
Temperatura del yacimiento, [F]	180 - 200	110	56	125	104	73
Gravedad del aceite, [API]	8 - 10	10	10	14	12-13	21
Viscosidad del aceite [cP]	120-200	7000-8000	150000	110	6000	175

Figura 46. Comparación de los parámetros cuyos campos análogos presentaron problemas en la etapa de ignición

De acuerdo con los resultados de las anteriores figuras, el campo Pauls Valley presentó aumento en la producción de arena durante la ignición y baja inyectividad de aire debida al mismo arenamiento. La comparación muestra que propiedades como el espesor, la permeabilidad y la

gravedad API, coinciden con los del campo estudio; sin embargo, factores como la profundidad y la temperatura son más altas en el caso estudio, mientras que la viscosidad, presión del yacimiento y porosidad son más bajas que las de Pauls Valley. De lo anterior se puede concluir que la probabilidad de que ocurra aumento en la producción de arena en el campo de estudio es menor, dado que este problema es típico de formaciones poco profundas y no consolidadas con crudos de alta viscosidad y bajas temperaturas, mientras que el campo de estudio presenta alta consolidación. Sin embargo, al aumentar la temperatura del yacimiento con la CIS, se reducirá en algún nivel la resistencia de la matriz, lo cual podría promover la migración de finos.

En el campo Kyrock se presentó mala distribución y eficiencia del frente de combustión, fallas en el revestimiento y tuberías, aumento en la presión de inyección y falta de combustión del oxígeno. Según la figura 46, casi todas las propiedades no coinciden excepto la permeabilidad y la gravedad API; en el campo de estudio, la profundidad, el espesor y la temperatura son mucho más altas que las del campo Kyrock, lo cual permite concluir que la probabilidad de que ocurra falta de combustión del oxígeno y mala distribución y eficiencia del frente de combustión es menor. Esto dado que a mayor temperatura del yacimiento, habrá un consumo más rápido del oxígeno, el cual no avanzará significativamente más allá de un frente principal; por otro lado, la alta movilidad del crudo presente en el campo de estudio (en comparación de más de 100.000 cP en Kyrock) reduce la probabilidad de que ocurra un aumento en la presión de inyección.

Durante el desarrollo de la ignición, el campo Midway Sunset presentó aumento excesivo de la temperatura en el fondo del pozo, fallas en el revestimiento y tuberías, pérdidas de aire a alta presión y daño total de pozos. Mediante la comparación de la gráfica anterior, el espesor y la presión del yacimiento son las variables que más coinciden; por otro lado, la profundidad, permeabilidad y temperatura del campo estudio son más altas que las de Midway Sunset. Al ser

similares en términos de movilidad relativa del crudo, el tipo de problemas presentados en Midway Sunset tienen alta probabilidad de reproducirse en el campo de estudio. En consecuencia, debe asegurarse que durante la operación de ignición se limpie de petróleo la cercanía del pozo inyector, para así alejar las altas temperaturas del revestimiento y del pozo y evitar daños significativos. También deben tomarse las medidas para evitar el *backflow* de petróleo considerando el alto espesor de la formación objetivo.

En el campo Tia Juana se presentaron daños en los pozos causando la pérdida total de estos. La principal causa del problema fue la ubicación del frente de combustión cerca de los pozos inyectores o productores, lo que generó variaciones de presión y temperatura que resultaron en deformaciones de las tuberías, acompañadas de erosión, corrosión y derretimiento en algunos casos. Para el campo de estudio, dada su mayor reactividad a temperatura de yacimiento, se espera una progresión más uniforme del frente de combustión. Sin embargo, es importante contar con buenas herramientas de monitoreo para detectar tempranamente la cercanía de las zonas de alta temperatura.

El campo North Tisdale presentó mala distribución y eficiencia del frente de combustión. Según la comparación y como se evidencia en el campo Kyrock, casi todas las propiedades no coinciden excepto la viscosidad del crudo de poco más de 100 cP en el campo de estudio, la profundidad, el espesor, la permeabilidad y la temperatura son mucho más altas que a las del campo North Tisdale. La probabilidad de ocurrencia del problema presentado será menor en el campo de estudio, dado que a mayor temperatura del yacimiento habrá un consumo más rápido del oxígeno y una propagación más uniforme del frente de combustión.

En la figura 47 se observa el rango en el que se encuentran los parámetros analógicos para todos los yacimientos estudiados, donde el color rojo indica si el valor del campo estudio se aproxima al rango analizado para cada tipo de ignición.

	Profundidad, [ft]	Espesor neto [ft]	Permeabilidad, [mD]	Porosidad, [%]	Presión del yacimiento al inicio del proyecto [psi]	Temperatura del yacimiento, [F]	Gravedad del aceite, [API]	Viscosidad del aceite [cP]
Campo bajo estudio	7500-8500	100-300	2000-4000	18-20	800-1200	180-200	8-10	120-200
Ignición espontánea	860-11400	15-150	1000-15000	22-39	20-1500	74-221	9-27	20-2770
Ignición asistida	10-4350	3-145	153-15000	21-39	40-1450	56-158	15-25	21-150000
Calentadores eléctricos	10-2625	3-89	506-2377	21-39	30-290	65-118	16-25	21-2000
Quemadores de gas	100-4300	8-145	153-15000	15-39	40-1450	56-158	10-21	50-150000
Inyección química	2132-2789	9-14	600-6000	30		120-133	16-21	30-120
Calentadores catalíticos	1600-3650	4-9	500-1000	28-35	200-300	112-138	20-24	26-174

*Figura 47.* Variación de los parámetros del campo bajo estudio según el tipo de ignición desarrollado en los campos análogos

En la figura anterior se observa que los parámetros del campo bajo estudio se encuentran dentro de los rangos en los que se desarrolla la ignición espontánea; se evidencia que el único parámetro que no se ajusta a los rangos propuestos para ese tipo de ignición es la porosidad, que se desvía por un bajo porcentaje. La ignición asistida, por su parte, no pareciera ser apropiada para el caso de estudio, teniendo en cuenta que hay dos propiedades relevantes (profundidad y temperatura) por fuera de los rangos de observación estadística.

