

**ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE APLICADO A UN MODELO DE  
SIMULACIÓN DE COMBUSTIÓN IN-SITU**

**SAMUEL SANTAFÉ PÁEZ**



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

**2013**

**ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE APLICADO A UN MODELO DE  
SIMULACIÓN DE COMBUSTIÓN IN-SITU**

**SAMUEL SANTAFÉ PÁEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

**ING. CÉSAR AUGUSTO PINEDA GÓMEZ**

**Director**

**M.Sc. ELKIN RODOLFO SANTAFÉ**

**Codirector**

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

**2013**

## DEDICATORIA

*A DIOS mi Padre, por extender su gracia y fidelidad todos los días, por permitir que entre su espléndida voluntad estuviere destinado ser el profesional que hoy soy, por guiarme cada instante de mi vida y entregarle un valor agregado de paz, tranquilidad, gozo y amor que impulsan hacer de mis sueños una realidad, por brindarme ese precioso regalo de salvación y cumplir su propósito en mí.*

*A mi mamá Teofilde Páez, por enseñarme su amor y dedicación que son la razón de cumplir mis sueños para tu honra, de no ser por tu apoyo y esfuerzo incondicional el logro que hoy se alcanza no se hubiese llevado a cabo. Porque la decencia y el respeto solo se pueden heredar de una verdadera dama.*

*A mi papá Manuel Santafé, por enseñarme su excelencia la cual he podido exportar a cada área que desempeño, por apoyar mis sueños y ver en mí aun lo que yo desconocía, por esas conversaciones en las que depositaba principios de sabiduría haciendo hoy que su voz viva mientras tu descansas en paz.*

*A mi hermana Sandra Páez que DIOS puso por confidente, amiga y guía por brindarme su amor y enseñarme lo que es una sincera, verdadera y hermosa unidad en hermandad, porque con su constante exigencia me enseño a desempeñarme de una forma íntegra en la vida, gracias niña.*

*A mi preciosa Juliana por ser ese detonante de felicidad en mi vida, por ayudar en cada respirar a conocer más de mí mismo, por tu compañía y fidelidad, por tus consejos, por esas palabras sabias en momentos críticos y sobre todo por hacer de mi vida un circo de ilusiones.*

*A Laurita, Yeny, Marce, Tatiana, Carlos Andrés, Fredy, Nelson, Oscar Mario por brindarme su sincera amistad, por compartir tantos momentos y risas, por ser esos acompañantes en esta etapa de la vida, que privilegio haber compartido con ustedes.*

*A Elkin, más que un primo halle un amigo, un guía, un hermano, gracias por su constante apoyo, su compañía ha estado en los momentos más críticos y fue la persona que DIOS destinó para dar fortaleza y dirección a mi vida.*

*A Henricillo por brindarme su amistad, por estar tan pendiente de mi proceso, por su tiempo, apoyo, por enseñarme su hermosa profesión y como buscar soluciones en tiempo real.*

*A mis pastores, Rafael y Carolina Iriarte, Luis y Glenis Morales, por ser el instrumento que DIOS usa para ser mejor cada día, acercando el Reino a nuestros corazones, gracias a ustedes estoy inscrito en la mejor Universidad de la vida.*

*Samuel Santafé Páez*

## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS por permitirme culminar con éxito y excelencia una etapa más en mi vida y cumplir una meta más de acuerdo a su propósito.

A ELKIN SANTAFÉ por su confianza, tiempo, sugerencias, amabilidad, consejos, antes y durante el desarrollo del proyecto.

A NELSON QUINTERO por su confianza, por tantas conversaciones, carcajadas, por su apoyo y compañía.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER específicamente a la ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS por las enseñanzas recibidas durante esta etapa de preparación profesional.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1. FUNDAMENTOS DE LA CIS .....	18
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	18
1.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	20
1.2.1 Combustión frontal .....	20
1.2.1.1 Combustión frontal seca .....	21
1.2.1.2 Combustión frontal humedad .....	25
1.2.2 Combustión en reversa .....	30
1.3 REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADAS A LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	32
1.3.1 Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) o de adición.....	33
1.3.2 Reacciones de oxidación a temperatura intermedia (ITO) o de pirólisis.....	37
1.3.3 Reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO) o de rompimiento.....	40
1.3.4 Comparación de las reacciones químicas de los procesos de combustión in situ.....	42
1.4 CINÉTICA DE LA REACCIÓN .....	43
1.4.1 Factores de los que depende la velocidad de reacción .....	46
1.4.2 Frecuencia de colisión .....	47
1.4.3 Energía de activación .....	48
1.4.4 Factores que afectan las reacciones de oxidación .....	49
1.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU (SCREENING) .....	51
1.6 LIMITACIONES DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	55
2. FLUJO DE TRABAJO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL CASO BASE .....	58
2.1 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL A ESCALA DE CAMPO 1D.....	58
2.1.1 Construcción del grid .....	59
2.1.2 Propiedades petrofísicas.....	60
2.1.3 Modelo de fluidos .....	61

2.1.4	Modelo de reacciones.....	63
2.1.5	Parámetros cinéticos .....	66
2.1.6	Eventos de producción .....	67
2.2	VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BASE .....	67
2.2.1	Picos de temperatura.....	68
2.2.2	Tasas de reacción.....	69
2.2.3	Composición de gases de producción .....	71
2.2.4	Factor de recobro .....	72
2.2.5	Saturación de aceite .....	73
2.2.6	Viscosidad del aceite .....	75
3.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL A ESCALA DE CAMPO 2D .....	78
3.1	VARIABLES DE SALIDA .....	80
3.2	VARIACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL AJUSTE.....	82
3.2.1	Análisis de sensibilidad a la tasa de inyección .....	83
3.2.2	Análisis de sensibilidad a parámetros cinéticos .....	85
3.3	VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO 2D AJUSTADO .....	88
4.	ESTUDIO DE SENSIBILIDAD A PARÁMETROS QUE AFECTAN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU .....	94
4.1	PARÁMETROS DE YACIMIENTO .....	94
4.1.1	Efecto de la porosidad.....	95
4.1.2	Efecto del buzamiento .....	97
4.2	PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS .....	101
4.2.1	Efecto de la permeabilidad absoluta .....	101
4.2.2	Efecto de la viscosidad del aceite.....	107
4.3	PARÁMETROS OPERACIONALES .....	113
4.3.1	Efecto de la tasa de inyección.....	113
4.3.2	Efecto de la temperatura del fluido de inyección.....	117
4.3.3	Efecto de la concentración de oxígeno .....	120
4.3.4	Efecto de la presión de fondo fluyente.....	126
4.4	PARÁMETROS TÉRMICOS .....	129
4.4.1	Efecto de la conductividad térmica de la formación.....	129

4.4.2	Efecto de las entalpías de la reacción .....	132
4.5	PARÁMETROS CINÉTICOS.....	141
4.5.1	Efecto del factor pre-exponencial .....	141
4.5.2	Efecto de las energías de activación .....	147
	RESUMEN CUALITATIVO .....	153
	CONCLUSIONES.....	155
	RECOMENDACIONES .....	159
	BIBLIOGRAFÍA.....	161

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de combustión in situ. ....	20
Figura 2. Proceso de combustión in situ en modo seco. ....	21
Figura 3. Proceso de combustión in situ en modo húmedo. ....	26
Figura 4. Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión húmeda incompleta. ....	27
Figura 5. Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión húmeda normal. ....	28
Figura 6. Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión súper húmedo. ....	28
Figura 7. Proceso de combustión en reversa. ....	30
Figura 8. Esquema del perfil de temperaturas de combustión modo seco, mostrando el efecto general de la temperatura sobre la tasa de consumo de oxígeno para crudos pesados. ....	35
Figura 9. Energía potencial vs tiempo transcurrido de reacción. ....	48
Figura 10. Modelo 1D a escala de campo. ....	59
Figura 11. Interacción roca-fluido del sistema agua-aceite y gas-aceite. ....	61
Figura 12. Perfiles de temperatura del modelo conceptual a escala de campo 1D. ....	68
Figura 13. Tasa de consumo de las reacciones modelo 1D. ....	70
Figura 14. Tasa de consumo de las reacciones del modelo 1D, sin tener en cuenta la reacción HTO. ....	70
Figura 15. Composición de los gases de producción del modelo 1D. ....	71
Figura 16. Eficiencia de recobro modelo 1D. ....	73
Figura 17. Vista areal y gráfica de la saturación de aceite registrada por bloque modelo 1D. ....	74
Figura 18. Saturación de aceite en el campo 1D. ....	75
Figura 19. Vista areal y gráfica de la viscosidad de aceite por bloque del modelo 1D. ....	76
Figura 20. Modelo 2D a escala de campo con tres capas. ....	78
Figura 21. Distribución de tasas de inyección de aire por cada capa. ....	79
Figura 22. Perfiles de temperaturas en las tres capas en las celdas 1, 3 y 10 de la dirección X del modelo bidimensional. ....	80
Figura 23. Picos de temperatura modelo 2D con tasa de inyección de aire inicial. ....	81
Figura 24. Picos de temperaturas con tasas de 30, 85, 150 y 200 Mscf/día. ....	84
Figura 25. Perfiles de temperaturas modelo bidimensional a escala de campo ajustado. ....	89
Figura 26. Comparación de los gases de combustión de los modelos 1D y 2D ajustado. ....	89
Figura 27. Perfil de temperaturas modelo bidimensional ajustado. ....	91
Figura 28. Comparación de eficiencia de recobro modelo 1D y 2D ajustado. ....	91
Figura 29. Comparación tiempos de cómputo modelos 1D y 2D ajustado. ....	92
Figura 30. Efecto de la porosidad sobre los picos de temperatura en la termopozo 5. ....	95
Figura 31. Efecto de la porosidad sobre el factor de recobro y producción acumulada de aceite. ....	96

Figura 32. Efecto de la porosidad sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido. ....	97
Figura 33. Modelo 2D con inclinación +5° y -5° respecto a la horizontal.....	98
Figura 34. Efecto del buzamiento sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.....	98
Figura 35. Efecto del buzamiento sobre el factor de recobro. ....	99
Figura 36. Efecto del buzamiento sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido. ....	100
Figura 37. Efecto de la permeabilidad sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.....	103
Figura 38. Efecto de la permeabilidad sobre los perfiles de temperaturas en el plano Y-Z. ....	104
Figura 39. Efecto de la permeabilidad absoluta sobre el factor de recobro. ....	105
Figura 40. Efecto de la permeabilidad absoluta sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido. ....	106
Figura 41. Efecto de la constante de Andrade A sobre la viscosidad del fluido. ....	108
Figura 42. Efecto de la viscosidad de las fracciones livianas sobre la temperatura en la termopozo 5 y el factor de recobro.....	110
Figura 43. Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.....	111
Figura 44. Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre el factor de recobro. ....	112
Figura 45. Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido.....	112
Figura 46. Efecto de la tasa de inyección sobre los picos de temperatura en la termopozo 5. ....	114
Figura 47. Efecto de la tasa de inyección sobre el factor de recobro.....	115
Figura 48. Efecto de la tasa de inyección sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido.....	116
Figura 49. Efecto de la tasa de inyección sobre el tiempo de cómputo. ....	116
Figura 50. Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.....	118
Figura 51. Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre el factor de recobro.....	119
Figura 52. Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido.....	119
Figura 53. Efecto de la concentración de oxígeno sobre los picos de temperatura en la termopozo 5. ....	121
Figura 54. Efecto de la concentración de oxígeno sobre el factor de recobro. ....	122
Figura 55. Efecto de la concentración de oxígeno sobre la composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido. ....	122
Figura 56. Efecto de la concentración de oxígeno sobre la tasa de consumo de cada reacción.....	124
Figura 57. Efecto de la concentración de oxígeno sobre el Upgrading de crudo. ....	126
Figura 58. Efecto de la presión de fondo fluyente sobre los picos de temperatura en la termopozo 5. ....	127
Figura 59. Efecto de la presión de fondo fluyente sobre el factor de recobro.....	128
Figura 60. Efecto de la presión de fondo fluyente sobre composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido. ....	128
Figura 61. Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.....	129
Figura 62. Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre el factor de recobro. ....	130

Figura 63. Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre el Upgrading.....	131
Figura 64. Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre composición de CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> producido.....	132
Figura 65. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre los picos de temperatura y factor de recobro.....	133
Figura 66. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre los picos de temperatura en la termopozo 5. ....	134
Figura 67. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre el factor de recobro.....	135
Figura 68. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre los gases de producción. ....	135
Figura 69. Efecto de la entalpía de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre los picos de temperatura en la termopozo 5 y factor de recobro.....	137
Figura 70. Efecto de la entalpía de la reacción de combustión de coque sobre los picos de temperatura en la termopozo 5 y el factor de recobro.....	138
Figura 71. Diagrama de influencia de la entalpía de cada reacción sobre los picos de temperatura. ....	139
Figura 72. Diagrama de influencia de la entalpía de cada reacción sobre la eficiencia de recobro. ....	140
Figura 73. Perfiles de temperatura para un factor preexponencial = 0, eliminando cada reacción. ....	142
Figura 74. Diagrama de influencia de la frecuencia de colisión de cada reacción sobre los picos de temperatura.....	146
Figura 75. Diagrama de influencia de la frecuencia de colisión de cada reacción sobre la eficiencia de recobro.....	147
Figura 76. Diagrama de influencia de la energía de activación de cada reacción sobre los picos de temperatura.....	151
Figura 77. Diagrama de influencia de la energía de activación de cada reacción sobre la eficiencia de recobro.....	152

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Comparación entre los tipos de reacciones que ocurren en un proceso de combustión in situ.....	42
Tabla 2. Análisis dimensional de la dependencia de la velocidad con el orden de reacción.....	47
Tabla 3. Criterios de Screening para proyectos de combustión in situ.....	52
Tabla 4. Eficiencia de recobro de la combustión in situ comparada con otros métodos EOR. ....	54
Tabla 5. Dimensiones del modelo 1D a escala de campo. ....	60
Tabla 6. Propiedades petrofísicas. ....	60
Tabla 7. Características de los componentes utilizados. ....	62
Tabla 8. Propiedades críticas de los componentes utilizados. ....	63
Tabla 9. Modelo de pseudo reacciones propuesto por Crookston.....	64
Tabla 10. Modelo de reacciones con mayores especificaciones usado.....	65
Tabla 11. Parámetros cinéticos del modelo de reacciones. ....	66
Tabla 12. Valores de los parámetros cinéticos para el ajuste.....	86
Tabla 13. Mejor configuración de parámetros cinéticos para el ajuste del modelo 2D. ....	88
Tabla 14. Coeficientes de variación de permeabilidad. ....	102
Tabla 15. Valores usados de la ecuación de Andrade.....	108
Tabla 16. Composición de CO <sub>2</sub> para diferentes regímenes de temperatura. ....	123
Tabla 17. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida.....	133
Tabla 18. Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida.....	136
Tabla 19. Efecto de la entalpía de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida. ....	137
Tabla 20. Efecto de la entalpía de la reacción de combustión de coque sobre las variables de salida. ....	139
Tabla 21. Efecto del factor preexponencial de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida. ....	143
Tabla 22. Efecto del factor preexponencial de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida. ....	144
Tabla 23. Efecto del factor preexponencial de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida.....	145
Tabla 24. Efecto del factor preexponencial de la reacción de combustión del coque sobre las variables de salida.....	145
Tabla 25. Efecto de la energía de activación de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida. ....	148

Tabla 26. Efecto de la energía de activación de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida. ....	149
Tabla 27. Efecto de la energía de activación de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida.....	150
Tabla 28. Efecto de la energía de activación de la reacción de combustión del coque sobre las variables de salida.....	150
Tabla 29. Resumen cualitativo de los parámetros de estudio sobre los procesos de combustión in Situ. ....	154

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE APLICADO A UN MODELO DE SIMULACIÓN DE COMBUSTIÓN IN-SITU \*

**AUTOR:** SAMUEL SANTAFÉ PÁEZ \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Combustión in situ, simulación numérica, análisis de sensibilidad, parámetros estáticos, parámetros hidrodinámicos, parámetros operacionales, parámetros térmicos, parámetros cinéticos.

La combustión in situ es una de las técnicas de recuperación mejorada más eficiente conceptualmente en la actualidad, esta técnica implica la inyección de aire al yacimiento, el cual mediante ignición espontánea o inducida origina un frente de combustión que propaga calor dentro del mismo. La energía térmica generada por éste método proporciona el desplazamiento de los fluidos de interés hacia la zona de producción.

Actualmente se han llevado a cabo modelos computacionales a nivel de laboratorio como herramienta para determinar interacción entre los parámetros presentes en el proceso de combustión in situ, sin embargo como la técnica no es escalable se pretende profundizar con este trabajo mediante análisis de sensibilidad para visualizar como es el comportamiento y ajuste de parámetros a mega escala.

La incertidumbre que se genera entre los resultados de simulación numérica y lo que realmente sucede con las geo ciencias, se debe a la idealidad con que se construyen los modelos, ya sea por simplicidad o por falta de información, esto permite pensar en diseños experimentales como plataforma de diseño para reproducir apropiadamente condiciones de yacimiento más complejas que puedan estar sometidos a este tipo de recuperación térmica.

En este orden de ideas se pretende tomar un modelo base a escala de campo unidimensional con data conceptual extraída de la literatura y llevarlo a una escala bidimensional ajustando parámetros críticos para reproducir el mismo comportamiento térmico, para posteriormente hacer un estudio de sensibilidad de parámetros de yacimiento estáticos, hidrodinámicos, operacionales, térmicos y cinéticos para visualizar como influyen sobre las características de desempeño del proceso en general.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Química. Ingeniería de Petróleos

Director: Ing. Cesar Augusto Pineda Gómez. Codirector: Msc. Elkin R. Santafé Rangel

## ABSTRACT

**TITLE:** UNCERTAINTY ANALYSIS APPLIED TO A IN-SITU COMBUSTION SIMULATION MODEL

\*

**Author:** SAMUEL SANTAFÉ PÁEZ \*\*

**KEYWORDS:** in situ combustion, numerical simulation, sensitivity analysis, static parameters, hydrodynamic parameters, operational parameters, thermal parameters, kinetic parameters.

Situ combustion is one of the enhanced recovery techniques conceptually more efficient actually, this technique involves the injection of air into the reservoir, which by spontaneous or induced ignition, causes a burning front which propagates in the same heat. Thermal energy generated by this method provides the displacement of the fluids of interest in the production area.

Currently computational models have been developed in the laboratory as a tool to determine interaction parameters present in the combustion process in situ, however, as the technique is not scalable to take a field scale, aims to deepen in this work with sensitivity analyzes and display as is the behavior and adjustment of parameters to mega scale.

The uncertainty generated between numerical simulation results and that really happens with the geo sciences, is due to the ideality with that models are built either for simplicity or absence of information, this allows us to think in experimental designs as design platform to reproduce the more complex reservoir conditions that may be subjected to this type of thermal recovery.

In this order of ideas this project builds a base model on one-dimensional to field scale with conceptual data extracted from the literature and bring it to a two-dimensional model to adjust critical parameters and to reproduce the same thermal behavior, and then make a sensitivity study of static, hydrodynamic, operational, thermal and kinetic parameters to display as influencing the performance characteristics of the overall process.

---

\*Graduate Project.

\*\*Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering.

Tutor: Ing. Cesar Augusto Pineda Gómez. Co-Tutor: Msc. Elkin R. Santafé Rangel

## 1. FUNDAMENTOS DE LA CIS

La combustión in situ es uno de los métodos de recobro térmico más antiguos (Sarathi<sup>1</sup>, 1999). Ha sido usado por más de nueve décadas con un historial de muchos proyectos exitosos. Sin embargo, está clasificado como un proceso de alto riesgo debido principalmente a los múltiples problemas de control en aplicaciones de campo. La mayoría de esas fallas se originan debido a la aplicación de este proceso a los yacimientos equivocados con un pobre estudio preliminar. Por eso es importante aclarar que la combustión in situ tiene un alto potencial técnico y económico para una gran cantidad de yacimientos, solo si se aplica bajo condiciones precisas.

El proceso de combustión in situ, también conocido como “fireflooding” o empuje por fuego, ha sido investigado y probado en campo ampliamente por Crookston<sup>2</sup> y Ali<sup>3</sup>, los cuales plantean detalles de formulación, procedimientos de solución numérica y computacional proveyendo un comprensivo repaso de los trabajos más recientes en el modelamiento de procesos de combustión in situ, que serán coyunturales para el desarrollo de este proyecto.

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ CIS o ISC por sus siglas en inglés (In-Situ Combustión) es una técnica de recuperación mejorada de hidrocarburos aplicada a procesos térmicos el cual consiste en una inyección de aire o aire enriquecido con oxígeno al yacimiento, a través de los pozos inyectoros, el aceite genera ignición cerca al pozo este a su vez genera calor debido a la reacción de combustión entre el gas

---

<sup>1</sup> SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999.

<sup>2</sup> CROOKSTON,H:B; “Numerical Simulation Model Form Thermal Recovery Processes”, SPE feb 1979 37-58, AIME 267.

<sup>3</sup> ALI, F:S:M; “Multiphase, Multidimensional Simulation Of In Situ combustion”, SPE 6896, 52<sup>nd</sup> annual technical conference an exhibition, 1977.

inyectado y el aceite residual. La zona de combustión se desplaza a través del yacimiento a una velocidad la cual es gobernada por la tasa de inyección y la cantidad de aceite que es quemado.<sup>4</sup>

En este proceso la mayoría del aceite es desplazado hacia los pozos productores por una combinación de empuje por gas (gases de combustión), vapor, y desplazamiento con agua. La CIS es llamada también “fireflooding” o “empuje por fuego”, término usado para describir el movimiento de un frente de quemado dentro del yacimiento. La figura 1 muestra el diagrama general de la combustión in situ, se definen tres zonas básicamente, en la primera zona se genera la combustión y se desplaza a través del yacimiento otra zona por la cual ya se efectuaron las reacciones cinéticas de combustión o zona quemada y finalmente una zona donde no ha sido aún alcanzada por el frente de combustión o zona fría.