En la figura 48 se puede visualizar la tendencia con la que ocurren los problemas presentes en los campos análogos, según el tipo de ignición desarrollada.

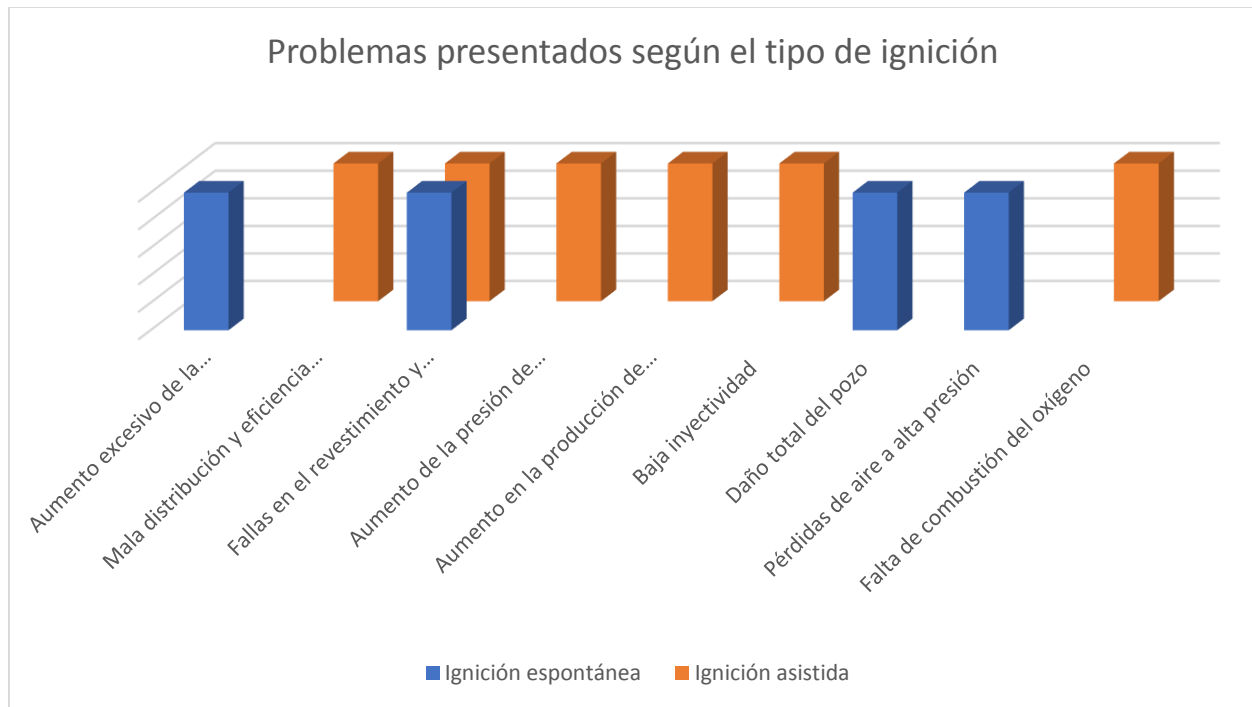


Figura 48. Problemas presentados según el tipo de ignición desarrollado

Con los resultados de la figura anterior, se determina el tipo y número de problemas presentados en los campos en donde se desarrolló ignición espontánea, la cual es menor en comparación con los de ignición asistida.

A continuación, se establecen algunas recomendaciones para evitar y mitigar el riesgo a sufrir dichos problemas bajo el desarrollo de este método de recobro durante la etapa de ignición en el campo de estudio:

- Es importante completar los pozos de inyección con revestimientos cementados y tubería adecuada que resista temperaturas y presiones altas para reducir el daño causado por las mismas.
- Si se presenta baja inyectividad del aire y mala distribución y eficiencia del frente de combustión, es recomendable perforar las zonas donde la inyectividad del aire fue menor

que la deseada y que no alcanzaron las altas temperaturas durante la etapa de ignición, aumentando así la eficiencia del barrido vertical del frente de combustión.

- Adecuar el pozo inyector inspeccionando que no se encuentren arena, finos o crudo pesado que pueda obstruir la entrada del aire a la formación, lo que contribuye a mitigar problemas por baja inyectividad de aire a la formación y daños en los pozos.
- Para disminuir los daños en los pozos de producción causados por las altas temperaturas del frente de combustión, se recomienda monitorear continuamente la temperatura y la composición de los gases, para detectar tempranamente la cercanía de los frentes de alta temperatura.
- Se recomienda mantener una presión de inyección de aire adecuada para disminuir la presión de sobrecarga causada por un aumento en el volumen efectivo del gas.
- Debe asegurarse que durante la operación de ignición se limpie de petróleo la cercanía del pozo inyector, para así alejar las altas temperaturas del revestimiento y del pozo y evitar daños significativos. También deben tomarse las medidas para evitar el *backflow* de petróleo considerando el alto espesor de la formación objetivo.

## 5. Conclusiones

El software D.I.S. fue desarrollado con el objetivo de realizar analogías numéricas entre nuevos campos que ingrese el usuario y 32 casos históricos a nivel mundial contenidos en la base de datos, los cuales poseen información sobre la etapa de ignición presente en la CIS.

El estudio de los casos de campo reportados en la literatura permitió identificar que la ignición asistida (61% de los campos, 20 de 32), se ha aplicado con mayor frecuencia que la ignición espontánea (33% de ocurrencia); esto se explica porque las temperaturas de yacimiento no fueron lo suficientemente altas para asegurar una tasa vigorosa de reacción que desembocara en un frente de combustión estable.

Del análisis de los problemas encontrados en los campos estudiados, se puede concluir que el 60% de estos se dan a profundidades que no sobrepasan los 4350 ft, guardando relación con bajas temperaturas de yacimiento.