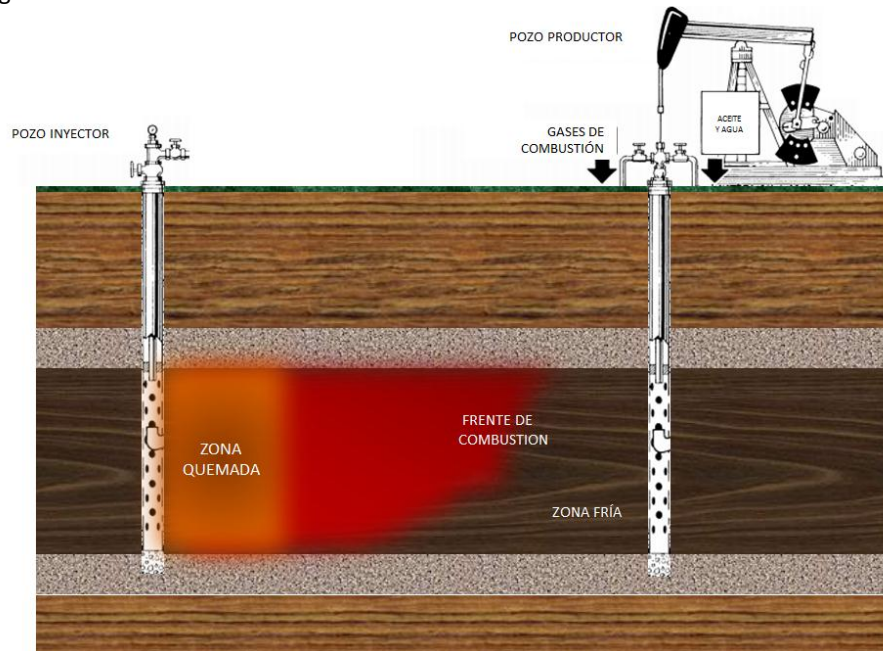
Se genera calor dentro del yacimiento por ignición del fluido in situ, y propagando el frente de combustión por inyección continua de algún oxidante, generalmente aire o aire enriquecido con oxígeno. Este calor reduce la viscosidad e incrementa la movilidad del aceite no quemado en las zonas adyacentes.

La combustión del coque (combustible sólido) con el oxígeno en el aire inyectado genera una reacción exotérmica formando gases tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y vapor. Estos gases producto de la reacción desplazan el aceite más liviano hacia la zona de producción. El calor generado viaja en la misma dirección del frente de combustión y causa una formación de combustible adicional por pirólisis, la formación de más aceite liviano y coque. Este proceso continúa hasta que el frente de combustión llega a los pozos productores.

---

<sup>4</sup>KUMAR, M.; “Simulation Of Laboratory In-Situ combustion Data And Effect Of Process Variations”, SPE 16027.

**Figura 1.** Diagrama de combustión in situ.



Fuente. El autor.

## 1.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

Basado en las direcciones de propagación de la llama respecto a la dirección de flujo de aire, el proceso puede ser frontal (cuando el frente de combustión va en el mismo sentido que el flujo de aire) o en reversa (cuando el frente se mueve en contra del flujo de aire).

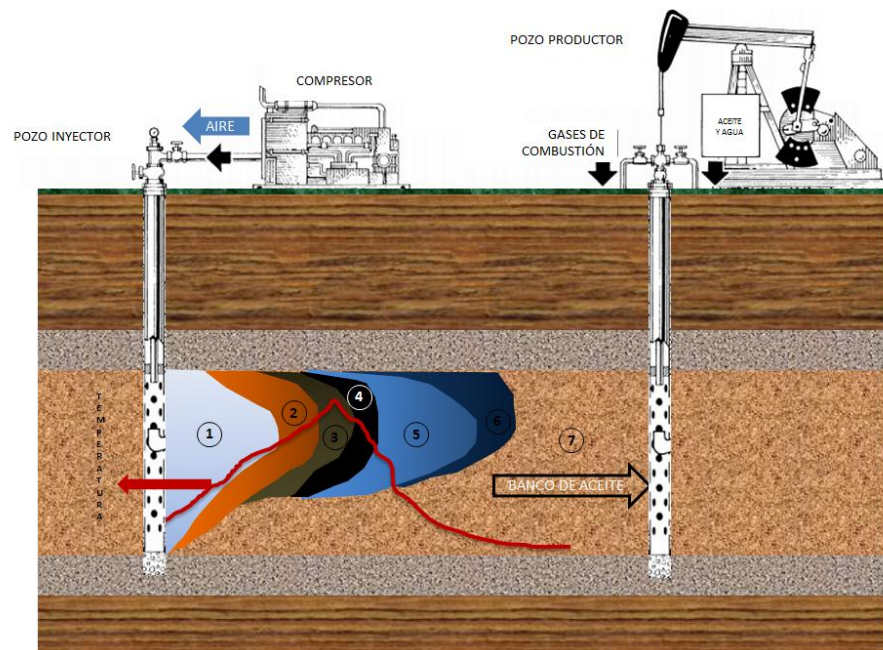
### 1.2.1 Combustión frontal

La combustión frontal puede también ser clasificada como combustión seca cuando solo es inyectado aire o aire enriquecido, o húmeda cuando son inyectados aire y agua de forma alternada.

### 1.2.1.1 Combustión frontal seca

Este es el modo de Combustión In Situ más usado. Es llamada combustión seca debido a que la inyección es solo de aire o gas con contenido de oxígeno, es frontal debido a que el proceso de ignición se realiza cerca al pozo inyector y el movimiento del frente se mantiene en la misma dirección del fluido de inyección hasta el pozo productor.

**Figura 2.** Proceso de combustión in situ en modo seco.



Fuente. El autor.

Durante el proceso de recuperación de petróleo, inicialmente es inyectado aire o cualquier gas con contenido de agente oxidante que al contacto con el hidrocarburo desencadena reacciones de oxidación que liberan energía y propician las condiciones para generar un frente de combustión por medio de calentadores eléctricos, quemadores a gas, a cualquier otro dispositivo que dé inicio un frente de combustión incandescente. Algunas veces se logra la

combustión espontánea cuando el yacimiento presenta temperaturas superiores a 180°F<sup>5</sup> y los fluidos presentes son suficientemente reactivos.

La figura 2 muestra las zonas de combustión del proceso a través del yacimiento bajo una representación idealizada, en campo no ocurriría lo mismo ya que se presentarían regiones de transición entre dichas zonas, la clasificación de estas regiones según la literatura es muy dependiente de cada autor, según el NIPER<sup>6</sup> existe 8 zonas y otros como Sarathi<sup>7</sup> las dividen en 7 por ser esta la convención más utilizada se procederá a explicar bajo su criterio.

Iniciando desde el pozo inyector en dirección hacia el pozo productor las zonas representadas en la figura 2 son:

1. Zona quemada.
2. Zona de combustión.
3. Zona de craqueo y vaporización.
4. Zona de condensación (steam plateau).
5. Banco de agua.
6. Zona de aceite.
7. Zona de aceite no perturbado.

La zona 1 corresponde al área quemada la cual es adyacente a la región donde se inyecta el aire. Como su nombre lo indica es el área donde la combustión ya había tenido lugar, esto se lleva a cabo en reacciones de combustión completas, donde generalmente en campo no ocurre, la zona quemada puede contener algún residuo sólido orgánico no quemado, generalmente denominado coque. El análisis de muestras tomadas de la parte quemada en campo indica tanto un 2% de coque y saturado con aire tienden a un color generalmente blanco con rayas grises,

---

<sup>5</sup>SARATHI, Op cit p 26.

<sup>6</sup> National Institute for Petroleum and Energy Research, "Enhanced Oil Recovery Information" Bartlesville, Oklahoma, April 1986 revised edition, pag 23.

<sup>7</sup>SARATHI, Ibid p 25.

marrones y rojas. Desde esta zona se somete a la temperatura más alta durante un periodo prolongado, que por lo general presentan alteración mineral. Debido a la continua entrada del aire de los alrededores cuya composición es 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>, la temperatura incrementa cerca del pozo inyector.

Inmediatamente después de la zona quemada esta la zona de combustión (zona 2) donde reacciona el oxígeno y el combustible sólido y da lugar a la generación de calor. Esta zona es muy estrecha, acá la oxidación a alta temperatura se lleva a cabo para producir principalmente agua y gases de combustión (CO<sub>2</sub> dióxido de carbono, y monóxido de carbono CO).

El combustible predominante es coque, que se forma en la zona de craqueo (zona 3) térmico justo por delante de la zona de combustión. El coque no es carbono puro, pero si un material orgánico deficiente de hidrogeno. La temperatura alcanzada en esta zona depende esencialmente de la naturaleza y la cantidad de combustible consumido por unidad de volumen de la roca. En la zona 3 se efectúa el craqueo y vaporización, en esta región la alta temperatura generada por el proceso de combustión hace que los componentes más ligeros del crudo se vaporicen y los componentes más pesados generen pirolisis (craqueo térmico).

Los componentes livianos vaporizados son transportados downstream por los gases de combustión y son condensados y mezclados con el crudo in situ. La pirólisis de los componentes más pesados genera CO<sub>2</sub>, gases orgánicos y residuos orgánicos sólidos del hidrocarburo, este residuo, comúnmente se define como coque, se deposita sobre la roca y es la principal fuente de combustible para el proceso de combustión.

Adyacente a la zona de craqueo esta la zona de condensación (zona 4). Dado que el gradiente de presión dentro de esta zona es por lo general bajo, la temperatura dentro de la zona es esencialmente plana (30 y 550 ° F) y depende la presión parcial del agua en la fase de vapor. Por lo tanto, la zona de condensación se refiere a menudo como steam plateau. Algunos de los hidrocarburos vaporizados

que entran en esta zona se condensan y se disuelven en el crudo. Dependiendo de la temperatura, el aceite también puede someterse a "visbreaking" en esta zona, por lo tanto reduciendo su viscosidad. Visbreaking es una forma leve de craqueo térmico. Esta región contiene vapor, aceite, agua, y gases de combustión, y estos fluidos se mueven hacia el pozo productor. Las pruebas de campo indican que el steam plateau se extiende desde 10 hasta 30 pies por delante del frente de combustión.

En el borde anterior de la steam plateau, donde la temperatura es más baja que la condensación temperatura de vapor, un banco de agua caliente se forma (zona 5). Este banco se caracteriza por una saturación de agua mayor que la saturación original. Un banco de petróleo precede el banco de agua. Esta zona contiene todo el petróleo que ha sido desplazado desde las zonas de aguas arriba (zona 6).

Más allá del banco de petróleo se encuentra la zona no perturbada (zona 7) que aún no se ve afectada por la combustión proceso, excepto por un posible incremento en la saturación de gas debido al flujo de gases de combustión ( $\text{CO}_2$ , CO, y  $\text{N}_2$ ).

El mecanismo de transporte de fluidos en general en un proceso de combustión es una secuencia altamente compleja de la unidad de gas (gases de combustión), la unidad de agua (agua de formación recondensada y agua de combustión), la unidad de vapor, gas miscible y unidad de disolvente.

El concepto de "banco" mencionado anteriormente da una idea de una zona saturada por un fluido en los procesos de combustión in situ, lo cual no es una verdadera representación del comportamiento de campo. En campo, las diversas zonas no son fácilmente identificadas y existen considerables regiones de transición entre dichas zonas.

Además, las ubicaciones relativas de las diferentes zonas y la secuencia en que se producen también pueden ser diferentes a la descrita anteriormente. Esta

diferencia surge principalmente debido a la heterogeneidad del yacimiento la cual hace que el fluido y los flujos de calor sean diferentes en diversos puntos de la región de combustión.

La distribución de fluido dentro de cada una de estas zonas se ve influenciada por el perfil de temperatura así como la caracterización de la permeabilidad relativa de la formación. Las propiedades químicas del aceite que se quedan atrás por el banco de vapor determinar la cantidad de coque, que a su vez determina la cantidad de aire que debe ser inyectada para consumir dicho coque.

La línea roja sobre puesta en la representación gráfica(figura 2) hace alusión al perfil de temperatura al cual es sometido el yacimiento en un instante de tiempo dato, desde el inicio de la inyección se comienza a apreciar un incremento de temperatura hasta alcanzar las reacciones de combustión de coque las cuales permiten definir el pico de temperatura máxima, este tiene por sentido físico ubicar el frente de combustión el cual más adelante se profundizara acerca de él y de su comportamiento ya que es de vital importancia en el proceso de combustión in situ, en el desarrollo de este proyecto.

### **1.2.1.2 Combustión frontal húmeda**

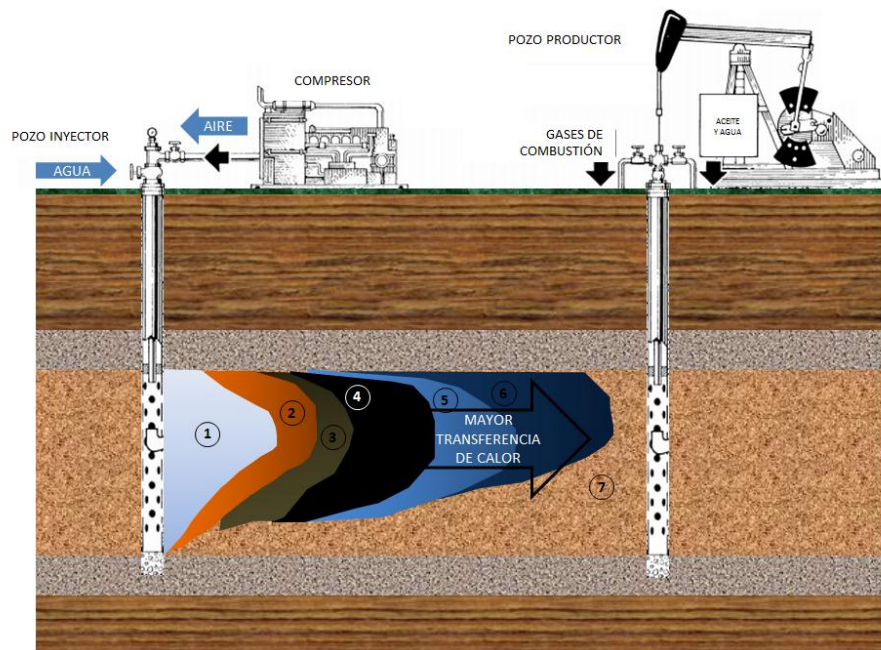
En el proceso de combustión hacia adelante modo seco, gran parte del calor generado durante la combustión se almacena en la quema de arena detrás de la frente ardiendo y no se utiliza para el desplazamiento del petróleo. La capacidad calorífica del aire seco es baja y, en consecuencia, el aire inyectado no puede transferir calor desde la matriz de la formación tan rápido como lo es generado. El agua, por otra parte, puede absorber y transportar el calor muchas veces más eficiente que el aire.

Si el agua se inyecta junto con el aire, tanto el calor almacenado en la arena quemada se puede recuperar y transportar hacia adelante. La inyección de agua

al mismo tiempo o de forma alternada con el aire es comúnmente conocido como combustión húmeda, parcialmente inactiva. La relación de la tasa de agua inyectada a la tasa de aire influye directamente en la velocidad avance frontal de la combustión y el comportamiento de aceite de desplazamiento.

El agua inyectada absorbe el calor de la zona quemada, se vaporiza, pasa a través del frente de combustión, y libera el calor que se condensa en las secciones más frescas del yacimiento. Por lo tanto, el crecimiento de los bancos de vapor y agua por delante del frente de combustión acelerando la transferencia de calor y el desplazamiento de aceite, como muestra la figura 3. El tamaño de estos bancos y la tasa de recuperación de petróleo son dependientes de la cantidad de agua inyectada.

**Figura 3.** Proceso de combustión in situ en modo húmedo.



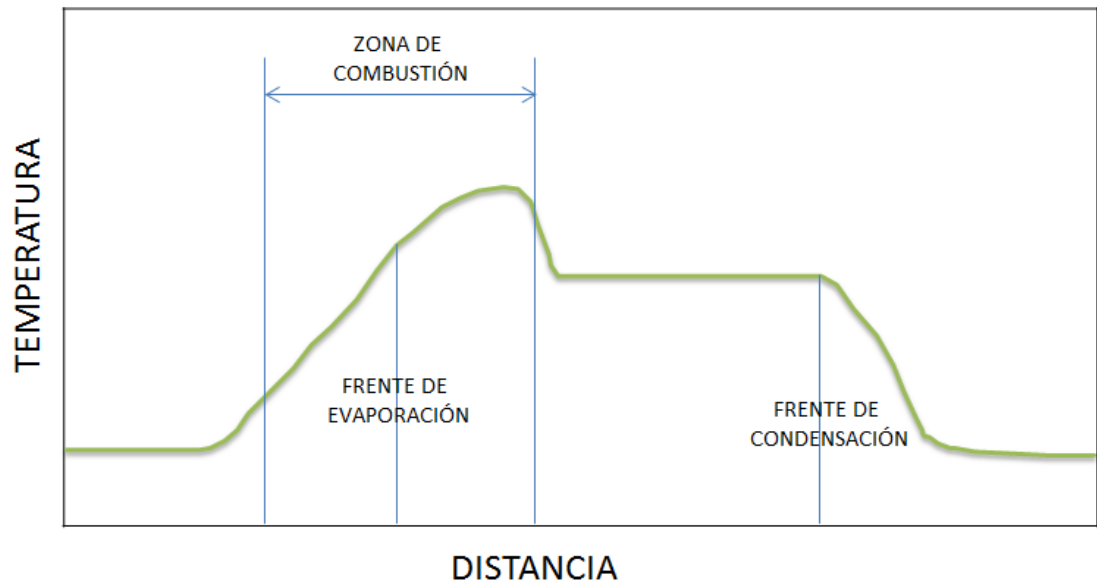
Fuente. El autor.

Dependiendo de la relación aire/agua inyectada, el proceso de combustión en modo húmedo se clasifica como incompleta, normal o súperhúmeda. A tasas bajas (combustión húmeda incompleta), el agua inyectada se convierte a vapor

sobrecalentado, mientras se mueve hacia el frente de combustión (ver figura 4), en este caso, el agua inyectada no recupera todo el calor de la zona quemada. A mayor tasa de inyección de agua (combustión húmeda normal), el agua inyectada recuperará todo el calor de la zona quemada (ver figura 5). A un ritmo aún mayor de inyección de agua (combustión súper húmeda) la temperatura máxima en el frente de combustión declina (ver figura 6).

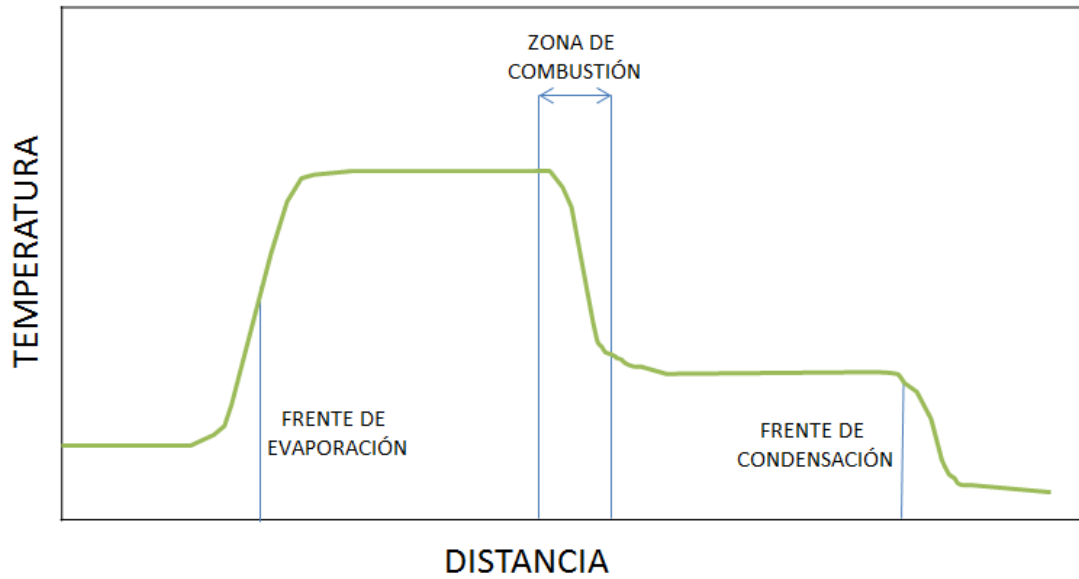
En las figuras 4,5 y 6 se muestran los perfiles de temperatura para cada una de estas subdivisiones de la combustión húmeda.

**Figura 4.** Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión húmeda incompleta.



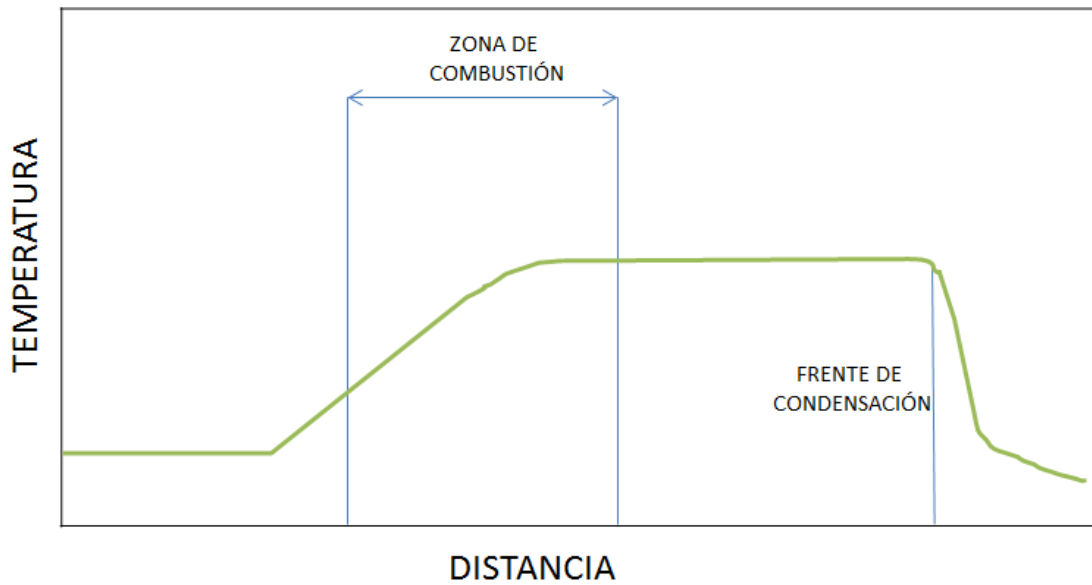
Fuente. Modificado de SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999, pag 30.