Las analogías realizadas mediante el Software D.I.S permiten determinar que en el campo de estudio se puede generar ignición espontánea favorecida por la alta profundidad, la buena permeabilidad y la alta temperatura, ya que estas condiciones permiten el aumento en la capacidad de inyección de aire, la generación de una mayor tasa de oxidación y, por ende, el aumento en la velocidad de reacción que resulta en ignición espontánea.

La relativa alta movilidad del crudo considerando la viscosidad del mismo y la permeabilidad del yacimiento, reduce la probabilidad de que ocurra un aumento riesgoso en la presión de inyección, como ha sido el caso en campos análogos que sin embargo presentan menor movilidad.

Teniendo en cuenta las propiedades de los campos análogos al campo de estudio que presentaron problemas en la ignición, se puede concluir que las altas profundidades y temperaturas del campo de estudio disminuyen la probabilidad de que ocurra baja combustión de oxígeno y mala distribución y eficiencia del frente de combustión dado que, a mayor temperatura de yacimiento, habrá mayor eficiencia en el consumo del oxígeno, evitando así el avance más allá de un frente principal.

## 6- Recomendaciones

Se sugiere que se incluyan la mayoría de los parámetros analógicos de los campos a los cuales se realizará la analogía, para evitar que el método de realización de analogías descarte campos que puedan ser los más análogos al prospecto, garantizando mayor confiabilidad en los resultados.

Introducir al Software D.I.S. información de nuevas pruebas de campo aprovechando la flexibilidad que brinda de ingresar nueva información o de actualizar la ya existente. De esta forma se incrementa la calidad y cantidad de la información, brindando la posibilidad de mejorar la búsqueda de campos análogos.

Para darle un mayor valor a la información presentada en este proyecto sería factible contar con información sobre la caracterización del crudo, ya que con esta información se podría hacer un mejor análisis en los problemas presentados durante la etapa.

**Referencias bibliográficas**

- Alvarado, D. A. (2002). Recuperación Térmica De Petróleo, 345.
- Arias, A. M., & Rodriguez, C. L. (2013). Alternativas para los problemas operacionales críticos durante la implementación de un proceso de combustión in situ en un campo de crudo pesado en Colombia.
- Awoleke, O. (2007). An experimental investigation of in-situ combustion in heterogeneous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, (zone 3), 1–15.
- Belgrave, J. D. M., & Chhina, H. s. (2006). Air Injection : Timely and Widely Applicable ! *DisClosure*.
- Berzaba, A., Collado, A., & Alberto, C. (2012). Análisis Adimensional De Un Proceso Capri Para Recuperación Mejorada De Hidrocarburos. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1794/Tesis.pdf?sequence=1>
- Blanca, J., Cañizares, J., Montero Pau, J., Ziarsolo, P., & García Carpintero, V. (2010). *Bioinformatics at COMAV*. Obtenido de Bioinformatics at COMAV: [https://bioinf.comav.upv.es/courses/linux/presentacion\\_del\\_curso.html](https://bioinf.comav.upv.es/courses/linux/presentacion_del_curso.html)
- Borrego del Pino, S. (2008). Estadística Descriptiva E Inferencial I. *Revista Digital Universitaria*, N°13, 1–12. Retrieved from [http://www.csif.es/andalucia/modules/mod\\_ense/revista/pdf/Numero\\_13/SILVIA\\_BORREGO\\_2.pdf](http://www.csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_13/SILVIA_BORREGO_2.pdf)
- Burger, J. G. (1976). Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 16(2), 1–2. <https://doi.org/10.2118/5455-PA>

- Camps Paré, R., Casillas Santillán, A., Costal Costa, D., Gibert Ginestá, M., Martín Escofet, C., & Pérez Mora, O. (2005). Bases de datos. *FUOC*.
- Carcoana, A. (1990). Results and Difficulties of the World's Largest In-Situ Combustion Process: Suplacu de Barcau Field, Romania. *SPE/DOE 20248*.
- Carcoana, A. N. (1982). Enhanced Oil Recovery in Rumania. *SPE 10699*.
- Chattopadhyay, s., Binay Ram, Bhattacharya, R., & Das, T. (2004). Enhanced Oil Recovery by In-Situ Combustion Process in Santhal Field of Cambay Basin, Mehsana, Gujarat, India - A Case Study. *SPE 89451*.
- Chu, C. (1977). A Study of Fireflood Field Projects. *Journal of Petroleum Technology*.  
<https://doi.org/10.2118/5821-PA>
- Chu, C. (1982). State-of-the-Art Review of Fireflood Field Projects (includes associated papers 10901 and 10918 ).pdf. *SPE 9772-PA*.
- Counihan, T. M. (1977). A Successful In-Situ Combustion Pilot in the Midway-Sunset Field, California. *North*.
- Curtis, J. H. (1989). Performance Evaluation of the MOCO T In-Situ Combustion Project, Midway-Sunset Field.
- Depool, R., & Monasterio, D. (2013). Probabilidad y estadística. aplicaciones a la ingeniería.
- DePRIESTER, C., & PANTALEO , A. (1968). Well Stimulation by Downhole Gas-Air Burner. *SPE 732*.
- Dietz, D. (1970). Wet Underground Combustion, State of the Art. *SPE 2518*.
- Doraiah, A., Ray, S., & Gupta, P. (2007). In Situ Combustion Technique to Enhance Heavy-Oil Recovery at Mehsana, ONGC- A Success Story. *SPE 105248*.

- Li, J., Mehta, S. A., Moore, R. G., Ursenbach, M. G., Zalewski, E., & Van Fraassen, K. (2008). Chemically assisted ignition technologies for a light oil air injection process. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 47(7), 21–25. <https://doi.org/10.2118/08-07-25>
- Shallcross, D. C. (1989). *Devices and methods for in-situ combustion ignition*. Stanford University, California.
- Elkins, L. F., Skov, A. M., Martin, P. J., Luttan, R., Spe-aim, M., & Co, S. P. (1974). Experimental Fireflood - Carlyle Field, Kansas. *SPE*.
- Eskew, J. O. (1972). Performance Review - In Situ Combustion Project, West Casa Blanca Field, Duval County, Texas. *SPE 3776*.
- Fajardo, J. F. (2016). Determinación del mecanismo de ignición en procesos de combustión in situ mediante análisis de variables termodinámicas en sistemas roca-fluido.
- Farouq Ali, S. M. (1972). *A Current Appraisal of In-Situ Combustion Field Tests*.
- Field, M. S. (1987). Expansion of a Successful In-Situ Combustion Pilot in the Midway Sunset Field.
- Gadelle, C. P., Burger, J. G., Bardon, C. P., Machedon, V., Carcoana, A., & Petcovici, V. (1981). Heavy-Oil Recovery by In-Situ Combustion - Two Field Cases in Rumania.pdf. *SPE 8905-PA*.
- Galas, C., & Ejiogu, G. (1993). Enhancement of In-Situ Combustion by Steam Stimulation of Production Wells. *SPE 22646*.
- Gates, F., & Sklar, I. (1971). Combustion as a Primary Recovery Process—Midway Sunset Field. <https://doi.org/10.2118/3054-PA>
- Gimenez, M., & Casamayor, J. (2003). *Bases de datos relacionales* .

- González, D. (2005). Análisis e interpretación de yacimientos sometidos a inyección cíclica de vapor mediante analogías.
- Hernández, D. (2014). Definiciones y conceptos básicos. Retrieved from <http://www.antioquia.gov.co/images/pdf/anuario2014/esCO/capitulos/turismo/definiciones.html>
- Herrera Fernández, J. M., & Sánchez Brea, L. (2013). Computación científica con Python para módulos de evaluación continua en asignaturas de ciencias aplicadas.
- Joseph, C., & Pusch, W. (1980). A Field Comparison of Wet and Fry Combustion. *SPE 7992*.
- Korth, H. F., & Silberschatz, A. (1987). Fundamentos de bases de datos. *McGraw-Hill*.
- Kruskal, J. (1964). Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. .
- Lang, S.-z. (s.f.). In- Situ Combustion Test on Outcrops in Kramai Oil Field. *SPE 10571*.
- León Martínez, N. (2013). Documento con el desarrollo del algoritmo de la herramienta de procesos de recobro mejorado.
- Li, J., Mehta, S. A., Moore, R. G., Ursenbach, M. G., Zalewski, E., & Van Fraassen, K. (2008). Chemically assisted ignition technologies for a light oil air injection process. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 47(7), 21–25. <https://doi.org/10.2118/08-07-25>
- Long, R. E., & Nuar, M. F. (1982). A Study of Getty Oil Co.'s Successful In-Situ Combustion Project in the Bellevue F.pdf. *SPE 10708-MS*.
- Martin, W. L., Alexander, J. D., Dew, J. N., & Tynan, J. W. (1972). Thermal Recovery at North Tisdale Field, Wyoming. *Journal of Petroleum Technology*, 24(5), 606–616. <https://doi.org/10.2118/3595-PA>
- Martín, J. (s.f.). Análisis y Diseño Orientado a Objetos. *Prentice Hall Interamericana*.

- Mehra, R. (1991). Performance Analysis of In-Situ Combustion Pilot Project. *SPE 21537*.
- Melrose, J., Perroy, R., Careas, S., Popp, V. V., Dinulescu, V. D., Oil, V. C., ... Dinulescu, V. D. (1997). Dehydration and desalting of heavy and viscous crude oil produced by in-situ combustion. *SPE Production & Facilities*, 12(2), 95–99. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Moss, J., White, P., & McNeil, JR., J. (1959). In Situ Combustion Process - Results of a five - Well Field Experiment in Southern Oklahoma. *SPE 1102-G*.
- Murillo, A. (2010). Métodos alternos de recuperación mejorada -inyección de air.
- Omar, M., & Al, S. (2010). Top-Down In-Situ Combustion in Heavy Oil Reservoirs Having Strong Bottom Aquifer Support, (May).
- Panait-Patica, A., Serban, D., & Ilie, N. (2006). Suplacu de Barcau Field-- A Case History of a Successfull In- Situ Combustion Explotation. *SPE 100346*.
- Parra, E. (2012). La Estadística Y Sus Aplicaciones En La Ingeniería De Petroleos. *Facultad de Ingeniería, Ingeniero*, 323.
- Pauls, S. E., Elkins, L. F., Morton, D., Co, S. P., & Blackwell, W. A. (1968). SPE Experimental Fireflood Oil-Unconsolidated in a Very Viscous Sand Reservoir , Oklahoma.
- Petit, H.-M., Le Thiez, P., & Lemonnier, P. (1990). History Matching of a Heavy-Oil Combustion Pilot in Romania. *SPE/DOE 20249*.
- Pool, C., & Field, I. (1966). Simultaneous Underground Combustion and Water Injection.
- Pusch, W. H., & Garvey, J. M. (1981). Economics of In Situ Combustion - The Bellevue Field.pdf. *SPE DOE 10052*.
- Pusch, W. H., & Joseph, C. (1980). A Field Comparison of Wet and Dry Combustion.pdf. *SPE 7992*.