**Figura 5.** Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión húmeda normal.



Fuente. Modificado de SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999, pag 30.

**Figura 6.** Esquema de un perfil de temperatura para un proceso de combustión súper húmedo.



Fuente. Modificado de SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999, pag 31.

Los estudios de laboratorio y pruebas de campo han demostrado que los procesos de combustión asistidos con agua reduce la cantidad de aceite quemado como combustible. Este comportamiento aumenta la cantidad de aceite desplazado pero lo más importante es que disminuye la cantidad de aire requerido para quemar un volumen específico del yacimiento. El mecanismo causa que el combustible disminuya durante la combustión húmeda como también se cree que aumenta la disponibilidad de hidrógeno en la zona de combustión. Una parte del combustible hidrogena y llega a ser movilizado, moviéndose hacia fuera de la región de combustión sin quemar. La disminución en el combustible y aire requiere que pueda ascender a más del 25% de mejora en la eficiencia del proceso.

El proceso de combustión súper húmedo es una modificación del proceso de combustión en húmedo que intenta disminuir el requerimiento de aire aún más. El proceso no incrementa la recuperación de petróleo, pero aumenta la velocidad del frente de combustión y reduce los costos de compresión. Se inyecta agua en mayor proporción que la combustión húmeda normal. El aumento de calor, transportado por el vapor a medida que pasa a través que quema el frente, causa que las temperaturas de combustión decrezcan. La temperatura llega a ser menor que la requerida para la combustión en el borde posterior de la parte frontal haciendo que el oxígeno pase a través de la región sin reaccionar. Por lo tanto, una porción del depósito de combustible es desviado, reduciendo los requisitos de aire.

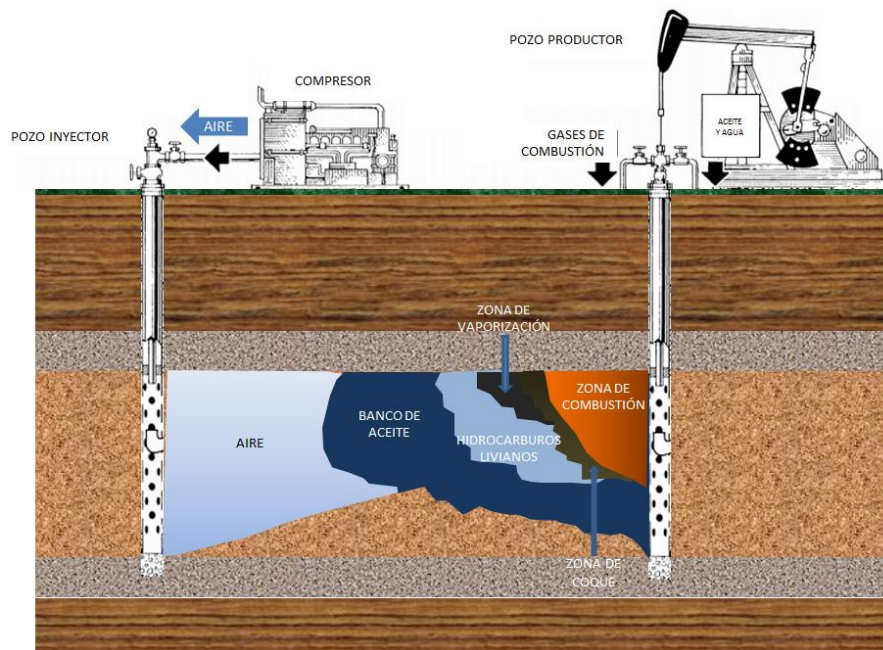
En conclusión, el proceso de combustión en seco quema parte del crudo y desplaza el resto. El uso de calor para el desplazamiento del aceite es pobre. En los procesos de combustión húmedos, una menor cantidad de crudo se quema como combustible, y la utilización de calor y el desplazamiento de aceite son más eficientes, lo que resulta en mejora de las tasas de recuperación. El aspecto más importante de combustión parcialmente inactiva es el frente de combustión va a una velocidad más rápida debido a que se quema sólo una parte del combustible

depositado. Esto da como resultado corta vida del proyecto y requerimientos de aire comprimido reducidos en comparación con la combustión seca.

### 1.2.2 Combustión en reversa

En los procesos de combustión frontal a menudo tiene muchos inconvenientes porque la inyectividad del aceite debe fluir desde la región calentada, estimulando a las partes frías, el aceite viscoso se vuelve menos móvil y tiene que crear barreras para el flujo. Estos fenómenos se presentan con frecuencia en aceites muy viscosos y arenas bituminosas. La combustión en reversa ha propuesto ser técnicamente factible en pruebas de laboratorio.

**Figura 7.** Proceso de combustión en reversa.



Fuente. El autor.

La figura 7 ilustra el comportamiento del proceso de combustión en reversa, en este proceso la zona de combustión se inicia en el pozo productor y se mueve hacia el inyector; contracorriente al flujo de hidrocarburos. El aire inyectado tiene

que viajar a través del yacimiento y ponerse en contacto con la zona de combustión. El concepto básico de la combustión en reversa o inversa es que la mayor porción del calor esta entre el pozo de producción y el aceite cuando se desplaza. Por lo tanto, una vez el aceite comienza a moverse, se produce muy poco enfriamiento para inmovilizar el aceite.

Los principios de funcionamiento de combustión inversa no son tan claros como los de combustión frontal. Aunque el proceso de combustión es esencialmente el mismo, su movimiento no se controla por la tasa de consumo de combustible pero si por el flujo de calor.

Tienen que existir tres cosas necesarias para la quema y son oxígeno, combustible y temperatura elevada. Durante la combustión inversa, el oxígeno está presente desde el pozo de inyección a la zona de combustión. El combustible está presente lo largo de la formación. El factor que determina el lugar donde se produce la combustión es la alta temperatura que se produce en el pozo productor durante la ignición. A medida que el calor generado durante la combustión incrementa la temperatura del yacimiento en la dirección del pozo inyector, la llama se mueve en esa dirección. El frente de combustión no puede moverse hacia el pozo productor ya que siempre todo el oxígeno es consumido por la llama del frente. Por lo tanto, el proceso de combustión está buscando las fuentes de oxígeno, pero puede moverse solamente tan rápido como el calor pueda elevar las temperaturas.

La porción del aceite quemado por combustión directa e inversa es diferente. La combustión frontal quema sólo el residuo sólido (coque), mientras que el combustible quemado en la combustión inversa son los hidrocarburos con mayores pesos moleculares intermedios. Esto es debido a que todo el aceite móvil tiene que moverse a través la zona de combustión. Por lo tanto, la combustión inversa consume un mayor porcentaje del aceite en lugar de combustión hacia adelante. Sin embargo, el movimiento de aceite a través de la zona de alta

temperatura resulta considerablemente más craqueo del petróleo, mejorando su gravedad, conocido este fenómeno como upgrading.

### **1.3 REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADAS A LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU**

El proceso de combustión in situ depende para su existencia de la generación de reacciones químicas entre el aceite y el aire inyectado en el yacimiento. La existencia y naturaleza de estas reacciones, así como también los efectos de calentamiento que ellas inducen, dependen de las características del sistema roca-fluidos. Debido a esto, es importante tener claridad sobre los aspectos químicos del proceso, para el posterior diseño, interpretación y evaluación del desempeño del proceso a escala de campo<sup>8</sup>.

Las reacciones químicas asociadas a procesos de combustión in-situ son numerosas y ocurren en diferentes rangos de temperatura. Generalmente con el fin de simplificar los estudios, los investigadores agruparon estas reacciones en tres clases:

Las reacciones de adición de oxígeno o de oxidación a bajas temperaturas (LTO por sus siglas en inglés Low Temperature Oxidation), reacciones de pirólisis o de oxidación a temperaturas intermedias (ITO- Intermediate Temperature Oxidation), y reacciones de rompimiento o de oxidación a altas temperaturas (HTO- High Temperature Oxidation). Adicional a estas tres reacciones, en algunos casos se puede presentar el consumo de un combustible previamente oxidado, debido a una producción extra de combustible en el modo de reacciones de adición, y al posterior consumo de éste, debido a un aumento de la tasa de inyección; esto lleva a un incremento de temperatura, llegando a superar el rango de altas temperaturas.

---

<sup>8</sup>SARATHI, Op cit p 37.

- Las reacciones LTO son heterogéneas (gas/liquido) y generalmente producen componentes parcialmente oxigenados y pequeñas cantidades de óxidos de carbono.
- A temperaturas intermedias, las reacciones de formación de combustible implican craqueo/pirólisis de los hidrocarburos con la formación de coque que es un componente rico de carbono pesado).
- A altas temperaturas las reacciones de combustión son heterogéneas, en las cuales el oxígeno reacciona con el aceite no oxidado, el combustible y el componente no oxigenado generan óxidos de carbono y agua<sup>9</sup>.

### 1.3.1 Reacciones de oxidación a bajas temperaturas (LTO) o de adición

Durante combustión in situ los hidrocarburos inicialmente presentes experimentan dos tipos de la reacción con el oxígeno (aire inyectado) dependiendo de la temperatura predominante. Estas reacciones ocurren a temperaturas inferiores a 400 ° F y son definidas como la oxidación a baja temperatura (LTO) y el otro es la oxidación a alta temperatura (HTO). A diferencia de la HTO, la cual produce CO<sub>2</sub>, CO, y (H<sub>2</sub>O) como sus principales productos de la reacción, las reacciones LTO tienden a formar hidrocarburos oxigenados parcialmente y agua tales como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alcoholes, e hidroperóxidos según Burger et al<sup>10</sup>.

Además las reacciones LTO pueden ser pensadas como reacciones de adición de oxígeno. Las reacciones LTO ocurren incluso a bajas temperaturas y estas son causadas por la disolución de oxígeno en el crudo. El grado de disolución depende se la velocidad de difusión de las moléculas de oxígeno en el crudo a bajas

---

<sup>9</sup>SARATHI, Op cit p 37.

<sup>10</sup>BURGER, J., "Chemical Aspects Of In-Situ combustion- Heat Of combustion And Kinetics", Soc. Pet. Eng. Journal, Vol. 12, No. 5, October.

temperaturas nuevamente cita Burger et al<sup>11</sup>. Los aceites ligeros son más susceptibles a LTO de aceites pesados<sup>12</sup>.

Reacciones LTO son complejas de entender. Sin embargo, se cree que LTO reacciones consisten en la condensación de componentes de bajo peso molecular a productos de alto peso molecular. Según investigadores como Moschopedis-Speight, Babu-Cormack y Adegbesan et al., corroboran que composicionalmente en las reacciones LTO se incrementa el contenido de asfaltenos del petróleo al disminuir su contenido aromático y de resina.

Según Alexander et al, Bousaid-Ramey, Severin et al. Babu-Cornack han podido demostrar con sus investigaciones que en las reacciones LTO la viscosidad del crudo original aumenta, como también el rango de temperaturas de ebullición y densidades, por otro lado nuevamente Alexander et al junto con Al-Saadon evidenciaron que este tipo de reacción a baja temperatura aumentan la cantidad de combustible disponible para la combustión y Dabbous-Fulton analizaron este efecto llegando a la conclusión que provoca una declinación substancial en el recobro de aceite por parte de las zonas de craqueo y destilación.

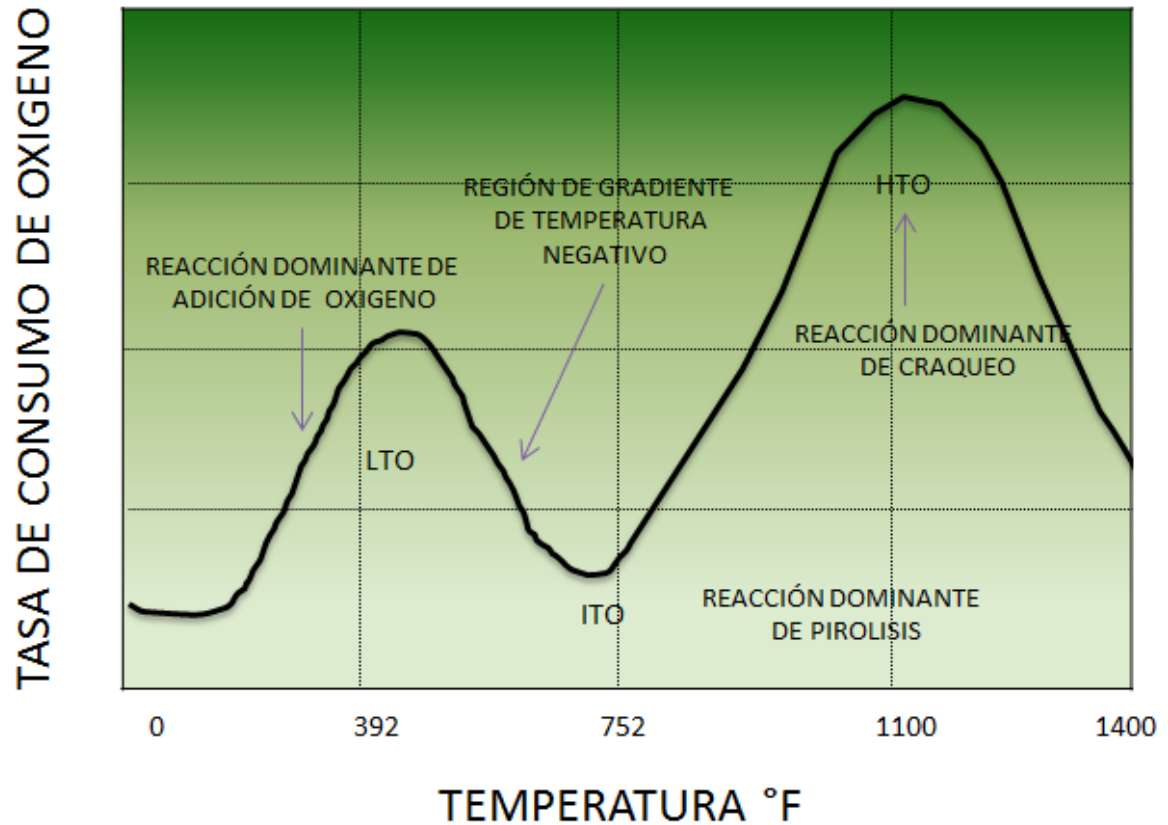
Las reacciones LTO generalmente se cree que ocurren a temperaturas de menos de 600°F, pero este rango de temperatura es muy dependiente del petróleo in situ. Es muy difícil asignar un rango de temperatura a la región LTO porque las reacciones de oxidación del carbono (rompimiento de enlaces C-C) estos ocurren a temperaturas entre 270°F y 320°F. Las reacciones LTO son evidenciadas por un rápido incremento en la tasa de consumo de oxígeno, así como la generación de óxidos de carbono, pero sus características más adelante tienden a una declinación en la tasa de reacción de oxígeno a temperaturas en el rango de 450°F y 540° F. Esto da lugar a la región de gradiente de temperatura negativo, como muestra la figura 8, la cual es un intervalo en el que la tasa de consumo de oxígeno decrece a medida que incrementa la temperatura.

---

<sup>11</sup>BURGER, J., Ibid.

<sup>12</sup>SARATHI, Op cit p 38.

**Figura 8.** Esquema del perfil de temperaturas de combustión modo seco, mostrando el efecto general de la temperatura sobre la tasa de consumo de oxígeno para crudos pesados.



Fuente. Modificado de SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999, pag. 39.

La falla de las temperaturas al trascender la región de gradiente de temperatura negativo tendera a una muy baja eficiencia de desplazamiento de aceite, esto se debe a que las reacciones de adición de oxígeno generan fase de vapor para reducir significativamente la movilidad del aceite. Debido a que el producto dominante de la reacción ITO es el coque, la prolongación de reacción LTO durante un período extendido puede causar que el aceite permanentemente quede atrapado en los poros<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> MOORE R.G. 1997." Observations and Design Considerations For In Situ Combustion Projects". University of Calgary.

Para terminar se puede concluir algunas causas y consecuencias que caracterizan las reacciones LTO tomadas de Oliveros<sup>14</sup>:

Causas:

- Bajas temperaturas de combustión
- Mal diseño del proyecto
- Disolución de oxígeno en el crudo
- Baja tasa de aire que contacta el crudo
- Canalización de oxígeno
- Condensación de moléculas de compuestos de bajo peso molecular
- Bajas temperaturas del yacimiento

Consecuencias:

- Combustión incompleta
- Bajas tasas de avance del frente
- Aumenta fracción de asfaltenos
- Aumento viscosidad del crudo
- Aumento cantidad de combustible
- Bajos FR y decline de producción

La estequiometría de las reacciones de adición (LTO) está dada de forma general como:



---

<sup>14</sup> OLIVEROS, L., Determinación De Parámetros De Diseño Y Evaluación Técnica De Procesos De Combustión In Situ A Partir De Pruebas De Tubo De Combustión, trabajo de grado Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2011.

### **1.3.2 Reacciones de oxidación a temperatura intermedia (ITO) o de pirólisis**

Como la temperatura del yacimiento incrementa, el aceite experimenta un cambio químico llamado pirólisis. Las reacciones de pirólisis o reacciones de oxidación de a temperatura intermedia ITO por sus siglas en inglés (intermediate temperature oxidation) hacen referencia en la literatura asociada a procesos de CIS frecuentemente a las reacciones de depositación de combustible sólido, ya que estas reacciones son responsables de la generación de "coque" (un componente rico en carbón pesado con una fracción de hidrocarburo de baja volatilidad) para su posterior combustión.

Las reacciones de pirólisis son principalmente homogéneas (gas-gas) y endotérmicas, (absorción de calor) e implican tres tipos de reacciones: deshidrogenación, craqueo y condensación. En las reacciones de deshidrogenación los átomos de hidrógeno son separados de las moléculas de hidrocarburos, mientras los átomos de carbono quedan intactos. En las reacciones de craqueo, el enlace carbono - carbono de las moléculas de hidrocarburo pesado se rompen, dando como resultado la formación de un menor número de carbonos con moléculas de hidrocarburo más pequeñas. En el caso de reacciones de condensación, el número de átomos de carbono en las moléculas aumenta llevando a la formación de hidrocarburos ricos en carbono pesado. El tipo de aceite y la estructura química de sus componentes determinan la velocidad y extensión de las diferentes reacciones de pirólisis.

Las parafinas (hidrocarburos de cadena lineal) no se someten a reacciones de condensación. A 700 -1250°F se someten a deshidrogenación y/o reacciones de craqueo térmico, dependiendo de la longitud de la cadena de hidrocarburo. En general hidrocarburos de cadena corta (metano hasta butano) se someten a deshidrogenación y las moléculas más grandes se someten a craqueo. Las reacciones de craqueo se inician generalmente por el rompimiento del enlace

carbono-carbono, seguido por la extracción del hidrógeno (deshidrogenación). Las moléculas de deshidrogenación que se recombinan para formar moléculas más pesadas, eventualmente tienden a la formación de coque. Así, las moléculas más grandes de cadena lineal después de un calentamiento prolongado o cuando se someten a una temperatura suficientemente alta producen a menudo coque y cantidades considerables de fracciones de hidrocarburos volátiles.

Los compuestos aromáticos (compuestos de anillo de benceno y otros) se someten a reacciones de condensación en lugar de reacciones de degradación (cracking) a 1200-3000°F. En la reacción de condensación los enlaces débiles C-H en estas series cíclicas (anillos de benceno) se rompen y sustituyen por enlaces más estables C-C llevando a la formación de una molécula poliaromática menos hidrogenada. Cuando se somete a un calentamiento más adelante estos productos de condensación pierden más hidrógenos y se recombinan para formar una polimolécula rica en carbono más pesada, llevando eventualmente a la formación de grafito como macromoléculas.

Estudios de laboratorio de pirólisis hechos por Abu-Khamsin et al. indican que la pirólisis del petróleo crudo en medios porosos pasa por tres fases superpuestas: destilación, reducción de viscosidad, y el coquizado. Durante la destilación, el aceite pierde la mayor parte de sus fracciones ligeras y parte de sus fracciones medias. A temperaturas más altas (40 y 540°F), un craqueo leve del petróleo (visbreaking) ocurre cuando el hidrocarburo pierde pequeños grupos de átomos de hidrógeno para formar menos compuestos ramificados, que son más estables y menos viscosos. A temperaturas aún más altas, (alrededor de 550°F) el aceite remanente en medio poroso ingresa a una fracción volátil y residuo pobre de hidrogeno rico en carbono no volátil frecuentemente conocido como coque. El coque es definido como la fracción insoluble de tolueno de un aceite y generalmente contiene 80-90% de carbono y 3-9% de hidrógeno. Tanto el visbreaking como las reacciones de craqueo producen hidrógeno y algunos hidrocarburos ligeros en la fase gaseosa. Este es más adelante observado que la

destilación de petróleo a baja temperatura juega un rol importante en la formación y extensión de las reacciones de craqueo y de formación de coque. Las altas presiones de operación generalmente llevan a la formación de más combustible que es más pobre en hidrógeno.

Investigadores en la universidad de Calgary<sup>15</sup> han estudiado por mucho tiempo varios aspectos de la combustión in situ describen las reacciones de pirólisis del bitumen como:

Bitumen →Máltenos

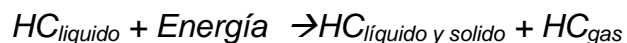
Máltenos →Asfáltenos

Asfáltenos →Coque

Asfáltenos →Gas

Los máltenos son fracciones del crudo solubles en pentano y tolueno y que pueden además ser separados en saturados, aromáticos y resinas usando cromatografía líquida. Los asfáltenos son fracciones del bitumen solubles en tolueno pero insolubles en pentano. El coque está definido como la fracción insoluble en tolueno. El craqueo térmico de asfáltenos para la formación de coque requiere un periodo largo de tiempo. Este periodo de tiempo decrece cuando las temperaturas de craqueo incrementan<sup>16</sup>.