- Quijada, J. (2015). Estudio comparativo de métodos de ignición para el proceso de recuperación mejorada térmica de combustión en sitio.
- Ralph, E., Long, F., Mark, F., & Nuar, G. O. C. (1982). MS A Study of Getty Oil Co.'s Successful In-Situ Combustion Project in the Bellevue F.pdf. SPE 10708.
- Rao, N. S., Roychaudhury, S., Sur, S., Sapkal, A. V, Gupta, K. K., & Sinha, S. K. (1997). Results of spontaneous ignition test in Balol heavy oil field. *Proceedings of the 1997 Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0030709892&partnerID=40&md5=24612665858614205314c5091cf1272f>
- Rossum, G. (2009). El tutorial de Python.
- Roychaudhury, S., Rao, N. S., Sinha, S. K., Sur, S., Gupta, K. K., Sapkal, A. V., ... Saluja, J. S. (1997). Extension of In-Situ Combustion Process from Pilot to Semi-Commercial Stage in Heavy Oil Field of Balol.pdf. SPE 37547-MS.
- Shun-zong, L. (n.d.). In-Situ Combustion Test on Outcrops in Kramai Oil Field.pdf. SPE 10571-MS.
- Smith, M. W. (1965). Simultaneous Underground Combustion and Wster Injection In the Carlyle Pool, Iola Field Kansas. *SPE 01170*.
- Struna, S., & Poettmann, F. (1988). In-Situ Combustion in the Lower Hospah Formation, McKinley County, New Mexico. *SPE 14917*.
- Suyan, K., Dasgupta, D., & Jain, V. (2006). Novel Cement Composition for Completion of Thermal Recovery (ISC) Wellbores. *SPE/IADC Indian Drilling Technology Conference and Exhibition*.
- Tavera, C. P., Muñoz, S. F., & Jimenez, R. (2010). MODELO ESTADÍSTICO PARA LA REALIZACIÓN DE ANALOGÍAS ORIENTADAS A PROCESOS DE RECOBRO MEJORADO. *Revista Fuentes*.

Terwilliger, P. L. (1975). Fireflooding Shal low Tar Sands - A Case History.

Terwilliger, P. L., & Co, D. (1964). Fireflood of the P2-3 Sand Reservoir in The Miga Field of Estern Venezuela.

Turta, A. T., & Pantazi, I. G. (1986). Development of the In-Situ COmbustion Process on an Industrial Scale at Videle Field, Rumania. *10709*.

Unibertsitatea, N. (2000). Apenda Visual Basic 6.0. *Control*.

Vera, J. A. (2011). Factibilidad de la aplicación de procesos térmicos en el yacimiento Lagsup campo, 43.





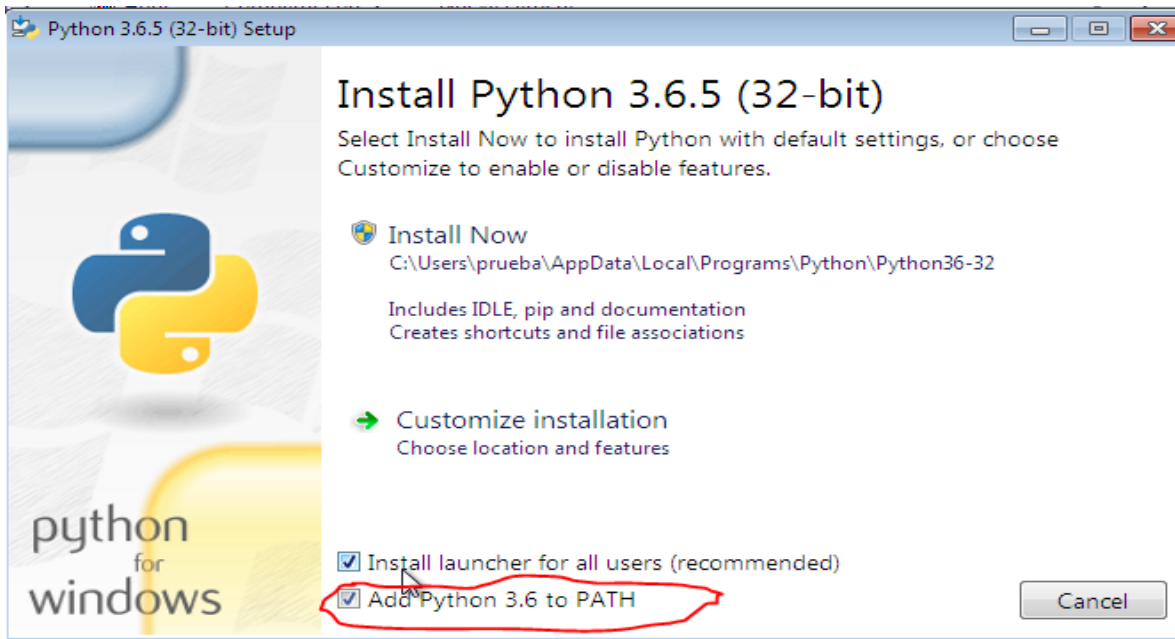
**Apéndice B: Manual de usuario del software D.I.S****➤ REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA LA INSTALACIÓN DEL SOFTWARE D.I.S.**

- Unidad de CD-ROOM
- Tener Python instalado

**➤ MODO DE INSTALACIÓN DE PYTHON Y DEL SOFTWARE D.I.S.**

1. Insertar el CD de instalación.
2. Copiar la carpeta Oil-Wells-Analogies y pegar en Sistema (C:)
3. Realizar la instalación de Python en el computador
4. Se descarga Python 3 o superior
5. Se ejecuta el instalador de Python

Al instalar Python, asegurarse de seleccionar la opción de:



6. Después de haber terminado el proceso de instalación, abrimos el cmd en la máquina.
7. En la consola ejecutamos el siguiente comando (Sin comillas) “pip3 uninstall openpyxl”

```
C:\Users\Janeth>pip3 uninstall openpyxl
```

 dar enter y si aparece un diálogo solicitando digitar (y/n) para proceder, entonces digitar (sin comillas) “y”

```
Proceed (y/n)? y
```

, dar enter y digitar el siguiente comando (sin comillas) “pip3 install -U xlsxwriter”  

```
pip3 install -U xlsxwriter
```

 dar enter y digitar el siguiente comando

(sin comillas) “pip3 install -U pandas numpy pandastable xlsxwriter”

```
C:\Users\jefel>pip3 install -U pandas numpy pandastable openpyxl
```

8. Dar enter y luego esperar a que se instalen los módulos para usar el programa, en caso de que alguno requiera permiso para ser instalado inicie el cmd como administrador.

#### ➤ EJECUCIÓN DEL SOFTWARE D.I.S.

1. Ir a la carpeta donde está el programa (Oils-Wells-Analogies), dentro de esta carpeta se encuentra el ícono main.py, con el cual se ejecuta el programa y además se encontrará el manual de usuario.
2. Dar clic e iniciar el programa main.py con Python.