La estequiometría de las reacciones de pirólisis (ITO) está dada de forma general como:



---

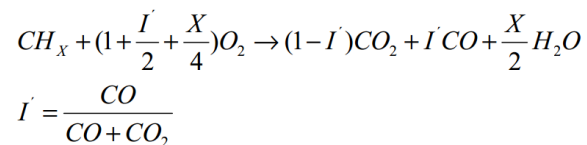
<sup>15</sup>N. JIA, R.G. MOORE, S.A. MEHTA, M.G. URSENBACH," Kinetic Modelling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reactions", University of Calgary, Journal of Canadian Petroleum Technology.

<sup>16</sup>SARATHI, Op cit p 42.

### 1.3.3 Reacciones de oxidación a altas temperaturas (HTO) o de rompimiento

La reacción entre el oxígeno en el aire inyectado y el coque a temperaturas superiores a 650°F se refieren a menudo como la oxidación a alta temperatura (HTO). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), y agua (H<sub>2</sub>O) son los productos principales de estas reacciones. Las reacciones HTO son heterogéneas (gas-sólido y gas-líquido) y se caracterizan por el consumo de todo el oxígeno en la fase gaseosa.

La estequiometría de la reacción HTO (ecuación química) está dado por:



I = será cero en el caso de combustión completa generando solo CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O

El calor generado a partir de estas reacciones proporciona la energía térmica para sostener y propagar el frente de combustión.

De acuerdo a los estudios de Scarborough-Cady<sup>17</sup> indican que en las reacciones HTO son predominantemente reacciones heterogéneas y el proceso de quemado implica una serie de fenómenos de transporte. La combustión (oxidación) es una reacción controlada en una superficie y se puede dividir en los siguientes pasos:

1. Difusión de oxígeno desde la corriente de gas a la superficie del combustible.
2. Absorción del oxígeno en la superficie.
3. Reacción química con el combustible.
4. Desorción de los productos de la combustión.

---

<sup>17</sup>SCARBOROUGH, R.M. AND G.V. CADY, 1982, "The Design and Installation of an Oxygen Supported In-Situ Combustion Project in Meyer", R.F., Editors: The Future of Heavy Oil and Tar Sands. Proceedings of second (UNITAR) International Conference on Heavy Oil and Tar Sands. Maracaibo, Venezuela.

5. Difusión de los productos fuera de la superficie y dentro de la corriente de gas.

Si cualquiera de estos pasos es inherentemente más lento que los pasos restantes, el proceso de combustión será controlado por ese paso. Generalmente las reacciones químicas (paso 3) proceden mucho más rápido que los procesos de difusión. Por lo tanto, la tasa de combustión global probablemente será controlada por difusión.

Existe bastante controversia respecto a si la reacción química o la difusión de oxígeno controlan el proceso de combustión. Investigadores como Dabbous et al., y Lin-Chen encontraron que la reacción de combustión era controlada por difusión del oxígeno, por otra parte Hughes et al., Fassihi-Brigham, Burger y Islam et al. sostienen que la reacción de combustión es controlada por reacción química.

Debido a que los experimentos de laboratorio se llevan a cabo casi siempre bajo condiciones muy ideales, estas situaciones permiten una alta transferencia de masa interfacial del oxígeno marcando la influencia de la difusión en las reacciones de combustión en el yacimiento. Otros investigadores sostienen que la tasa de combustión es dependiente de la concentración de oxígeno (presión parcial) cerca del frente de combustión. En altos flujos de aire la combustión es controlada por velocidad de la reacción química y en los bajos flujos de aire es limitada por difusión<sup>18</sup>.

La estequiometría de las reacciones de craqueo (HTO) está dada de forma general como:



---

<sup>18</sup> SARATHI, Op cit p 43.

### 1.3.4 Comparación de las reacciones químicas de los procesos de combustión in situ

**Tabla 1.** Comparación entre los tipos de reacciones que ocurren en un proceso de combustión in situ.

Reacción Características	REACCIÓN DE ADICIÓN	REACCIÓN DE PIRÓLISIS	REACCIÓN DE CRAQUEO
Rango de temperatura (F)	212-512	512-900	932-1292
Reactivos	CH + O <sub>2</sub>	(CH) <sub>L</sub> + E	CH+O <sub>2</sub>
Productos	CHO <sub>x</sub> + ΔE	(CH) <sub>L</sub> y S+ HC <sub>G</sub>	CO <sub>x</sub> +H <sub>2</sub> O+ΔE
%CO <sub>2</sub>	<10	N/A	12-14
Tipos de reacciones (fases)	Heterogéneas	Homogéneas	Heterogéneas
Tipos de reacciones (energía)	Exotérmicas	Endotérmicas	Exotérmicas
Otras características	↑Asfáltenos ↑Viscosidad ↑Combustible ↓FR	Deshidratación Destilación Craqueo	Consumo total del oxígeno

Fuente. OLIVEROS, L., Determinación De Parámetros De Diseño Y Evaluación Técnica De Procesos De Combustión In Situ A Partir De Pruebas De Tubo De Combustión, trabajo de grado Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2011, pag 37.

Resumiendo e integrando toda la información previamente citada en la tabla 1 muestra un paralelo entre los tipos de reacciones que ocurren durante el proceso de combustión in situ (LTO, ITO y HTO), donde se aprecia una continuidad en cuanto al rango de temperatura para cada tipo de reacción, sin embargo cabe

aclarar que este es dependiente del tipo de fluido y de la configuración presente, asociando e integrando todos los parámetros operacionales, cinéticos, estáticos y del fluido, en este rango se puede evidenciar claramente la preferencia de temperatura por cada región y como las reacciones de rompimiento son de alta temperatura, en cuanto a la estructura de los reactivos las reacciones de adición y de rompimiento presentan la misma configuración, como también la estructura de los productos con la pequeña diferencia que en las reacciones de craqueo se produce agua, en cuanto al tipo de reacción las de adición y las de rompimiento para el tipo de fase o de energía son semejantes.

#### **1.4 CINÉTICA DE LA REACCIÓN**

La cinética de la reacción se define frecuentemente como el estudio de la velocidad y grado de transformación química de reactivos en productos. Sin embargo, esta definición está muy incompleta para el desarrollo que se busca tener con este proyecto. El estudio de la cinética de reacción en procesos de combustión in situ es realizado bajo las siguientes razones:

1. Para caracterizar la reactividad de los hidrocarburos.
2. Determinar las condiciones necesarias para lograr la ignición y / o para determinar si tendrá lugar una auto ignición en el yacimiento cuando se inyecta el aire.
3. Conocer la naturaleza de combustible formado y su impacto en la combustión.
4. Establecer los valores de los parámetros de la cinética (velocidad de reacción) y los modelos utilizados en la composición para la simulación numérica de procesos de combustión in situ.

La combustión de hidrocarburos en medios porosos no es una simple reacción, sin embargo, se puede clasificar en varias y consecutivas reacciones que ocurren a

través de diferentes rangos de temperatura; dado que los aceites se componen de muchos compuestos<sup>19</sup>, una representación explícitamente correcta del modelo de reacciones requeriría expresiones cinéticas bastante extensas. Debido a que no es factible describir la reacción que experimenta cada compuesto, existen modelos detallados de reacciones de oxidación de hidrocarburos que están disponibles para moléculas de hidrocarburo más simple y se componen de varias etapas de reacción conocidas comúnmente como ecuaciones químicas.

El modelo de oxidación de hidrocarburos detallado existe actualmente, pero no puede ser incluido en simuladores térmicos multidimensionales, debido a que la capacidad de un ordenador, y los requerimientos de cómputo serían demasiado exigentes. Los modelos detallados de oxidación se han desarrollado y validado para sólo la más simple molécula de combustible y no están disponibles para los combustibles más prácticos. Sin embargo, los modelos más ideales se aproximan al estudio de la cinética de reacción de crudos en medios porosos.

La más simple reacción que representa la oxidación de un combustible de hidrocarburo típico es:



Donde los coeficientes estequiométricos ( $n_i$ ) están determinados por la elección de combustible. Esta reacción es una forma de aproximación de los efectos de muchas reacciones elementales que se llevan a cabo en el yacimiento durante el proceso de combustión. Su tasa, por lo tanto, debe representar un promedio individual de todos los tipos de reacciones involucradas.

Muchos investigadores describen la velocidad de reacción de oxidación de la combustión in situ en términos de una simple reacción tipo, este modelo ampliamente aceptado asume la dependencia funcional de concentración de

---

<sup>19</sup>SARATHI, Op cit p 44.

carbono (combustible), y presión parcial de oxígeno, actualmente es expresado matemáticamente por:

$$R_c = \frac{dC_m}{dt} = k P_{O_2}^a C_f^b$$

Dónde:

RC es la tasa de combustión de petróleo crudo

C es la concentración instantánea del combustible

k es la constante de velocidad

Po2 es la presión parcial de oxígeno

a es el orden de reacción con respecto a la presión parcial de oxígeno

b es el orden de reacción con respecto a la concentración de combustible.

Estudios de oxidación de petróleo crudo y carbono a alta temperatura, indican una reacción de primer orden mientras la dependencia de la concentración de combustible este entre 0.5-1.0 y la dependencia con respecto a la presión parcial de oxígeno, es decir, (a = 1),0 y (b = 0,5 a 1,0)<sup>20</sup>.

La constante de velocidad de reacción "k" en la ecuación anterior es a menudo una función de la temperatura expresada por:

$$K = A \exp(-E/RT)$$

Dónde

A = factor pre-exponencial o frecuencia de colisión

E = energía de activación

---

<sup>20</sup> SARATHI, Op cit p 45.

R = constante universal del gas = 1.987 cal/ mol K

T = temperatura absoluta en K (Kelvin)

Esta ecuación se refiere frecuentemente como la ecuación de Arrhenius y la constante "A" como constante de velocidad de Arrhenius. Las constantes en la ecuación varían con el tipo de aceite, presión y así como otros parámetros.

Las unidades de la constante A, E y R dependen de las unidades seleccionadas para la masa, presión, temperatura y el tiempo. En simuladores cinéticos de procesos de combustión in situ suelen requerir información para el cálculo de la tasa de avance del frente de combustión y de recuperación de petróleo. La determinación experimental de parámetros cinéticos se utiliza a menudo para una rápida detección en la simulación de los valores. Por lo tanto, se debe tener cuidado a las unidades cuando se utilizan estos datos cinéticos.

#### **1.4.1 Factores de los que depende la velocidad de reacción**

La velocidad de la reacción está fuertemente relacionada con las concentraciones de los reactivos. Las ecuaciones de velocidad para casi todas las reacciones tienen la siguiente forma:

$$\text{Vel} = k [A]^m[B]^n$$

Donde los exponentes m y n se denominan órdenes de reacción y la suma de los mismos es el orden global de reacción, por otro lado [A] y [B] son las concentraciones de los reactivos.

El orden de reacción no corresponde a los coeficientes estequiométricos. En muchas reacciones el orden de reacción es 0, 1, 2 o quizás un número fraccionario. Este orden de reacción es definido como el poder con el cual la concentración de un término eleva la velocidad de la reacción.

Una reacción de orden cero genera una velocidad de reacción independiente de la concentración de los reactivos.

La reacción de primer orden depende de la concentración de solamente un reactivo, la velocidad de la reacción es proporcional a las tasas de cambio en concentraciones de reactivos y productos.

Las reacciones de segundo orden dependen de la concentración de un reactivo de segundo orden o de dos reactivos de primer orden.

Las reacciones de tercer orden proceden solamente cuando tres especies llegan a estar en contacto simultáneamente.

Las unidades de la velocidad de reacción dependen del orden de reacción y se consignan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Análisis dimensional de la dependencia de la velocidad con el orden de reacción.

VELOCIDAD DE REACCIÓN	
ORDEN DE REACCIÓN	UNIDADES
Orden cero	mol/(volumen*tiempo)
Primer orden	1/tiempo
Segundo orden	1/(mol*tiempo)
Tercer orden	mol/(volumen*tiempo)

Fuente: Tomado y modificado de CLARA, G., "Laboratorio Química Física I", Universidad de Valencia, Open CourseWare, 2009-2010.

### 1.4.2 Frecuencia de colisión

Las reacciones ocurren porque las velocidades de reacción difieren para diferentes reacciones. Para que una reacción ocurra los reactivos deben colisionar. Solo una cierta fracción de las colisiones totales causan un cambio químico; estas son llamadas colisiones exitosas. Las colisiones exitosas tienen

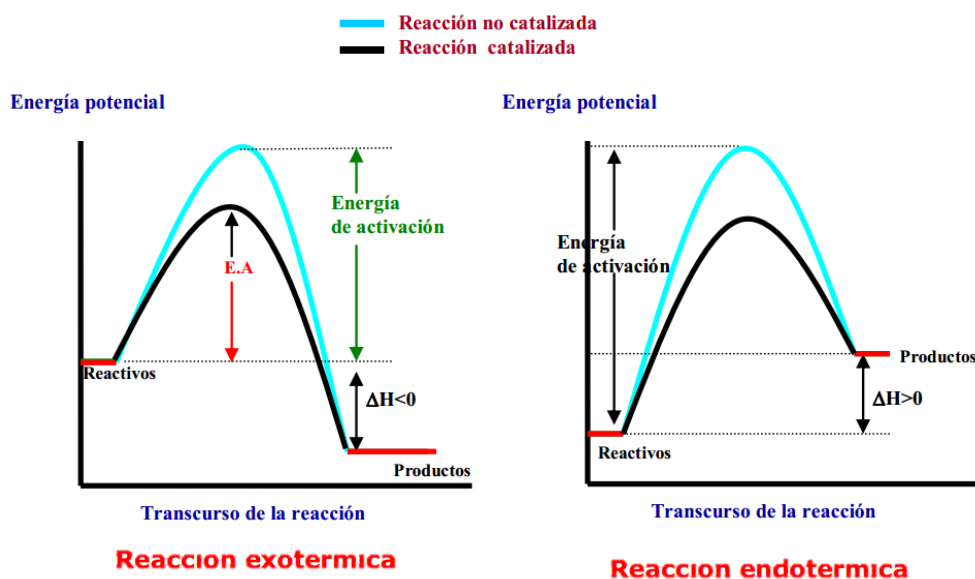
energía suficiente llamada energía de activación que al momento del impacto rompan los enlaces existentes y formen nuevos enlaces, resultando en los productos de la reacción. El incrementar la concentración de los reactivos y aumentar la temperatura lleva a más colisiones y por tanto mayor número de choques entre moléculas, incrementando la velocidad de la reacción.

Al aumentar la frecuencia de colisión, también aumenta la probabilidad de que los choques ocurran en una orientación adecuada para que se produzca la reacción química.

### 1.4.3 Energía de activación

Es la energía que necesita un sistema antes de poder iniciar un determinado proceso. La energía de activación suele utilizarse para denominar la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química dada.

Figura 9. Energía potencial vs tiempo transcurrido de reacción.



Fuente: Tomado de CLARA, G., "Laboratorio Química Física I", Universidad de Valencia, Open CourseWare, 2009-2010.

Para que ocurra una reacción entre dos moléculas, éstas deben colisionar en la orientación correcta y poseer una cantidad de energía mínima, en cuanto a las reacciones se pueden clasificar dependiendo si absorben o liberan energía como endotérmica y exotérmica respectivamente, la figura 9 representa de manera clara como es afectada la energía potencial de la reacción en el estado de transición de reactivos a productos, y como se cuantifica la energía de activación en este sistema.

#### **1.4.4 Factores que afectan las reacciones de oxidación**

Dos de los factores más importantes en el proceso de combustión in-situ son formación de combustible y la combustión. Los procesos físicos y químicos que gobiernan la capacidad de un crudo para depositar combustible y su posterior combustión (oxidación) influyen fuertemente en la economía de un proyecto de combustión in situ. Muy poca depositación de combustible puede prevenir la formación de un frente de combustión sostenido y estable. Del mismo modo, demasiada depositación de combustible no será económicamente atractiva ya que requeriría de un alto requerimiento de gas oxidante. La tasa de propagación del frente de combustión y requerimiento de aire dependerá de la extensión de las reacciones de oxidación exotérmicas, las cuales están controladas por la cinética de estos procesos.

Fuertes investigaciones en los últimos años indican que la naturaleza de la composición de la roca del yacimiento y las características del crudo influye en las características térmicas de oxidación. La arcilla y el contenido metálico de la roca, como su área superficial tienen una profunda influencia sobre velocidad de depositación de combustible y su oxidación.

Arcillas y arenas finas, tienen superficies específicas muy altas. Los estudios realizados por Fassihi et al., Vossoughi et al. y Burdon-Gadelle, indican la presencia de arcillas y arenas finas en la matriz a favor de aumentar las tasas de formación

de coque. Las arcillas son catalizadores ácidos sólidos y su actividad catalítica está relacionada con su densidad. El aumento del contenido de arcilla aumenta la acidez.

Tanabe y Venuto et al., encontraron que en sitios de mayor acidez y más baja energía de activación (constante de Arrhenius pequeña), promueve la oxidación a baja temperatura y reacciones de formación de coque. Esto es particularmente ventajoso en yacimientos de crudos ligeros, donde la deposición de combustible puede ser menor que la necesaria para mantener la combustión.

Metales y aditivos metálicos también pueden afectar la naturaleza y cantidad de combustible formado. Los metales son usados como catalizadores en las industrias de procesos químicos y en la refinación de petróleo para acelerar la oxidación de hidrocarburos y reacciones de craqueo. En estudios realizados para investigar el efecto de contaminación de metal sobre las reacciones de craqueo de hidrocarburos, se encontró que varios metales promueven la formación de coque y el efecto catalítico de estos metales se encontró que se ordenan de la siguiente manera: Cobre < Vanadio < Cromo = Zinc < Níquel.

Profundas investigaciones por parte de Burger-Sahuquet, Fassihi, Drici-Vossoughi hablan sobre el efecto de los minerales del yacimiento en los procesos de combustión in situ y concluyen que estos promueven las reacciones de oxidación a baja temperatura e incrementan la depositación de combustible. Otros estudios realizados en la Universidad de Stanford por De los Rios, Shallcross, Baena y Holt, indican que la cinética de las tres reacciones de oxidación (adición, pirólisis y craqueo) es afectada por la presencia de aditivos metálicos en el crudo. Estos investigadores también observaron que la actividad catalítica de un metal es altamente dependiente de la composición específica del crudo. Los beneficios de los aditivos metálicos promueven y mantienen la combustión en un yacimiento de aceite ligero. La capacidad de iniciar y propagar el frente de combustión en el

yacimiento es atribuido a las propiedades catalíticas del aditivo metálico las cuales incrementan la concentración de combustible.

### **1.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU (SCREENING)**

A continuación se presenta una excelente síntesis del Screening para CIS consignada en el trabajo de Yatte<sup>21</sup> basado en profundas investigaciones llevadas a cabo en experiencias de campo y de laboratorio a nivel experimental y teórico, realizados por Poettman, Geffen, Lewin, Lyoho, y Chu, los cuales presentan las características apropiadas de un yacimiento para la aplicación de procesos de combustión in-situ.

**Contenido de petróleo:** en cuanto al consumo de combustible, se consume alrededor del 6 al 15% del petróleo in-situ. Porosidad >20%, Saturación de aceite >40%, con el fin de que el proyecto sea rentable, Sw <40%, puesto que una mayor cantidad de agua causaría problemas con la propagación del frente de llama.

**Espesor de la Arena:** No menor de 10 a 15 ft, puesto que a menor espesor se presentan mayores pérdidas verticales de calor. No mayor a 50ft, entre mayor sea el espesor se requiere una mayor cantidad de aire, y está sujeto a las limitaciones en cuanto al equipo de compresión.

**Profundidad:** Mínima 200 ft, pues está limitada por la presión de inyección de aire. Máxima 2500-4500 ft, a medida que aumenta la profundidad, aumentan los costos de compresión del aire.

---

<sup>21</sup>YATTE, G., Camilo; "Seminario De Combustión In Situ, Curso Recobro Mejorado", Maestría En Ingeniería De Hidrocarburos UIS, 2009.

**Gravedad del petróleo:** API<25, de 5 a 15 API se recomienda combustión en reversa o húmeda ya que los crudos son muy viscosos. Para crudos de API>25 se recomiendan otro tipo de procesos como inyección de agua o gas.

**Permeabilidad del yacimiento:** Los valores de permeabilidad deben ser altos para que el aire se propague y el frente de llama avance los más uniformemente posible. Hay que tener en cuenta que valores altos de permeabilidad vertical generarían un fenómeno conocido como overriding, en donde el aire por diferencia de gravedades con los demás fluidos del yacimiento, se desplaza cerca al tope de la formación, irrumpe en los pozos productores y por lo tanto se obtienen bajas eficiencias de barrido.

**Tipo de formación:** Arena tipo intergranular, continua, homogénea y poco fallada.

**Límites del yacimiento:** El yacimiento no debe tener capa de gas o zonas de agua dentro del área de operación, pues el aire inyectado tendería a canalizarse. Un acuífero activo puede llegar a apagar la combustión. Las intercalaciones de lutitas saturadas de agua, resultarían beneficiosas para el transporte de calor de la combustión.

**Tabla 3.** Criterios de Screening para proyectos de combustión in situ.

Autor	Año	Espesor (ft)	Profundidad (ft)	$\Phi$ (%)	K (md)	So (fracción)	API
Poettmann	1964	>10	100-3000	>20	>100		<40
Geffen	1973	>10	>500				<45
Lewin et al	1976	>10	>500			>0.50	10-45
Chu	1977			>22		>0.50	<24
Iyoho	1978	5-50	200-4500	>20	>300	>0.50	<10
Chu	1980			>0.16	>100	>0.35	<40

Fuente. Modificado de YATTE, G., Camilo; "Seminario De Combustión In Situ, Curso Recobro Mejorado", Maestría En Ingeniería De Hidrocarburos UIS, 2009.

La tabla 3 presenta un resumen de los criterios de Screening por varios autores para evaluar un proyecto de combustión in situ, los criterios de Lewin y colaboradores se basaron en Geffen, con ligeras modificaciones.

Chou uso dos diferentes acercamientos para establecer guías de Screening de manera estadística para proyectos de combustión. Estos son el acercamiento por límites de confiabilidad y el acercamiento por análisis de regresión. Ambos acercamientos están basados en proyectos de combustión reportados que se consideraron exitosos o fallidos y en los cuáles las propiedades del yacimiento y de los fluidos estuvieron disponibles. Mientras que la aproximación por límites de confianza arrojó la especificación de los valores máximos y mínimos para las características del yacimiento, el análisis por regresión llevó a la obtención de una variable compuesta y que sirve como una medida del éxito fracaso de los procesos de combustión in situ. Ambas guías incluyen una máxima viscosidad de 1000 cp, basados en la suposición que la inyección de vapor es preferible a la combustión, para crudos muy viscosos.

Iyoho, presento una recopilación de las aplicaciones de campo de estos procesos y los resultados obtenidos. Las guías de Screening propuestas fueron interesantes; ya que su idea brinda soporte al ingeniero en escoger una de las variantes de la combustión seca, como son la combustión en reversa y la combustión húmeda<sup>22</sup>.

Según Sarathi<sup>23</sup> la combustión in situ ha demostrado ser rentable en la recuperación de petróleo pesado (10-20 ° API) de los yacimientos poco profundos (menos de 1.500 pies), y aceites livianos (> 30 ° API) en yacimientos profundos (11,000 pies). Aunque la mayoría de los proyectos de combustión se implementan en yacimientos de crudo pesado, es cada vez que se utiliza para recuperar el petróleo ligero de los yacimientos profundos. En los Estados Unidos más

---

<sup>22</sup> PALACIO, O.Carlos., "Evaluación De Yacimientos Prospectos Para La Implementación De Procesos De Combustión In Situ Mediante Analogías", trabajo de grado Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2010, pag 37.

<sup>23</sup> SARATHI P., Op cit p 18.

proyectos de combustión están en funcionamiento en los yacimientos de petróleo ligero que en los yacimientos de petróleo pesado.

La combustión in situ es exitosa en proyectos donde el espesor varía de 4 a 150 pies. El proceso, sin embargo, ha demostrado ser más eficiente en 10-50 pies de arenisca.

La presión del yacimiento no tiene efecto sobre el éxito técnico del proceso. El proceso ha sido implementado exitosamente en formaciones van de la presión de vacío a 4.500 psig.

La permeabilidad de la formación tiene un efecto mínimo sobre el proceso. El proceso ha sido exitosamente implementado en formaciones cuya permeabilidad varía de 5 a 10.000 md.

El proceso puede ser aplicado en yacimientos donde inyección de agua y/o inyección continua de vapor no es efectivo. En yacimientos profundos (mayor que 10.000 pies), la inyección de vapor no es efectiva debido a las pérdidas de calor excesivo y los altos costos de levantamiento por lo tanto tiene que ser reemplazada por la inyección de agua la cual es económicamente atractiva. Los proyectos de combustión permiten el uso de un mayor espaciamiento entre pozos y puede resultar en una mayor recuperación de petróleo en comparación con inyección continua de vapor.

La eficiencia de recuperación es mejor que otros procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos como se puede apreciarse en la tabla 4secompara la combustión in situ con otros métodos EOR.

**Tabla 4.** Eficiencia de recobro de la combustión in situ comparada con otros métodos EOR.

Proceso	Eficiencia de desplazamiento %	Eficiencia de barrido areal %	Eficiencia de barrido vertical %	Eficiencia de recobro de componentes %
Combustión in situ	95	70	85	56
Inyección de vapor	65	70	85	39
Inyección cíclica de vapor	-	-	-	20
Inyección de Micro emulsiones	90	70	80	50
Inyección de agua con CO <sub>2</sub>	80	50	80	32
Inyección de agua con NaOH	35	70	80	20

Fuente.SARATHI P.; In Situ combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999, pag 20.

## 1.6 LIMITACIONES DE LOS PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN SITU

Como todos los otros métodos de recuperación de petróleo, el proceso de combustión tiene sus fallas. La mayoría de estas limitaciones se pueden superar considerablemente con gastos. Esto ha reducido su atractivo general. A continuación se presentan algunas de las características menos atractivas de la combustión in situ:

- Aunque el aire es libre, este debe ser comprimido y entregado a la formación. La energía requerida para comprimir el aire junto con costos de mantenimiento del compresor son altos. Referente a la energía intensiva de la operación de inyección de vapor, los costos para la combustión in situ son más bajos solamente cuando la formación tiene menos de 40 pies de espesor. Para yacimientos con mayor espesor, las pérdidas de calor durante el empuje por vapor son lo suficientemente bajas permitiendo que el calor se entregue a un costo más bajo.
- Los problemas operativos asociados con la combustión son más problemáticos y requieren una mayor técnica sofisticada para resolverlos. En comparación con operaciones de que son relativamente libre de problemas.
- A diferencia del proceso de inyección de vapor el diseño de la combustión in situ debe ser precedida por robustas y costosas investigaciones de laboratorio. Esto es necesario para determinar las características del quemado del crudo, de la disponibilidad del combustible y de los requerimientos de aire.
- La complejidad del proceso de combustión in-situ obstaculiza el desarrollo de simuladores numéricos más sofisticados para la predicción del rendimiento del proceso.

Si bien las mejoras se están haciendo considerables en la aplicación de esta tecnología, muchos operadores siguen considerando esta tecnología como una operación de alto riesgo. El éxito comercial de este proceso para yacimientos profundos, permeabilidad extremadamente baja, y yacimientos clásticos había hecho tomar un segundo vistazo a este proceso. El éxito de la tecnología de combustión horizontal y en los campos de crudo pesado de Canadá ha contribuido también al renacimiento del interés por parte de los operadores en este proceso.

Actualmente se ven importantes avances en la aplicación de este proceso en yacimientos se encuentran en ambientes hostiles. También es probable que el

proceso sea cada vez más aplicado para recuperar el petróleo ligero. Así el futuro para la recuperación de petróleo por procesos ISC es muy prometedor<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> SARATHI, Op cit p 21.

## 2. FLUJO DE TRABAJO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL CASO BASE

Para la descripción del caso base se extraen datos conceptuales de la literatura, propuestos por investigadores que analizaron los fenómenos que ocurren en un proceso de combustión in situ, se selecciona una data donde se proceda a diseñar un modelo unidimensional a escala de campo, cargando el modelo estático, cinético y operativo en un archivo legible por el simulador ECLIPSE Thermal<sup>25</sup>, luego de las corridas, analizar todas las variables de salida de interés para este estudio, que serán, eficiencias de recobro, composición de gases de combustión y rangos de perfiles térmicos que finalmente serán de uso para establecer el ajuste a posteriores modelos.

### 2.1 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL A ESCALA DE CAMPO 1D

La descripción del modelo base a escala de campo en una dimensión es fundamental debido a que dicho modelo será la referencia conceptual para futuras comparaciones cuando se hagan nuevas distribuciones espaciales (estratificación) y sirva para ajustar los picos de temperatura de los otros modelos variando parámetros cinéticos que presenten incertidumbre y operativos que no sean propios del proceso de combustión in situ.

Los datos fueron extraídos de la literatura, el estudio de Crookston et. al.<sup>26</sup> apporto datos dimensionales para la construcción del grid a escala de campo 1D, como también el modelo de fluidos, reacciones e interacción roca fluido que fueron discutidos más de manera más detallada por Coast<sup>27</sup> y este último apporto

---

<sup>25</sup> Simulador comercial vinculado a la compañía Schlumberger, versión utilizada 2011.2.

<sup>26</sup> CROOKSTON, H:B., "Numerical Simulation Model Form Thermal Recovery Processes", SPE feb 1979 37-58, AIME 267.

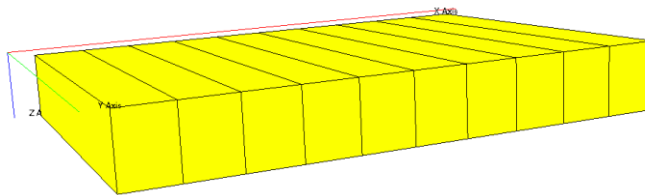
<sup>27</sup> COAST, K.H., "In Situ Combustion Model", SPE 8394.

información operativa haciendo referencia a los datos de inyección-producción, sin embargo, el modelo usado en este proyecto emplea un fluido de inyección diferente al que proponen los autores, por ende se planteó una nueva configuración de los parámetros operativos de inyección. El periodo de simulación es de 15 años con timesteps de 6 meses, esto para tener una idea clara del comportamiento de diversas variables de salida mucho después del tiempo de ruptura del frente de combustión, sin embargo parámetros de interés como eficiencias de recobro serán analizadas cuando el frente llegue al pozo productor y este será el valor máximo para analizar la eficiencia del proceso.

### 2.1.1 Construcción del grid

Inicialmente para la construcción del grid se tomaron datos en coordenadas cartesianas a escala de campo (tabla 5), las dimensiones del yacimiento fueron extraídas del estudio hecho por Crookston et al<sup>28</sup> siendo de 164 ft. En la dirección X, 115 ft en la dirección Y, y 21 ft de espesor distribuidos en la dirección Z., y una distribución de bloques 10 en la dirección X, y 1 en las direcciones Y y Z, como se puede visualizar en la figura 10.

**Figura 10.** Modelo 1D a escala de campo.



Fuente. Tomado de FloViz 2011.2

---

<sup>28</sup>CROOKSTON, H.B, Op Cit pag 45.

**Tabla 5.** Dimensiones del modelo 1D a escala de campo.

Propiedad	Valor
Longitud (ft)	164
Ancho (ft)	115
Espesor (ft)	21
Divisiones en X	10
Divisiones en Y	1
Divisiones en Z	1

Fuente. CROOKSTON,H:B; "Numerical Simulation Model Form Thermal Recovery Processes", SPE feb 1979 37-58, AIME 267.

### 2.1.2 Propiedades petrofísicas

La tabla 6 resume las propiedades petrofísicas fundamentales para la construcción del modelo, los datos de permeabilidad, porosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica e interacción roca fluido fueron tomados de Crookston et al.<sup>29</sup>, por efectos de simplicidad no se han tenido en cuenta zonas de transición donde son modeladas por curvas de presión capilar.

**Tabla 6.** Propiedades petrofísicas.

Propiedad	Valor
Permeabilidad (md)	4000
Porosidad	0.38
Capacidad calorífica de la roca (Btu/ft <sup>3</sup> *°F)	35
Conductividad térmica de la formación (Btu/ft*D*°F)	24
Saturación de agua inicial	0.20
Saturación de agua irreducible	0.20
Saturación de agua máxima	0.7

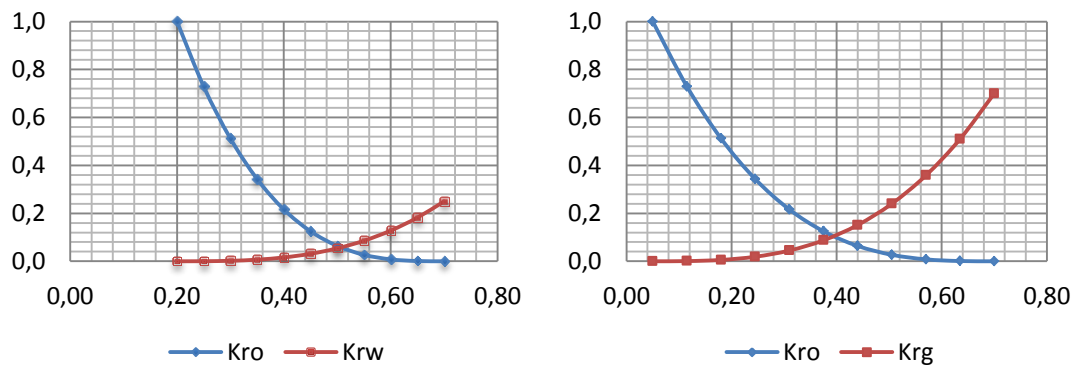
<sup>29</sup>CROOKSTON, H.B, Ibid, pag 45.

Saturación de gas crítico	0.05
Permeabilidad relativa del agua a saturación de agua irreducible	0.0
Permeabilidad relativa del aceite a saturación de agua irreducible	1.0
Permeabilidad relativa del gas a saturación de aceite residual	0.7
Permeabilidad relativa del aceite a saturación de gas crítico	1.0
Índice exponencial de Hirasaki	3
Presión capilar	0.0

Fuente. Tomado y Modificado de CROOKSTON, H:B., "Numerical Simulation Model Form Thermal Recovery Processes", SPE feb 1979 37-58, AIME 267.

Con los end points definidos previamente se llevan a la correlación de Hirasaki<sup>30</sup> para generar curvas suaves con índices exponenciales iguales a 3.0.

**Figura 11.** Interacción roca-fluido del sistema agua-aceite y gas-aceite.



Fuente. Autor.

### 2.1.3 Modelo de fluidos

El crudo utilizado en este trabajo es un aceite pesado cuyas características son mostradas en la tabla 7, sometido a una temperatura inicial del yacimiento de 200

<sup>30</sup> PALMA, J.M., Apuntes clase de recobro mejorado, 5ª presentación pag 6, UIS 2012, I semestre.

°F, Crookston y colaboradores proponen un modelo de fluidos con base en pseudocomponentes las cuales llama Heavy Oil y Light Oil para ingresar estos datos en forma más detallada al simulador ECLIPSE Thermal se procede a especificar fracciones ligeras, intermedias y pesadas del crudo las cuales corresponden a las propiedades del C10, C20 y C36 respectivamente, donde inicialmente el yacimiento se encuentra con una composición en mayor proporción de C36 y trazas de C10 y O2.

**Tabla 7.** Características de los componentes utilizados.

Descripción	Componente	Fracción Molar	MW (lb/lb mol)	Densidad (lbm/ft <sup>3</sup> )
Heavy oil	C36	0.98	500	49.2141705053378
Intermediate oil	C20	0.0	275	46.1693468970975
Light oil	C10	0.02	136	35.2439212710314
	C1	0.00	16.043	26.9026668420532
Gas de combustión	CO <sub>2</sub>	-	44.01	48.0
Fluido de inyección	N <sub>2</sub>	0.79	28.013	70.7063050777463
	O <sub>2</sub>	0.21	32	0.0970810
Combustible solido	Coque	-	13	80 @ 60 F-14.7 psia

Fuente.SANTAFÉ, E., "In-Situ Combustion and Chemical Reactions with ECLIPSE", Schlumberger SIS Training Course,Houston 2011.

Aun cuando no se encuentren fracciones livianas e intermedias de manera significativa en la composición inicial del crudo se tienen que tener en cuenta las propiedades críticas ya que estas fracciones se liberaran una vez se da inicio al proceso de combustión. El coque es depositado por la reacción de pirólisis y sus propiedades son necesarias para la reacción de alta temperatura.

Las propiedades críticas empleadas para estos componentes también fueron extraídas de tablas empleadas en el curso de entrenamiento de combustión in situ y reacciones químicas con ECLIPSE y se consignan en la tabla 8.

**Tabla 8.** Propiedades críticas de los componentes utilizados.

Componente	Presiones críticas (psi)	Temperaturas críticas (R)	Factor acéntrico (EOS)
C36	124.915149996087	1663.2	0.954
C20	207.946984993485	1422	0.69
C10	350.938091989006	1126.8	0.385
C1	667.78169597908	343.08	0.013
CO <sub>2</sub>	1071.33110996644	548.46	0.225
N <sub>2</sub>	492.312649984577	227.16	0.04
O <sub>2</sub>	730.999999977099	278.27	0.022

Fuente. SANTAFÉ, E., "In-Situ Combustion and Chemical Reactions with ECLIPSE", Schlumberger SIS Training Course, Houston 2011.

#### 2.1.4 Modelo de reacciones

El esquema de reacciones es quizás el modelo más importante en la simulación de estos procesos térmicos, la principal dificultad en la simulación numérica de los procesos de combustión in situ es hacer la representación de la zona de reacción, y la forma en la cual se basan el análisis de estos fenómenos es en el grupo de ecuaciones cinéticas. Se consideran tres tipos de reacción química que son generalmente oxidación de los componentes de aceite, generación de coque debido a las reacciones de craqueo del aceite y por última la combustión del coque (combustible sólido).

Como se mencionó previamente se decide tomar un modelo de reacciones más detallado que el usado con pseudoreacciones propuestas por Crookston, para

esto se procede a comparar el modelo reacciones usados en este proyecto y el usado en el trabajo de Crookston.

La estequiometría de la reacción que propone Crookston mejor detallada y discutida por Coast<sup>31</sup> está compuesta por cuatro reacciones, dos reacciones de oxidación de las fracciones pesadas y livianas, una reacción de pirólisis y una de combustión del coque como se muestra a continuación (ver tabla 9).

**Tabla 9.** Modelo de pseudo reacciones propuesto por Crookston.

<b>Heavy Oil + 18 O<sub>2</sub> → 12 CO<sub>2</sub> + 13 H<sub>2</sub>O</b>
<b>Light Oil + 5 O<sub>2</sub> → 3 CO<sub>2</sub> + 4 H<sub>2</sub>O</b>
<b>Heavy Oil → 2 Light Oil + 4.67 Coque + 1.33 CO<sub>2</sub></b>
<b>Coque + 1.25 O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + 0.5 H<sub>2</sub>O</b>

Fuente. COAST, K.H., "In Situ Combustión Model", SPE 8394.

Como las fracciones pesadas y livianas del crudo se subdividieron en componentes específicos previamente mencionados, se procede a la reestructuración de una nueva estequiometría guardando las consideraciones propuestas por Crookston, el nuevo crudo la fracción liviana corresponde a metano y decano (C1 y C10), la fracción pesada corresponde a hexatriacontano (C36), la fracción intermedia a eicosano (C20), es por esto la nueva distribución de coeficientes y componentes en la estequiometría de la reacción, la nueva reacción propuesta en el modelo a simular se registra en la tabla 10.

Como se puede apreciar la estructura de los dos modelos de reacción son similares sin embargo para el ingreso de datos al simulador ECLIPSE Thermal se decidió especificar mejor el modelo de reacciones donde se puntualizó de manera más clara la oxidación del C1, C10, C20, C36, luego la reacción de craqueo de aceite pesado para depositar el combustible sólido, y finalmente la reacción de

<sup>31</sup>Fuente.COAST, K.H., "In Situ Combustion Model", SPE 8394.

combustión del coque, es decir en este modelo se llevan a cabo 4 reacciones LTO, 1 reacción ITO y 1 reacción HTO.

**Tabla 10.** Modelo de reacciones con mayores especificaciones usado.

Reacción No.	Estequiometría
1	$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
2	$\text{C}_{10} + 15.5 \text{O}_2 \rightarrow 10 \text{CO}_2 + 11 \text{H}_2\text{O}$
3	$\text{C}_{20} + 30.5 \text{O}_2 \rightarrow 20 \text{CO}_2 + 21 \text{H}_2\text{O}$
4	$\text{C}_{36} + 54.5 \text{O}_2 \rightarrow 36 \text{CO}_2 + 37 \text{H}_2\text{O}$
5	$\text{C}_{36} \rightarrow 2 \text{C}_{10} + 13.85 \text{Coke} + 1.33 \text{CO}_2$
6	$\text{Coke} + 1.25 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 0.5 \text{H}_2\text{O}$

Fuente. SANTAFÉ, E., "In-Situ Combustion and Chemical Reactions with ECLIPSE", Schlumberger SIS Training Course, Houston 2011.

El coque puede generarse de peso molecular 12 o 13 lb/lb mol, como se seleccionó previamente formación de coque de 13 lb/lb mol, en la estequiometría de la reacción se producirán 13.85 moléculas de coque, de lo contrario (peso molecular de 12 lb/lb mol) formarían 15 moléculas de coque.

Entre los reactivos presentes en estas reacciones están el nitrógeno y el oxígeno en proporciones de 79% y 21 % respectivamente, debido al aire inyectado, el nitrógeno es importante en el transporte de calor downstream del frente de combustión porque este no reacciona (gas inerte), por eso no aparece en las reacciones químicas, por ende todo el que se inyecta sale por los pozos productores, los gases de combustión generados son óxidos de carbono denotados CO<sub>x</sub> y en estos se contemplan los dióxidos y monóxidos de carbono pero por efectos de simplicidad se asumen combustiones completas es decir solo producción de dióxido de carbono con agua en fase vapor.

### 2.1.5 Parámetros cinéticos

Ahora se procede a mencionar las energías de activación, entalpías y factores pre-exponenciales de las reacciones que se llevan a cabo, ya que estos parámetros al momento de la nueva distribución dimensional son de vital importancia para el ajuste y comparación de los modelos 1D y 2D, estos parámetros cinéticos son variados más adelante ya que ellos están asociados a cierta incertidumbre al momento de medición y obtención de datos en laboratorio que más adelante serán especificados de manera más detallada, esto con el objetivo de amarrar los resultados o variables de salida arrojados por las nuevas corridas de simulación.

**Tabla 11.** Parámetros cinéticos del modelo de reacciones.

Reacción	Factor pre-exponencial (Ar) $\times 10^{-12}$	Energía de activación (Ea) (Btu/lbm)	Entalpía de reacción (Hr) (Btu/lbm)
1	1.00	70206	382400
2	3.40	32785	5142400
3	0.28164	32785	4521600
4	0.4035	32785	2102400
5	2.70	59000	2.0E4
6	0.10	43900	0.0115E6

Fuente. SANTAFÉ, E., "In-Situ Combustion and Chemical Reactions with ECLIPSE", Schlumberger SIS Training Course, Houston 2011.

Según el manual de descripción técnica de ECLIPSE<sup>32</sup> en la representación de componentes para reacciones de combustión (capítulo 10), se extrajeron los parámetros cinéticos de registros ya tabulados para el modelo de reacciones previamente especificado, sin embargo, se encuentra de manera más detallada y completa todos los parámetros cinéticos tomados de tablas del curso de

<sup>32</sup> ECLIPSE Technical Description, chapter 10 of Chemical Reactions, Examples For Combustion, pag 165.

entrenamiento de Schlumberger cuya información necesaria se consigna de manera explícita en la tabla 11 debido a que este material es de uso confidencial.

### **2.1.6 Eventos de producción**

El cronograma de inyección-producción del campo está definido por la inyección de aire, durante un periodo de simulación de 15 años, la composición del aire 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>, el pozo inyector controlado por tasa de inyección equivalente a 60 Mscf/d y constante en todo el periodo de simulación, con una temperatura y presión de inyección de 200 °F y 1000 psi respectivamente, referente al pozo productor está controlado por presión de fondo fluyente (BHP) equivalente a 300 psia. El pozo inyector y productor ubicado a cada extremo del modelo en las celdas 1 y 10 respectivamente en la dirección X.