➤ **FUNCIONES DE LA BASE DE DATOS**

- Consultar datos de un campo en particular que se encuentra en la base de datos.
- Insertar información de un campo nuevo.
- Actualizar los datos existentes de cualquier campo.
- Realizar analogías.

➤ **ENTORNO DE LA APLICACIÓN**

El software está estructurado de la siguiente manera:

- Pantalla principal.
- Pantalla de visualización de la información.
- Pantalla de inserción de información.
- Pantalla de realización de analogías.
- Pantalla de resultados de las analogías.

A continuación, se explica el manejo y funcionalidad de cada una de las pantallas anteriores.

1. Pantalla principal

- Esta es la ventana de inicio del programa, la cual contiene los logos de las entidades interesadas en el proyecto, así como las secciones principales del programa (información y analogía). En la parte inferior se encuentran los tres botones de las

principales funciones del software, *consultar campo*, *agregar campo* y *realizar analogías*.



Figura 2A. Pantalla principal

## 2. Pantalla de visualización de la información

- En esta pantalla se muestra toda la información de cada uno de los campos almacenados en la base de datos. Para operar esta pantalla, se selecciona un campo de la lista desplegable y clic en consultar.

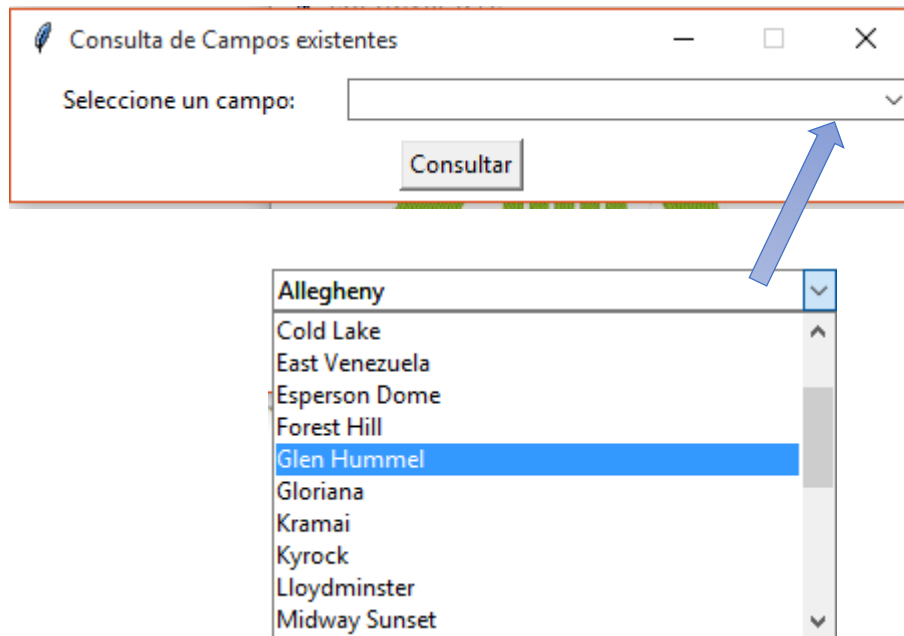


Figura 3A. Pantalla de consulta de campos

- Una vez dada la opción de consultar el campo aparece la información detallada de acuerdo al campo escogido, esta información se clasifica en varias categorías: características de fluidos in-situ, características de producción y recobro, características de la roca, características generales del yacimiento, características geológicas, información general del campo, información general del proyecto de recuperación, parámetros del proceso de inyección de aire, ignición, problemas operacionales y referencias bibliográficas.

Resultado de la consulta del campo: Baloi

	CATEGORIA	PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	FECHA DE PUBLICACION
114	informacion general del campo	Antico?			
115	informacion general del proyecto de recuperacion	Alcance del proyecto	Piloto (probable expansion) - Escala semicomercia		1997
116	informacion general del proyecto de recuperacion	Corte de agua al inicio del proyecto	95	%	1997
117	informacion general del proyecto de recuperacion	Evaluacion del proyecto	Exitoso		1997
118	informacion general del proyecto de recuperacion	Fecha de inicio del proyecto de recuperacion	1990/03/.. - 1992/10		1997
119	informacion general del proyecto de recuperacion	GIP			
120	informacion general del proyecto de recuperacion	Madurez del proyecto	Completado en el piloto y cercano a ser completad		1997
121	informacion general del proyecto de recuperacion	Metodo de produccion anterior	Primaria		1997
122	informacion general del proyecto de recuperacion	Nombre del proyecto			
123	informacion general del proyecto de recuperacion	OIP			
124	informacion general del proyecto de recuperacion	Rentabilidad	Si		1997
125	informacion general del proyecto de recuperacion	Tipo de proyecto	Combustion In Situ		1997
126	informacion general del proyecto de recuperacion	Area del proyecto	6 en el piloto y 3450 en la escala semicomercial	Acres	1997
127	parametros del proceso de inyeccion de aire	Aire Inyectado durante el proceso			
128	parametros del proceso de inyeccion de aire	Completamiento pozos Inyectores			
129	parametros del proceso de inyeccion de aire	Completamiento pozos Productores			
130	parametros del proceso de inyeccion de aire	Eficiencia de la inyeccion de Oxygeno	90	%	

Exportar a Excel Actualizar Datos

Exportar a Excel Actualizar Datos

Figura 4A. Pantalla de visualización de información

- El usuario tiene la posibilidad de agregar información a la base de datos existente; si este posee información verídica que complemente la base de datos, puede modificarla dando doble clic en la celda a agregar información y finalizar con enter. La información agregada debe ser respaldada con la referencia bibliográfica correspondiente, la fecha de publicación y las unidades de medida correspondientes. Al terminar de agregar toda la información pertinente, se selecciona el botón *actualizar datos*.

- Si el usuario requiere exportar toda la información del campo de consulta, se selecciona el botón *Exportar a Excel* y clic en guardar.

### 3. Pantalla de inserción de la información

- En esta ventana se le permite al usuario almacenar información en la base de datos de nuevos campos que implementaron la CIS.