Para los modelos de CIS en este proyecto no se usaron calentadores en el pozo inyector ni gas de purga previo a la inyección convencional de aire, esto hace que la combustión se genere de manera más tardía y espontánea hasta alcanzar las condiciones térmicas para que ocurran las reacciones, por otro lado las condiciones operacionales y las composiciones del fluido de inyección se mantuvieron constantes.

## **2.2 VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO BASE**

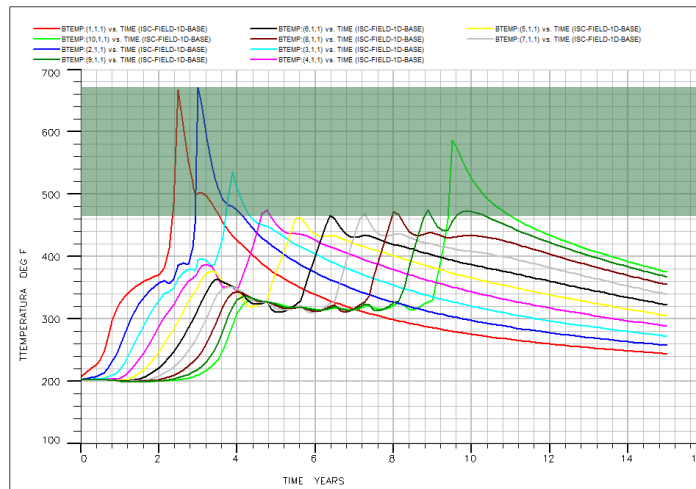
Entre las variables de salida más importantes en estos modelos térmicos corresponden a los perfiles de temperaturas registrados por los termopozos, ya que estos generan información valiosa al momento de monitorear donde está el frente de combustión que finalmente es donde se generan las reacciones a altas temperaturas (HTO), sin embargo hay otras variables de interés que son visualizadas debido a que fueron activadas por la herramienta software, como lo son tasas de consumo de cada reacción, composición de los gases de producción,

la eficiencia de recuperación de hidrocarburos o factor de recobro, saturación y viscosidad del aceite en el transcurso de la simulación.

### 2.2.1 Picos de temperatura

Se ubicaron termopozos a lo largo de todo el modelo en total 10, uno por cada bloque con el fin de registrar los perfiles de temperatura como se observa en la figura 12, estos picos o máximas temperaturas registran la reacción de combustión de coque, por ende, el avance del frente de combustión se aprecia como este oscila entre 462°F y 665°F, se puede observar como este modelo demora aproximadamente 9 años de inyección de aire para que la reacción se mantenga desde el pozo inyector hasta el pozo productor.

**Figura 12.** Perfiles de temperatura del modelo conceptual a escala de campo 1D.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

El primer termopozo ubicado en la primer celda y representado de color rojo indica que se genera la combustión pasados 2 años y 5 meses, con un registro de temperatura de 665°F, y se puede apreciar como paulatinamente va decreciendo la temperatura del frente de combustión, hasta que este llega al pozo productor pasados aproximadamente 9 años, se aprecia como la temperatura inicial del

modelo 200°F es la base térmica y las últimas celdas conservan esta temperatura hasta que el frente de combustión altera la temperatura del todo el sistema, inmediatamente se genera y se va acercando el frente de combustión a celdas adyacentes perturba drásticamente incrementando la temperatura de la celda.

Se aprecian perfiles de temperaturas más pronunciados en la primera y última celda, fuera del comportamiento general al cual tiende el modelo, esto se debe ya que cerca al pozo inyector siempre esta celda va a estar sometida a la inyección de un aire a alta presión, haciendo que este efecto tienda a mantener una temperatura superior al resto del modelo, este incremento de temperatura extra provoca una mayor depositación de combustible sólido, y cerca al pozo productor se debe a que los gases de combustión generados en las celdas donde ocurre previamente la ignición siempre tienden a migrar a la zona de menor presión, esto incrementa la temperatura, por ende también la depositación de coque, este último al combustionar tiende a tener una temperatura superior por el efecto de las celdas ubicadas previamente.

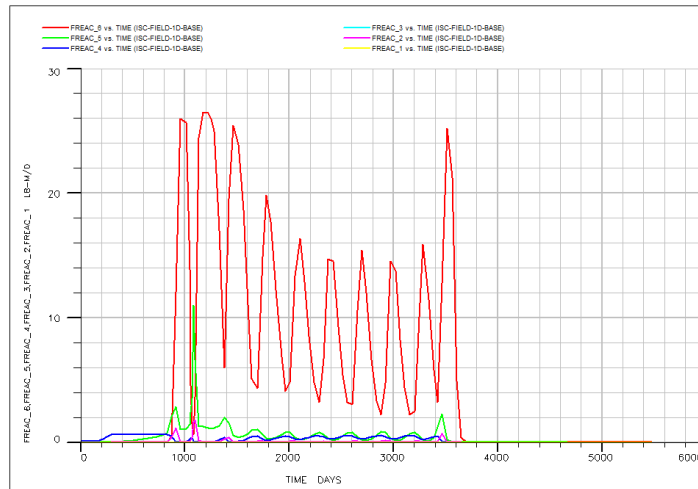
### **2.2.2 Tasas de reacción**

Apreciando la figura 13 se observa consumo en lb mol/día de cada reacción, y como prevalece la reacción HTO (combustión de coque) (línea roja) haciendo que esta predomine sobre las demás, esto indica el régimen de temperaturas por el cual el modelo tiene preferencia (HTO) bajo las condiciones previamente establecidas que permiten alcanzar las condiciones térmicas apropiadas, el alto consumo de esta reacción indica la eficiencia de combustión del coque el cual está reaccionando con altas tasas de oxígeno.

Un alto consumo en lb mol/día indica una fuerte perturbación cuando sean variados parámetros cinéticos de incertidumbre asociados a dichas reacciones, como energías de activación y factores pre exponenciales, esto es de ayuda para

más adelante hacer ajustes y tener que calibrar dichos parámetros cinéticos variando los de las reacciones 4, 5 y 6 que son las que tienen mayor influencia sobre las variables de salida del modelo.

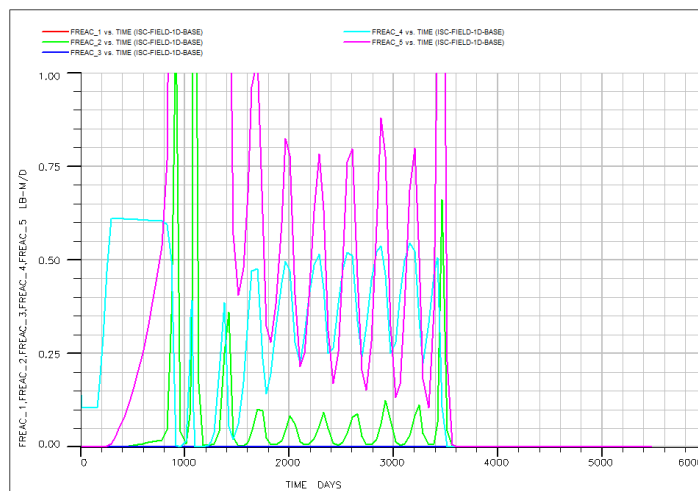
**Figura 13.** Tasa de consumo de la reacciones modelo 1D.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Como ya se mencionó la incidencia predominante de la reacción HTO respecto a las otras se suprime esta de la siguiente visualización.

**Figura 14.** Tasa de consumo de las reacciones del modelo 1D, sin tener en cuenta la reacción HTO.



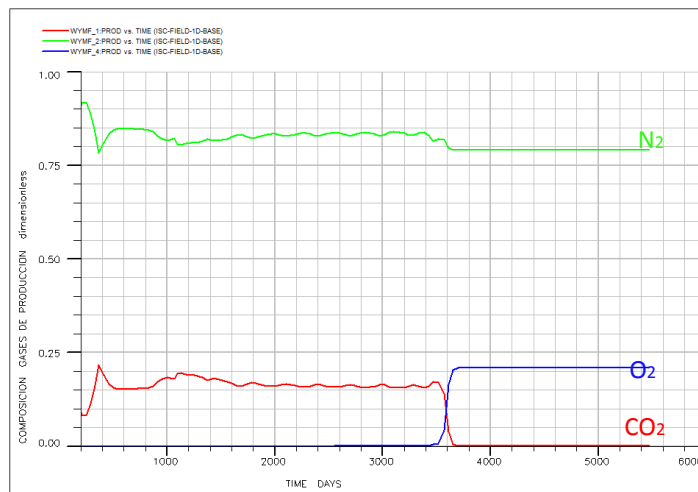
Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

En la figura 14 se aprecia el consumo de las reacciones 5 y 4 (oxidación de fracción pesada y craqueo respectivamente) sobre las demás, los parámetros cinéticos asociados a estas reacciones también inciden sobre los resultados de salida, pero no con tanta influencia como la reacción HTO.

### 2.2.3 Composición de gases de producción

La figura 15 muestra la composición de los gases de producción, dichos gases son el nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono representados con líneas verde, azul y roja respectivamente, como se mencionó previamente el aire de inyección tiene una composición de 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>, esta composición se corrobora luego del tiempo de ruptura del frente de combustión, indicando que no se lleva a cabo el modelo de reacciones también porque no hay producción de gases de combustión (CO<sub>2</sub>), por otra parte mientras el frente este desplazándose desde la primera hasta la última celda hay combustión esto se corrobora porque la producción de CO<sub>2</sub> esta únicamente presente en las reacciones de combustión previamente establecidas.

**Figura 15.** Composición de los gases de producción del modelo 1D.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

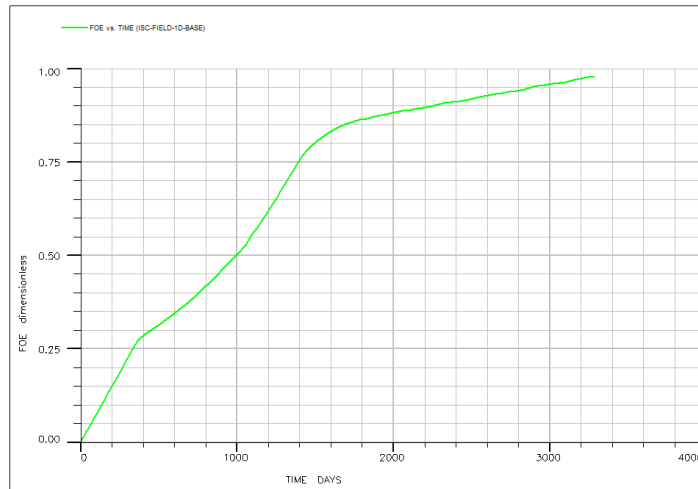
Acá se aprecia la eficiencia del proceso cuando todo el oxígeno inyectado es consumido y no se produce durante un periodo de 10 años, y todo el  $N_2$  que ingresa sale sin reaccionar, ligeramente se inestabiliza la producción de este por la producción de  $CO_2$  que es ligeramente alterada, sin embargo el comportamiento no varía drásticamente a lo largo de todo el modelo.

El cambio de composición de los gases de salida se da en la misma fecha en que el frente de combustión llega al pozo productor, esto indica que el gas de inyección con la composición original pasa sin ser alterado debido a que ya toda la zona de interés ha sido quemada este funciona como mecanismo de desplazamiento no como agente de reacción.

#### **2.2.4 Factor de recobro**

En cuanto a las eficiencias de recobro era de esperarse que en el modelo ideal a escala de campo 1D, se aprecie un FR equivalente al 98%, debido a que no se tienen en cuenta los efectos de barrido areal y vertical, únicamente de eficiencia de desplazamiento, y como se trabaja bajo principios de conservación de masa es evidente que a medida que el fluido inyectado va ingresando, desplaza todo el fluido in situ y cuando se genera la ignición, todo el aceite es quemado, y la eficiencia de desplazamiento es máxima, además no se trabaja con efectos gravitacionales, por ende no hay pérdida por segregación de fluidos, el frente se mantiene pasando de una celda a la adyacente desplazándose uniformemente, y cuando el frente de combustión alcanza el pozo productor cerca a los 9 años es de esperarse que se ha barrido casi la totalidad del fluido in situ como se muestra en la figura 16.

**Figura 16.** Eficiencia de recobro modelo 1D.



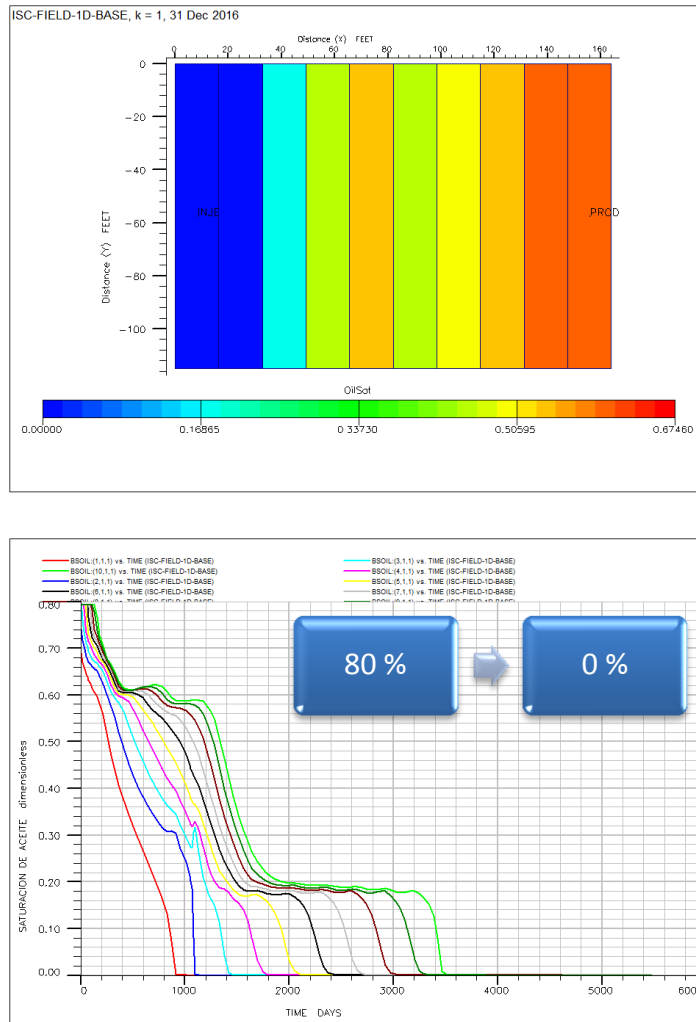
Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

El factor de recobro indica la efectividad del proceso, cuando este valor es el máximo no es representativo a escala de campo debido a que está asociado a un modelo conceptual unidimensional, donde el frente de combustión perfectamente es controlado con los perfiles de temperaturas registrados por los termopozos que solo se propagan en una dirección (eje cartesiano X), cuando se proceda a generar el modelo bidimensional será más complejo controlar el frente, por ende el riesgo del proceso aumentará y el factor de recobro decrecerá, dando resultados más reales debido a que estos modelos implican efectos gravitacionales también conocido como overriding.

### **2.2.5 Saturación de aceite**

Como se aprecia en la figura 17 la saturación de aceite es alterada por el frente de combustión considerablemente, se observa en la figura de la parte derecha como hasta antes de que se genere el frente de combustión la saturación del modelo en las primeras celdas se reduce paulatinamente, sin embargo, cuando se genera la ignición es perturbada su saturación reduciéndose drásticamente.

**Figura 17.** Vista areal y grafica de la saturación de aceite registrada por bloque modelo 1D.

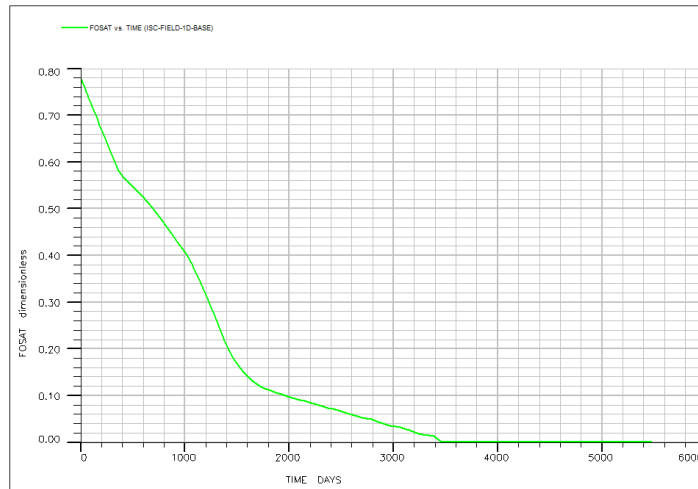


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Cuando el frente de combustión se genera en una celda automáticamente se puede observar como la saturación de la ubicación mencionada se reduce hasta un valor de cero, apreciando la eficiencia de la combustión en el modelo de reacciones propuesto y del barrido total, indicando que todo el aceite in situ es desplazado de manera eficiente hacia la zona de producción, perturbando bruscamente la saturación a las celdas inmediatamente siguientes, debido al aporte del frente de combustión. Observando la figura 18 se aprecia el comportamiento de la saturación de aceite a escala de campo, y es evidente la

eficiencia del proceso del modelo unidimensional debido a su paulatina reducción de saturación hasta llegar a ser nula cuando el frente de combustión llega a tiempo de ruptura.

**Figura 18.** Saturación de aceite en el campo 1D.

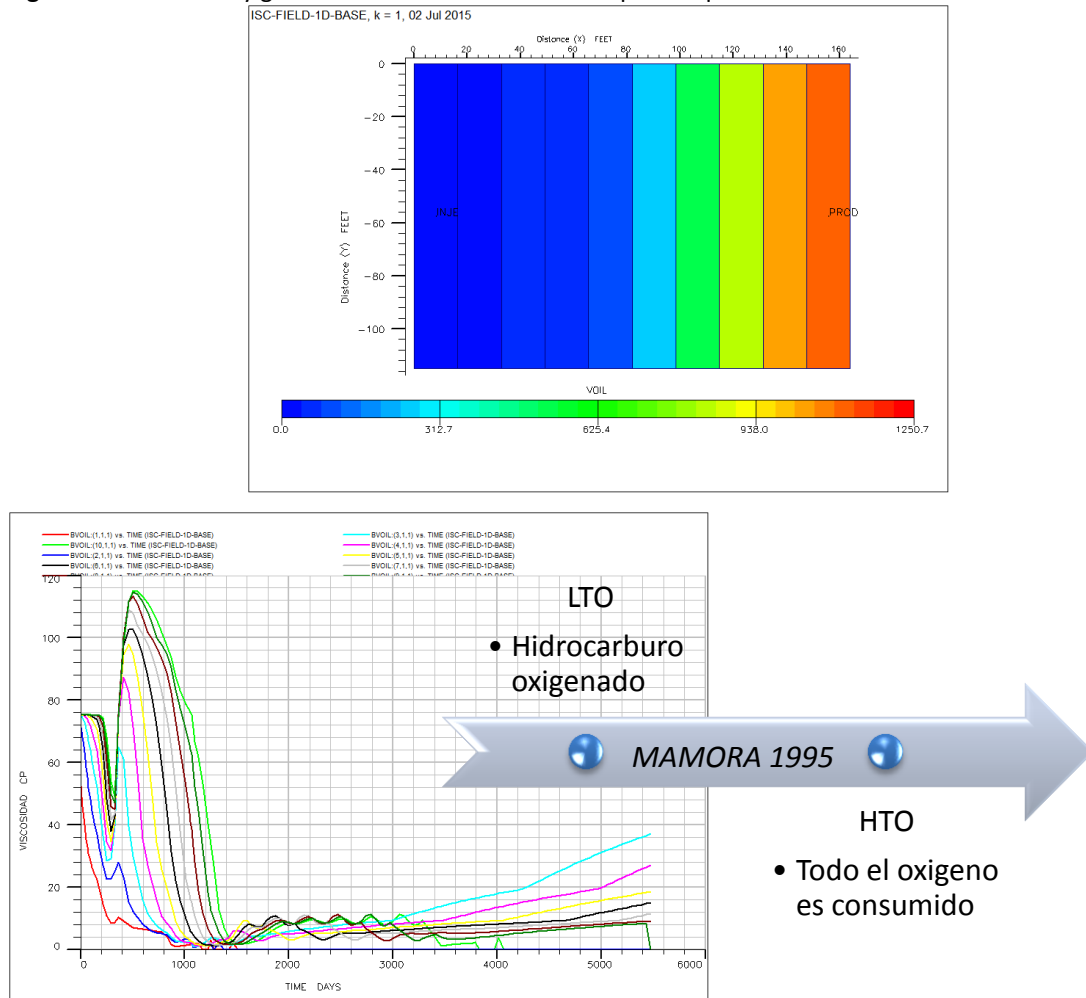


Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

### 2.2.6 Viscosidad del aceite

Visualizando el comportamiento de la viscosidad y registrado en la figura 19 es evidente el efecto del modelo de reacciones sobre este parámetro, debido al cambio de temperaturas al cual es sometido y como estas las cuales ya se mencionó incrementa muy rápido, la eficiencia del modelo térmico hace que la viscosidad reduzca rápidamente, sin embargo es de apreciar en la parte derecha de la figura, en la gráfica cuando se inicia la inyección de aire todo el modelo automáticamente comienza a reducir su viscosidad, sin embargo cuando se genera la ignición espontánea las viscosidades decrecen de forma más apresurada.

**Figura 19.** Vista areal y grafica de la viscosidad de aceite por bloque del modelo 1D.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Otro comportamiento que se puede apreciar de la figura 19 es que la viscosidad hace un cambio brusco al inicio de la inyección de aire, baja primero rápidamente pero luego se incrementa, para cuando se inicie la combustión espontánea se haga nuevamente la reducción de viscosidad como normalmente debe ser, este comportamiento anormal que se presenta inicialmente es debido a la compresibilidad de los fluidos y como estos al ser sometidos a una alta tasa y presión de inyección de aire cambia bruscamente la viscosidad del fluido hasta que el modelo alcanza la temperatura necesaria para dar paso al modelo de reacciones previamente diseñado y seguir con un comportamiento convencional de reducción de viscosidad.

Otra razón por la cual se presenta este comportamiento en la figura 19 (parte derecha) es porque durante las reacciones HTO prácticamente todo el oxígeno inyectado es consumido, mientras que, durante las reacciones LTO el oxígeno es desplazado a través del frente de combustión resultando en la formación de un combustible hidrocarburo oxigenado, este nuevo componente presenta una viscosidad superior a la del crudo inicial , en síntesis cuando el modelo es sometido a las reacciones LTO resulta en un incremento en viscosidad y gravedad específica del fluido in situ, mientras que, cuando el aceite es sometido a HTO la viscosidad y gravedad específica reducen significativamente<sup>33</sup>.

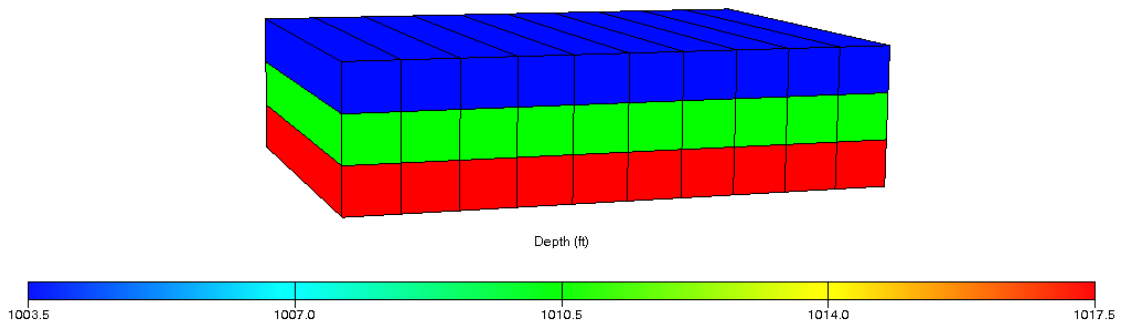
---

<sup>33</sup> MAMORA, D.D., " New Findings in Low-Temperature Oxidation of Crude Oil", Conference Paper, Texas A&M U., SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, 20-22 March 1995, Kuala Lumpur, Malaysia, 29324-MS.

### 3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL A ESCALA DE CAMPO 2D

Conservando la data original del modelo unidimensional, referente a las propiedades petrofísicas, modelo de fluidos, modelo de reacciones, parámetros cinéticos, eventos de producción, se procede a la construcción del modelo bidimensional a escala de campo, variando únicamente parámetros de distribución espacial, específicamente la discretización en la dimensión vertical, dividiendo el modelo en la dirección Z en tres capas, inicialmente homogéneo para luego visualizar los resultados y someter a cambios ciertos parámetros de incertidumbre que serán especificados más adelante, para generar el ajuste respecto al modelo base.

**Figura 20.** Modelo 2D a escala de campo con tres capas.



Fuente. Tomado de FloViz 2011.2.

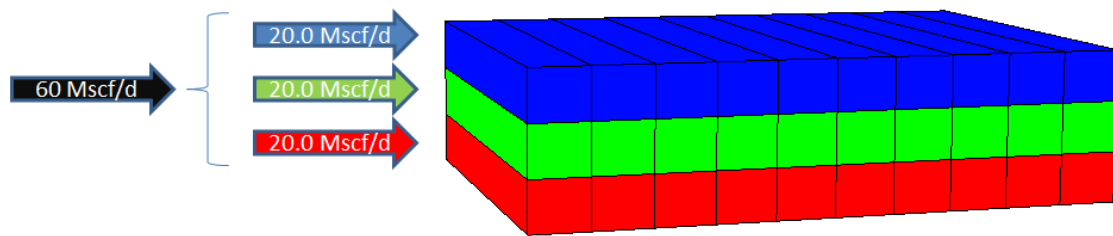
Como se puede visualizar en la figura 20 el modelo base se sometió a una discretización vertical, su longitud siendo de 21 ft, quedo distribuida en tres capas horizontales de 7 ft a lo largo de todo el modelo, la discretización en las direcciones X y Y no fueron alteradas respecto al caso base.

Referente a las especificaciones de completamiento de los pozos, por cada capa se va a inyectar y producir, por ende, para conservar las condiciones del fluido de

inyección se dejó la tasa de aire igual al del modelo base correspondiente a 60 Mscf/d.

Sin embargo como se requiere definir la tasa de inyección por cada capa debido a la estratificación, es necesario acudir a Marjerrison y Fassihi<sup>34</sup> los cuales proponen un procedimiento para escalar este tipo de escenarios en modelos de campo, ellos realizaron una serie de corridas donde se dieron cuenta de la relación que existe entre el flujo de aire inyectado y el espesor de la celda, encontrando una relación de distribución de aire de inyección por cada capa, de esta forma se procede a una inyección por cada capa de una tercera parte de la tasa inicial como se observa en la figura 21.

**Figura 21.** Distribución de tasas de inyección de aire por cada capa.



Fuente. Tomado y modificado de FloViz 2011.2.

Una vez definida la tasa de inyección de aire a una tasa de 20.0 Mscf/d por cada capa para que la suma de estas tres de como resultado una tasa igual a la inicial, en el documento “.data” no se requieren hacer cambios para las especificaciones de inyección por cada capa debido a que el simulador ECLIPSE Thermal por defecto toma la tasa de inyección y la distribuye en cantidades iguales para cada estrato como se observa en la figura 21, esto se cumple ya que se está trabajando con un modelo homogéneo.

<sup>34</sup> MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A Procedure For Scaling Heavy Oil combustion Tube Results To A Model Field, SPE/DOE 24175, pag 193.

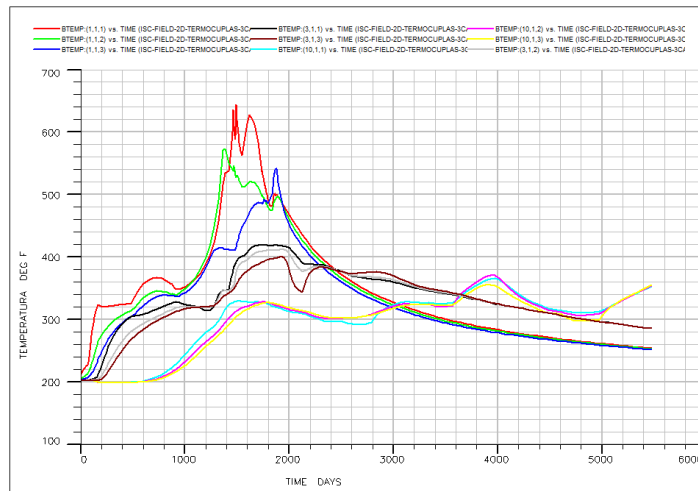
### 3.1 VARIABLES DE SALIDA

Una vez definido esto claramente se procede a la corrida y obtención de los resultados, por ser modelos térmicos las variables de salida que más interesan ajustar son los picos de temperaturas, para reproducir y asegurar el comportamiento de las reacciones se busca que el rango de temperaturas máximas alcanzadas sea entre 462° F y 665° F, es decir igual al rango obtenido con el modelo base unidimensional (ver figura 12).

- **Perfiles de temperaturas**

Para visualizar las temperaturas se ubicaron termopozos en todas las tres capas una por cada bloque, sin embargo por efectos de simplicidad se escogerán los pozos de registros y monitoreo térmico en un solo estrato para hacer el ajuste con el modelo unidimensional.

**Figura 22.** Perfiles de temperaturas en las tres capas en las celdas 1, 3 y 10 de la dirección X del modelo bidimensional.



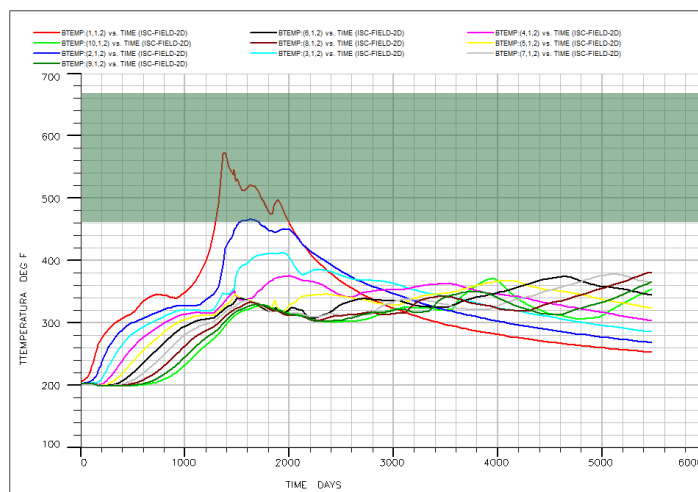
Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Analizando los termopozos ubicados en las tres capas de las celdas 1, 3 y 10 en la dirección X, distribuidos al inicio, final y parte intermedia del modelo se puede

observar en la figura 22 un comportamiento muy semejante con baja discrepancia entre los resultados debido a esto se procede a ubicar 10 termopozos en la mitad del modelo es decir en la capa 2, para monitorear el frente de combustión mediante los perfiles de temperaturas registrados.

La figura 23 muestra los picos de temperaturas y el rango de temperaturas máximas alcanzadas en el modelo bidimensional bajo las condiciones estáticas, cinéticas y de operación previamente mencionadas, cabe mencionar que para la construcción del modelo bidimensional hasta este momento se han hecho el menor número de cambios en el input data, solo las nuevas distribuciones espaciales en la dimensión vertical.

**Figura 23.** Picos de temperatura modelo 2D con tasa de inyección de aire inicial.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Acá se puede apreciar una temperatura máxima de 578 °F registrada por el primer termopozo ubicado en la celda (1,1,2) donde se da inicio a la ignición del campo, y se reducen bruscamente los perfiles de temperaturas hasta que se extingue la llama del frente de combustión, esto es evidente porque no se marcan de manera clara los picos de temperatura (ver figura 23).

Esta extinción del frente de combustión es ocasionada por una baja tasa de inyección de agente oxidante por cada capa, impidiendo la propagación del mismo a través de todo el modelo de simulación, esta baja tasa de inyección no suministra las condiciones necesarias para llevar los fluidos a cierta temperatura donde combustionen.

Para este caso la tasa inicial 60 Mscf/día hace que el rango de temperaturas este por debajo del arrojado por el modelo base (franja verde), además reduce la velocidad del frente de combustión debido a que se prolongan los picos de temperaturas por todo el tiempo de simulación, y en los bloques no se alcanza a apreciar la combustión, esto se debe a la baja tasa de inyección de aire, la cual mantiene una velocidad del frente de combustión baja y temperaturas por debajo de lo que se requiere, el primer ajuste será incrementar la tasa de inyección de aire para poder estabilizar el frente y además para que combustione toda la zona en el tiempo máximo de simulación correspondiente a 15 años.

Por otro lado los resultados de laboratorio concernientes a los parámetros cinéticos, no son representativos para un modelo real a escala de campo debido a que las pruebas son llevadas a cabo en muestras a pequeña escala, por ende, en estos resultados también se pueden generar incertidumbre ocasionando que se inestabilice el frente de combustión y llevándolo a su extinción, por esto es necesario hacer análisis de sensibilidad a dichos parámetros para que estos ayuden con el segundo ajuste para que el modelo logre el amarre con el caso base.

### **3.2 VARIACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL AJUSTE**

En vista a la nueva distribución de bloques en el yacimiento para la construcción del modelo bidimensional, se procede a ajustar parámetros operativos específicamente la tasa de inyección de aire, en segunda instancia tener en

cuenta la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos de laboratorio respecto a los parámetros cinéticos los cuales serán sometidos a cambios, para reproducir condiciones óptimas que lleven a cabo el modelo de reacciones, creando una configuración apropiada que genere el ajuste con el modelo unidimensional previamente diseñado.

### **3.2.1 Análisis de sensibilidad a la tasa de inyección**

En la figura 24 se encuentran los resultados de los picos máximos de temperaturas registrados por cada termopozo a través del tiempo con variación en la tasa de inyección tomando valores por debajo y por encima a la inicial correspondientes a 30, 85, 150 y 200 Mscf/día, también se puede apreciar el rango de temperaturas referentes a los picos máximos arrojados por el modelo base resaltados por la franja verde delimitados de 462° F a 665° F.

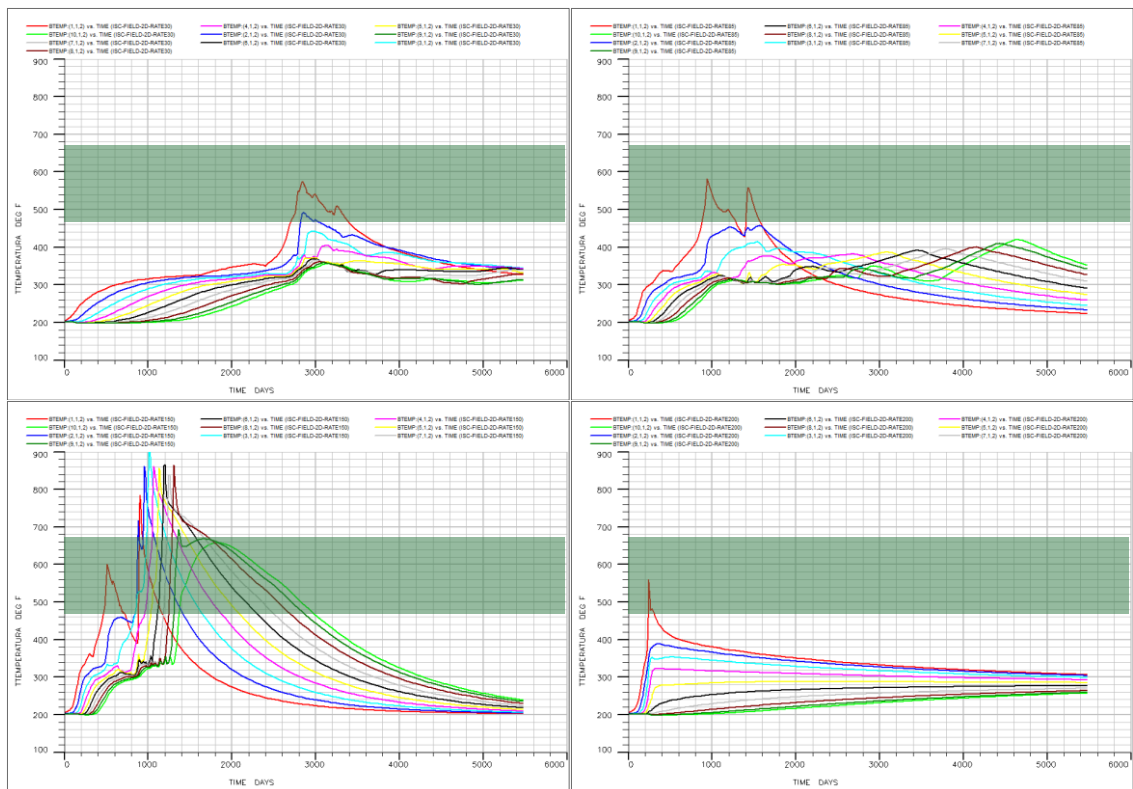
Se visualiza como a tasas bajas de 30 Mscf/d la ignición espontánea es más tardía, además de esto se aprecian picos de temperatura desde el primer hasta el cuarto termopozo, con las demás ya no ocurre lo mismo lo que indica que se requiere un mayor suministro de aire para mantener una cantidad de oxígeno presente en la combustión.

A medida que va incrementando la tasa de inyección de aire también se puede apreciar el aumento progresivo de la velocidad del frente de combustión, pero un frente demasiado rápido también es muy inestable como se puede apreciar a 200 Mscf/día provocando la extinción del mismo por exceso de agente oxidante y el modelo de reacciones HTO que son de interés para la recuperación de hidrocarburos no son llevadas a cabo.

Con tasas relativamente altas a 150 Mscf/día se aprecia como una rápida ignición es generada, como también un incremento de la velocidad del frente de combustión, esto trae consigo consecuencias desfavorables ya que no es

controlado en su totalidad, también presenta caídas de eficiencia en la recuperación ya que la rápida combustión podría dejar crudo sin quemar, dejando aceite remante en la zona quemada, esto se presentaría porque un frente a alta velocidad crea zonas preferentes de desplazamiento generando canales que le permitan que llegue más rápido de lo normal al pozo productor, otra consecuencia obtenida por el rápido desplazamiento del frente es que el modelo de reacciones se lleva a cabo en un tiempo muy corto y como no se consideran pérdidas de energía en el modelo esto se manifiesta en la obtención de picos de temperatura más elevados a los arrojados previamente.

**Figura 24.** Picos de temperaturas con tasas de 30, 85, 150 y 200 Mscf/día.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

A tasas ligeramente superiores al modelo base correspondientes a 85 Mscf/d se logró prolongar el frente de combustión a través de todo el modelo en la dirección de desplazamiento, además de esto se logró pronunciar los picos de temperaturas

haciendo que se encuentren más cerca al rango de temperaturas arrojado por el modelo base.

Para este caso de la variación de la tasa de inyección la condición que más se acerca al rango planteado por el modelo base es una tasa de 85 Mscf/día, ya que esta está en función de incrementar la eficiencia de barrido vertical y la estabilidad del frente controlando su velocidad sin que genere abruptamente problemas de canalización, además permite apreciar los picos de temperaturas dentro del periodo de simulación propuesto, sin embargo con el cambio de este parámetro operacional no es suficiente, como se visualiza en la figura 24 los resultados están fuera del rango de temperaturas (franja verde) que corresponde al modelo base, por ende se procede a la variación de parámetros cinéticos combinados con esta tasa la cual fue la que mejores resultados arrojó en la corrida de simulación.

### **3.2.2 Análisis de sensibilidad a parámetros cinéticos**

Con el primer ajuste hecho por tasa de inyección, se logra ver como los picos de temperatura no ingresan en el rango establecido por el caso base, por esta razón se procede a observar cómo afectan los parámetros cinéticos, debido a que estos son tomados de muestras representativas en laboratorios y están asociados a cierta incertidumbre al ser aplicados en campo y la variación de estos es sensible a la propagación y estabilidad del frente de combustión.

Entre los parámetros cinéticos sometidos a variación se tienen energías de activación y factores pre-exponenciales para cada reacción, tomando valores por encima y debajo del modelo base para determinar la sensibilidad que estos generan en el yacimiento, los valores de los parámetros se presentan en la tabla 12, las entalpías de cada reacción también son un parámetro cinético pero no son sometidas a variación porque estas vienen con un alto grado de certeza de laboratorios.

**Tabla 12.** Valores de los parámetros cinéticos para el ajuste.

PARÁMETRO	VALOR BASE	VALOR 1	VALOR 2
Ea5 (Btu/lbm)	59000	55800	69000
Ea6 (Btu/lbm)	43900	23900	53000
Ar4	$0.4035 \times 10^{12}$	$0.4035 \times 10^7$	$0.4035 \times 10^{16}$
Ar5	$2.7 \times 10^{12}$	$2.7 \times 10^7$	$2.7 \times 10^{16}$
Ar6	$1.0 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^{13}$

Fuente. El autor.

Se hace la variación de los parámetros cinéticos de las reacciones ITO-HTO ya que como se explicó anteriormente estas reacciones son predominantes en el modelo térmico, por el alto consumo de las mismas respecto a las LTO.

La elección de estos parámetros cinéticos es porque son determinados experimentalmente, la incertidumbre se debe a que representan medidas macroscópicas específicas de la reacción que no están relacionados de manera simple a las energías umbrales y al éxito de las colisiones individuales a nivel molecular. Estos dos parámetros (Ea y Ar) se relacionan en gran manera debido a que la colisión molecular en una orientación correcta liberara cierta energía mínima, esto finalmente se cuantifica con el factor pre exponencial y la energía de activación respectivamente.

Existe una enorme incertidumbre en la teoría del estado de transición debido a que está basada en suposiciones las cuales según Eyring<sup>35</sup> cree que el núcleo atómico se comporta de acuerdo a la mecánica clásica, la cual plantea que los átomos o las moléculas tienen que colisionar con suficiente energía para formar la estructura de transición de lo contrario la reacción no ocurrirá. Sin embargo de acuerdo a la mecánica cuántica, para cualquier barrera de energía de valor finito hay una posibilidad de que las partículas puedan escapar a través de la barrera

---

<sup>35</sup> Eyring, H.; Journal of Chemical Physics, 1935, 3, 107-115

según lo explica Masel<sup>36</sup>, él plantea que existe una oportunidad de que las moléculas reaccionen incluso si no colisionan con suficiente energía para atravesar la barrera de energía.

Este efecto es insignificante para reacciones con energías de activación grandes, pero llega a prestar importancia para reacciones con energías de activación bajas, ya que la probabilidad de que las moléculas reaccionen sin que tengan la mínima energía se puede presentar.

El cálculo experimental de los factores pre exponenciales y las energías de activación presenta mayor incertidumbre cuando se trabajan a altas temperaturas debido a que las moléculas se distribuyen en modos de mayor energía vibracional, su movimiento se hace más complejo y las colisiones son un efecto aleatorio y todo esto se cuantifica en un solo valor, esto debería ser para cada molécula, lo cual es imposible.

Al hacer las corridas con las energías de activación y factores preexponenciales de todas las reacciones, luego observándolos en el visualizador de resultados en el módulo de Office de ECLIPSE se encontró que el modelo es insensible a estos parámetros de las reacciones LTO, como era de esperarse por razones que se mencionaron anteriormente.

Por otra parte con los valores propuestos en la tabla 12 es necesario nombrar que si fue apreciable los cambios en las variables de salida, pero que la variación de forma independiente no fue suficiente, por ende se combinaron estos parámetros y se escogió el caso que mejor ajuste con los resultados que se obtuvieron del modelo base.

Luego de hacer todas las posibles combinaciones de estos parámetros cinéticos se obtuvo que la mejor configuración del modelo ajustado cuando las energías de activación y factores pre exponenciales de la reacción ITO y HTO quedan por

---

<sup>36</sup> Masel, R. Principles of Adsorption and Reactions on Solid Surfaces; Wiley, New York, 1996

debajo del modelo base, y el factor pre exponencial de la reacción cuatro estabiliza el frente cuando quedando por encima del valor base, los resultados que arrojan el modelo ajustado se consignan en la tabla 13.