Agregacion de nuevo campo

Nombre del nuevo campo:

	PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR	FECHA DE
1	Aceite movil			
2	Compresibilidad del Aceite (Co), *10-6 psi-1	SCF/BBL		
3	Densidad del aceite			
4	Factor volumetrico de formacion del gas, Bg			
5	Factor volumetrico de formacion inicial del petroleo	RB/STB		
6	Gas Disuelto en Aceite, Rs	SCF/BBL		
7	Gravedad API del crudo	°API		
8	Promedio total de solidos disueltos	ppm		
9	Razon de movilidad agua aceite			
10	Relacion de viscosidades			
11	Salinidad del agua de formacion			
12	Saturacion actual de agua			
13	Saturacion de aceite al final del proyecto	%		
14	Saturacion de aceite al inicio del proyecto	%		
15	Saturacion de agua al final del proyecto			
16	Saturacion de agua al inicio del proyecto	%		
17	Saturacion de agua connata			
18	Saturacion de agua irreducible			
19	Saturacion de gas al final del proyecto	%		
20	Saturacion de gas al inicio del proyecto	%		

Agregar nuevo campo

Figura 5A. Pantalla de inserción de la información de un nuevo campo

- En la pantalla se digita el nombre del campo y los valores de las propiedades pertenecientes al campo con las unidades respectivas establecidas en la base de datos, así como las referencias bibliográficas correspondientes y la fecha de publicación del artículo de referencia; los valores agregados a la base de datos pueden ser valores únicos, rangos o texto; cada vez que se agregue un valor se debe dar enter para que quede almacenado en la base de datos. Al finalizar de digitar toda la información, se debe hacer clic en agregar nuevo campo. Cuando se realice la consulta en la pantalla de visualización de la información, el nuevo campo agregado se encontrará en la lista desplegable.

#### 4. Pantalla de realización de analogías

- En esta ventana se introducen los datos que se tengan del campo a comparar y se compone de las siguientes secciones:
  - ✓ Nombre del campo: aquí se digita el nombre del campo prospecto que se desea comparar con los que se encuentran almacenados en la base de datos; si no se digita el nombre del campo, este generará error y no permitirá ejecutar la analogía.
  - ✓ Parámetros de la analogía: muestra la lista de los parámetros de analogía con sus unidades.
  - ✓ Valores de los parámetros: aquí se digitan los valores para cada parámetro analógico del campo nuevo, estos pueden ser valores con dato único o con rango.
  - ✓ Ponderación: a cada valor agregado se le debe asignar un peso para la realización de las analogías; la suma de estas ponderaciones debe dar el 100%, de lo contrario generará error. Este porcentaje se puede agregar arbitrariamente, dependiendo del requisito del usuario para comparar los parámetros o ya sea por las ponderaciones establecidas en el sistema dando clic en el botón *Establecer Ponderaciones*.
  - ✓ Cálculo de índices: para la realización de las analogías se procede a seleccionar el método de cálculo de los índices. Las opciones son el método del valor promedio y el método de Jaccard modificado.

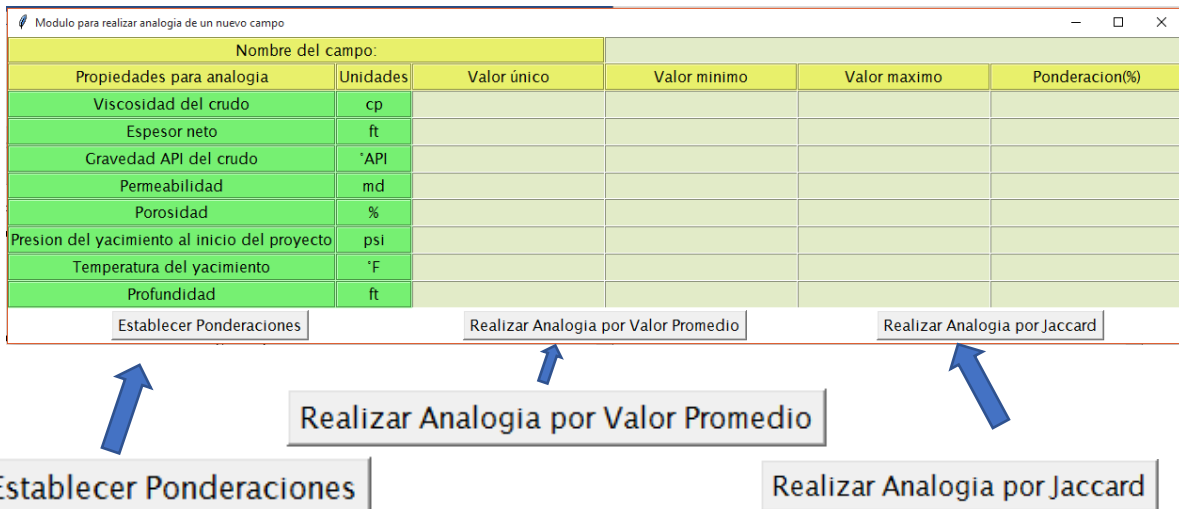


Figura 6A. Pantalla de realización de analogías

## 5. Pantalla de resultados de las analogías

- En esta ventana se permite analizar e interpretar los resultados de la información de los campos más análogos.

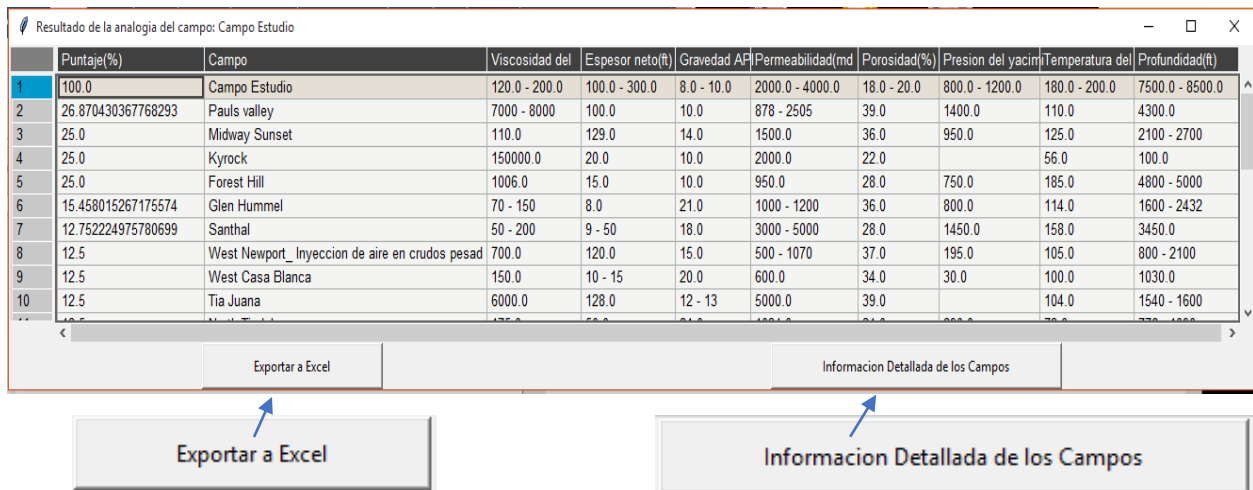


Figura 7A. Pantalla de resultados de las analogías

- Una vez ejecutada las analogías, el usuario tiene la posibilidad de exportar esos resultados a Excel para un mayor análisis, dando clic en el botón *Exportar a Excel*.

- Para visualizar la información de la etapa de ignición del o de los campos más análogos, se da clic en el botón *Información Detallada de los Campos*. Allí aparece una nueva ventana donde se puede observar las propiedades de la etapa de ignición, los problemas y las soluciones estándar pre **Seleccione un campo:** campo análogo, seleccionando el campo análogo y dando clic en el botón *Mostrar datos del campo*.

Mostrar datos del campo

Mostrar mas informacion

Consulta de información detallada de los Campos Existentes

Seleccione un campo: Midway Sunset

Mostrar datos del campo

Mostrar mas informacion

	Campo	Midway Sunset
1	Tipo de ignición	Ignición espontanea
2	Propiedades del tipo de ignición	
3	Tipo de combustión a analizar	Combustión seca
4	Velocidad del frente de combustión campo	0,083
5	Velocidad del frente de combustión laboratorio	
6	Tiempo de ignición laboratorio	
7	Tiempo de ignición campo	18
8	Distancia entre los pozos de observación e inyector	
9	Distancia entre los pozos de producción e inyector	
10	Contenido del fluido de combustible en el sistema	2
11	Consumo del combustible en laboratorio	
12	Consumo del combustible en campo	
13	Eficiencia de la utilización de oxígeno campo	100
14	Eficiencia de la utilización de oxígeno laboratorio	

Problemas Estandar	Soluciones Estandar
A. Perdida de aire a alta presión de yacimiento. B. Perdida de circulación y explosión del pozo. C. Dano del pozo de inyección por altas temperaturas.	A. Reducir la tasa de inyección y presión, convertir otro pozo en inyector de aire. B. Inyección de agua, perforación y cementación del pozo perdido. C. Completar los inyectores con revestimientos cementados y perforados.

Figura 8A. Información detallada de la etapa de ignición del campo

- Para obtener una información más detallada de los problemas y soluciones presentados, así como los métodos utilizados para detectar la etapa de ignición, se procede a dar clic en el botón *Mostrar más información*.

Mas informacion sobre el pozo Midway Sunset	
Problemas	Soluciones
<p>A. Migracion del aire hacia la zona este, donde los pozos producian de la zona Obispo-Pacific.</p> <p>B. Mientras se perforaba un pozo a 80 m del inyector de aire Moco 504, se generaron perdidas de circulacion y el pozo exploto. El pozo se perdio y el aire de la zona de Moco comenzo a filtrarse a la zona de Webster arriba, provocando la ignicion en esa zona y presentando aumentos de la tasa de petroleo en los pozos de la zona Webster cerca de la fuga.</p> <p>C. En el yacimiento de la zona Moco con una formacion gruesa y variable, es probable que el petroleo gravite en el pozo al calentarse y agregue combustible al fuego, por lo tanto se han producido altas temperaturas en los pozos de inyeccion semanas o incluso meses despues de la ignicion inicial debido a que la ignicion posterior tiene lugar en las arenas a diferentes profundidades y tiempos, causando fallas en el revestimiento.</p>	<p>A. Se redujo la tasa de inyeccion y presion en el pozo Moco 504, el pozo Moco 592 ubicado al oeste de 504 fue convertido a inyector de aire.</p> <p>B. Para combatir la fuga, se inyecta agua en Moco 504, se perforo en el agujero perdido con fugas y se cemento. La relacion entre el nitrogeno producido y el inyectado para la zona de Moco se ha mantenido dentro de los limites aceptables.</p> <p>C. Completar los inyectores con revestimientos cementados y perforados de tuberia API de grado J55 es una manera factible de reducir el daño del pozo por altas temperaturas, ya que proporciona aislamiento térmico y resistencia mecánica. Es deseable un forro interno ranurado sobre el intervalo perforado para evitar que la arena vuelva a fluir si falla el equipo o la tubería. Una sarta de tubería colgada en la parte superior del intervalo de producción facilitará la destrucción del pozo cuando surgen problemas tales como fugas en el casing a las zonas superiores.</p>
Metodos para detectar la etapa en laboratorio	Metodos para detectar la etapa en campo
	<p>Para determinar la zona quemada, se utilizaron registros electricos y de temperatura, datos de temperatura y presion de los pozos que produjeron fluidos calientes y se analizaron cambios en las caracteristicas de la produccion de los pozos antes del frente de combustion (incrementos en la temperatura, gravedad del aceite, corte de agua y disminucion en el pH del agua producida).</p>

Figura 9A. Información de los problemas, soluciones y métodos para detectar la Ignición