**Tabla 13.** Mejor configuración de parámetros cinéticos para el ajuste del modelo 2D.

PARÁMETRO	VALOR
Ea5 (Btu/lbm)	55800
Ea6 (Btu/lbm)	23900
Ar4	$0.4035 \times 10^{16}$
Ar5	$2.7 \times 10^7$
Ar6	$1.0 \times 10^8$

Fuente. El autor.

Con la variación de solo uno de estos parámetros se lograba alterar las variables de salida, pero no se lograba estabilizar el frente para propagarlo por todo el modelo en el periodo de simulación, es por eso la necesidad de combinarlos.

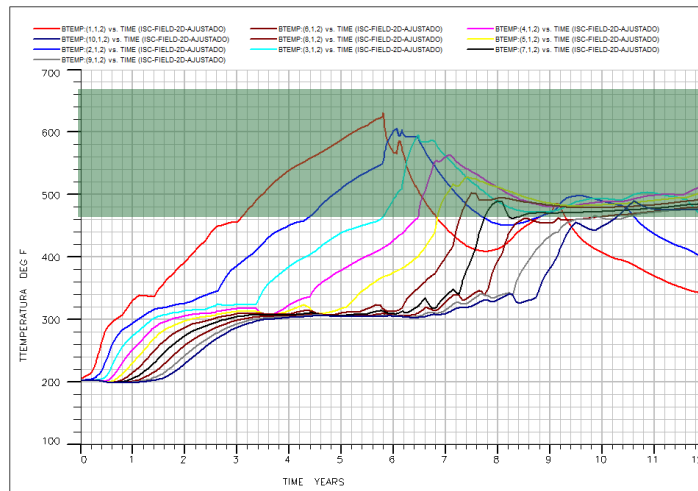
### 3.3 VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO 2D AJUSTADO

Una vez ajustado el modelo cambiando el menor número de parámetros, como lo fue la tasa de inyección a 85 Mscf/d de aire, reducción de las energías de activación y factores preexponenciales de las reacciones ITO y HTO, permite tener resultados de picos de temperaturas dentro del rango planteado por el caso base como se muestra en la figura 25.

Acá vemos como el frente de combustión se desplaza con un tiempo prolongado aproximadamente de 10 años y 6 meses desde el inicio de la inyección de aire hasta la irrupción en el pozo productor, también se puede apreciar una ignición espontanea más tardía respecto al modelo base generando el frente de combustión en la primer celda cerca a los 6 años, el periodo de combustión del campo fue de 4 años y medio aproximadamente, se aprecia la paulatina reducción

de los picos de temperatura comportamiento similar al del caso base, el registro máximo de temperatura lo realiza el primer termopozo ubicado en la posición (1,1,2) igual a 625° F, y la menor temperatura registrada la logra el termopozo 8 ubicado en la posición (8,1,2) con un valor de 462° F (ver figura 25).

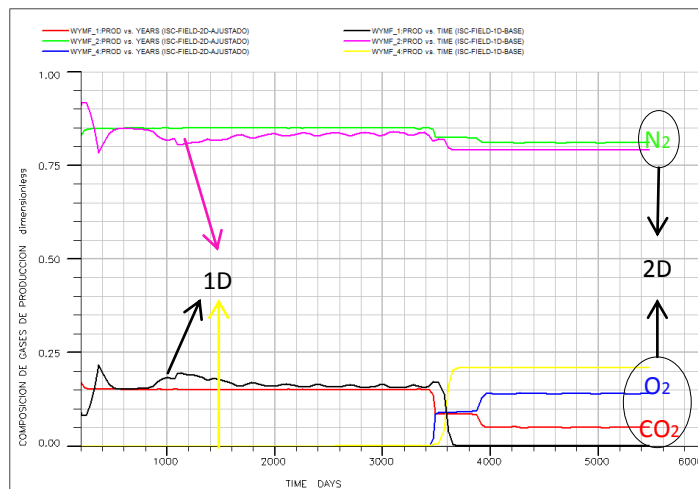
**Figura 25.** Perfiles de temperaturas modelo bidimensional a escala de campo ajustado.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Por otro lado se procede a analizar los resultados obtenidos respecto a las composiciones de los gases de salida.

**Figura 26.** Comparación de los gases de combustión de los modelos 1D y 2D ajustado.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

La figura 26 compara los resultados del modelo unidimensional y el bidimensional, las líneas verde y rosada corresponden a la producción de  $N_2$ , las líneas roja y negra hace referencia a la producción de  $CO_2$  y las líneas amarilla y azul representan la producción de  $O_2$ , como se observa los comportamientos de los mismos componentes en los dos modelos presentan la misma tendencia, sin embargo cabe mencionar que los del modelo 2D son más estables.

Luego de tiempo de ruptura se registra una caída en la eficiencia de combustión, porque no reacciona todo el oxígeno inyectado, mostrando una composición de 14 % en los gases de salida, como también se aprecia una composición de 5% de  $CO_2$ , esto se debe a que el yacimiento se encuentra lo suficientemente calentado con aceite remanente en ciertas zonas donde el frente no llego con total eficiencia haciendo que esto sea lo que ligeramente este reaccionando, lo normal sería que luego de tiempo de ruptura toda reacción de combustión se extinga, mostrando en la composición de gases de salida la composición original del aire (21%  $O_2$  y 79%  $N_2$ ) y 0% de  $CO_2$ .

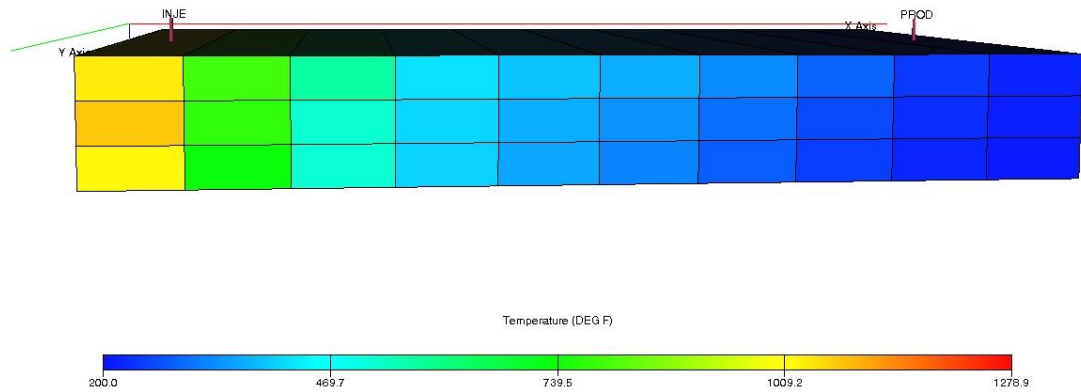
- **Efectos gravitacionales (overriding)**

En los modelos bidimensionales el objetivo es evaluar la eficiencia vertical la cual está influenciada por efectos inherentes del fluido denotados como segregación gravitacional, donde la distribución de estos en el yacimiento se da por la diferencias de densidades y como el aire el cual es menos denso tiende a generar canales preferenciales de flujo e irse por la parte superior del modelo (ver figura 27).

No se logra visualizar de manera bien definida pero si se puede apreciar una idea de que el frente de combustión en la capa superior va a irrumpir de manera más rápida que las otras capas, se puede apreciar mejor este efecto si se discretizara

la dimensión de profundidad en más de 3 capas, como también si se tuviera un modelo con mayor espesor.

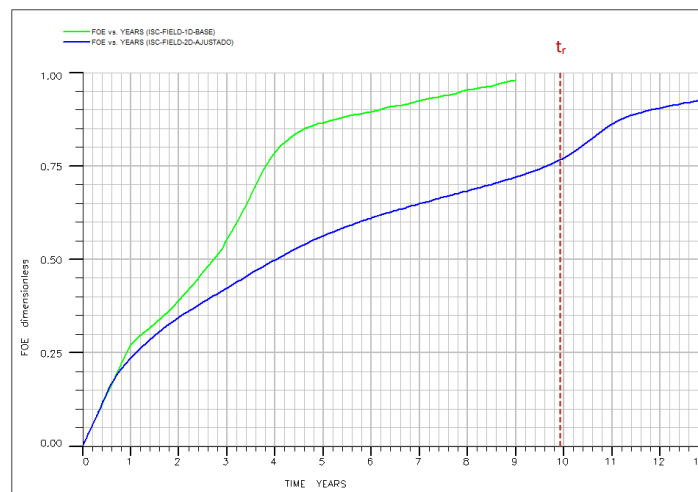
**Figura 27.** Perfil de temperaturas modelo bidimensional ajustado.



Fuente. Tomado de FloViz 2011.2.

Una forma de apreciar el Overriding es con la eficiencia de recobro donde se visualiza en la figura 28 como decae comparado con el modelo conceptual unidimensional, sin embargo este modelo alcanza una alta recuperación de hidrocarburos logrando una eficiencia del 80% a los 10 años y seis meses, periodo en el cual el frente de combustión irrumpe el pozo productor.

**Figura 28.** Comparación de eficiencia de recobro modelo 1D y 2D ajustado.



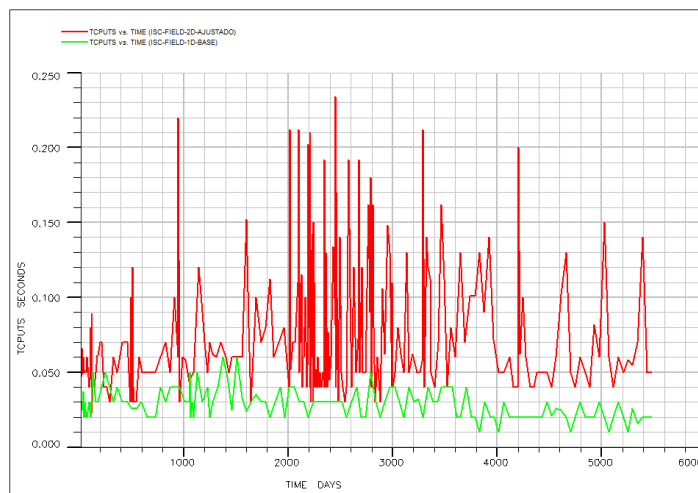
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Como era de esperarse el factor de recobro es afectado directamente debido a los efectos de segregación gravitacional, sin embargo esta reducción en la eficiencia de recobro es muy poca debido a que la discretización fue en muy pocas capas, si se discretizara un modelo con mayor espesor los efectos de overriding serían más pronunciados.

Como se había mencionado al inicio de la visualización de los resultados del modelo 1D, el modelo 2D se comporta de manera más real reduciendo su factor de recobro a un valor más razonable alcanzado por los procesos de combustión in situ, presentando una tendencia no tan pronunciada a valores altos, como ocurrió en el modelo unidimensional.

En la figura 29 se pueden comparar los tiempos de computo empleados por el caso base (modelo 1D línea verde) y caso ajustado (modelo 2D línea roja).

**Figura 29.** Comparación tiempos de computo modelos 1D y 2D ajustado.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Acá se pueden apreciar el esfuerzo computacional en términos de tiempo son más elevados en el modelo 2D como era de esperarse, debido al mayor número de cálculos que se realizan porque hay un mayor número de bloques, también se puede apreciar que las zonas más densas en datos son las que requieren mayor

tiempo de cómputo y estas corresponden a un rango que coincide con los tiempos delimitados desde el inicio de la ignición del frente en la primer celda hasta el tiempo de ruptura, es decir donde se ejecutan las reacciones HTO se incrementa el esfuerzo computacional.

#### **4. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD A PARÁMETROS QUE AFECTAN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU**

Este proyecto se realizó con el objetivo de mostrar primeramente cuales parámetros son más importantes, el término “importante” hace referencia a tener una influencia significativa en las características de desempeño del proceso de combustión in situ. En segunda instancia para probar la complejidad de los escenarios planteados al cambiar parámetros de entrada, con la finalidad de llegar a modelos más complejos que es lo que se esperaría en realidad, este estudio es necesario para identificar parámetros que perturben o en su defecto pueden sean insensibles al proceso CIS como tal.

Las variables de entrada que serán sometidas a sensibilidad corresponden a parámetros del yacimiento estáticos, hidrodinámicos, operativos, térmicos y cinéticos se analizara la influencia de estos sobre el desempeño del proceso CIS estudiando variables de salida como factores de recobro, perfiles de temperatura y composición de gases de producción.

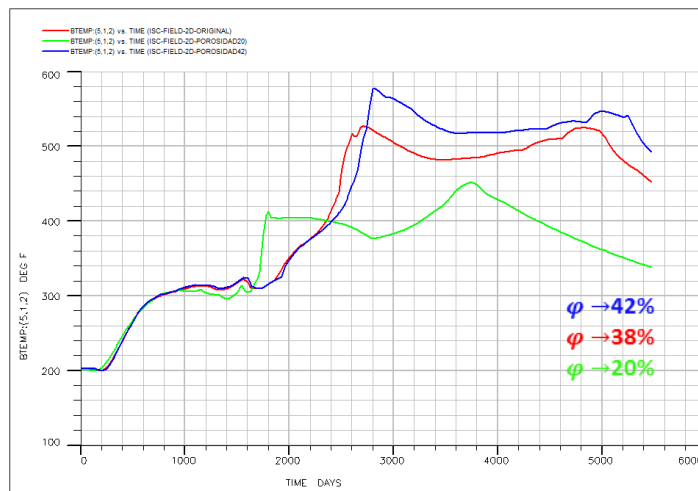
##### **4.1 PARÁMETROS DE YACIMIENTO**

Acá se evaluarán el desempeño del proceso CIS cuando el modelo es sometido a variación de parámetros de yacimientos divididos en dos grupos, el primero parámetros estáticos como la porosidad y buzamiento, y el segundo parámetros hidrodinámicos como permeabilidades y viscosidad del fluido in situ observando la influencia de manera independiente a las fracciones pesadas y livianas.

### 4.1.1 Efecto de la porosidad

La porosidad es la capacidad de almacenamiento de la formación, por ende es directamente proporcional a la cantidad de aceite, finalmente esto representa mayor cantidad de combustible disponible para el proceso. Los picos de temperatura fueron analizados respecto al termopozo 5 en función de generar una clara visualización, como se muestra en la figura 30 la porosidad es proporcional a la temperatura máxima alcanzada e inversamente proporcional a la velocidad del frente de combustión.

**Figura 30.** Efecto de la porosidad sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



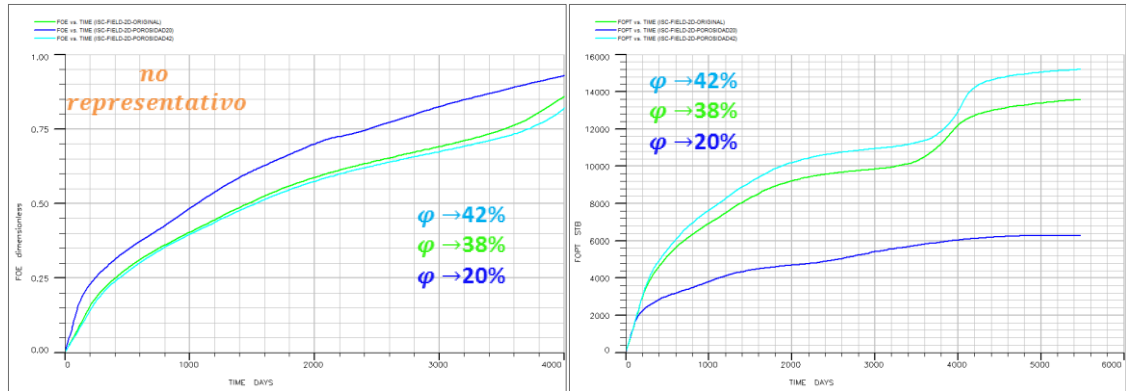
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Debido que la temperatura alcanzada en estos procesos térmicos es directamente influenciada por la cantidad de combustible disponible, en otras palabras al tener mayor porosidades se tendrán mayores cantidades de coque depositado, por ende el modelo estará sometido a un tiempo extra de reacciones HTO, haciendo que el frente se desplace de manera lenta porque requiere de mayor tiempo para consumir más cantidad de aceite y la temperatura también incrementa.

La eficiencia de recobro (figura 31 parte izquierda) muestra ser inversamente proporcional a la variación de la porosidad, con bajas porosidades el modelo

recupera de manera más eficiente los hidrocarburos presentes en la formación y viceversa, sin embargo al tener menos porosidad también se tienen menos aceite in situ y el petróleo acumulado será menor que el de porosidades mayores como se aprecia en la figura 31 parte derecha.

**Figura 31.** Efecto de la porosidad sobre el factor de recobro y producción acumulada de aceite.

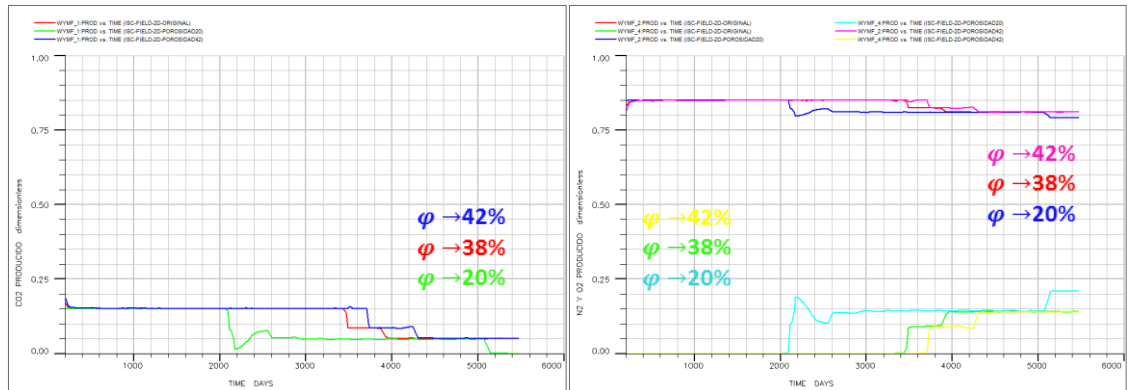


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Analizando los gases de combustión se encontró que el  $\text{CO}_2$  producido es de igual valor para todos los casos pero se diferencia el tiempo de producción, cuanto menor sea la porosidad el tiempo de producción de  $\text{CO}_2$  es menor y viceversa, esto se debe a que el poco fluido que hay in situ reacciona en menor tiempo y se extinguen las reacciones de combustión, agotando la producción de  $\text{CO}_2$  (figura 32 parte izquierda).

La figura 32 de la parte derecha hace referencia a la composición del  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  producidos y de igual forma que en el  $\text{CO}_2$  se puede apreciar como están relacionados en cuanto a tiempo de producción, no perturbando significativamente la composición como tal de gas, a medida que la porosidad es mayor el tiempo de producción del gas de combustión y de la irrupción del frente en el pozo productor también es mayor, esto va influenciado con lo que se mencionó previamente acerca de la velocidad del frente.

**Figura 32.** Efecto de la porosidad sobre la composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

#### 4.1.2 Efecto del buzamiento

La configuración estructural respecto al buzamiento es importante para un proyecto CIS, según el grado de inclinación, la posición de los pozos uno respecto a otro, como también el efecto gravitacional al que están sometidos los fluidos podría ser a favorable o no para el proceso en general. Con estas consideraciones el frente de combustión podría ser más estable, el campo Midway-Sunset<sup>37</sup> es un ejemplo claro donde los efectos gravitacionales debido al buzamiento de la formación fueron un factor importante para el éxito técnico-económico del proyecto.

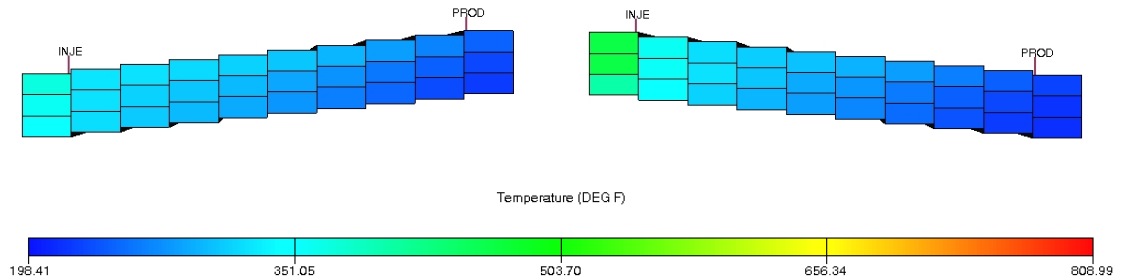
El objetivo de evaluar este parámetro es mirar la influencia que formaciones con buzamientos que es lo que frecuentemente se encuentra en la realidad, bien sean anticlinales o sinclinales.

Analizando los resultados del efecto que generaría el buzamiento se somete el modelo a una variación en su inclinación estructural, distribuyendo nuevamente los bloques de tal forma que se encuentren los estratos a +5° y -5° respecto a la

<sup>37</sup> CURTIS, J.H. 1989, "Performance Evaluation of the MOCO T In-Situ combustion Project, Midway-Sunset Field", Paper of Society of Petroleum Engineers, 18809-MS.

horizontal, esto se puede apreciar en la figura 33 obtenida por el visualizador 3D de Office-ECLIPSE.

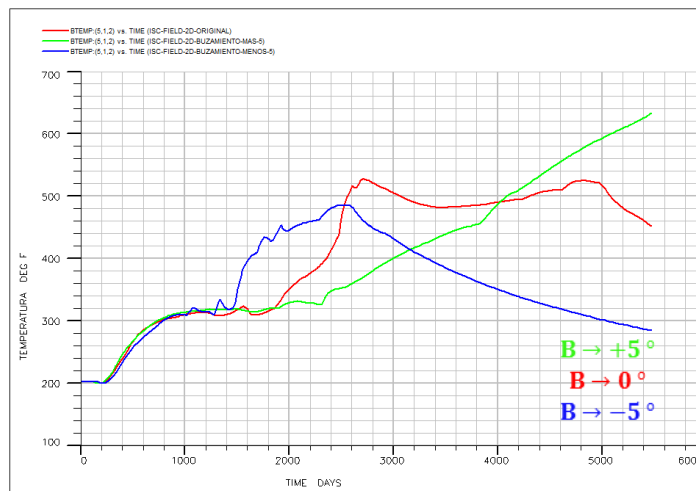
**Figura 33.** Modelo 2D con inclinación +5° y -5° respecto a la horizontal.



Fuente. Tomado y modificado de FloViz 2011.2.

Con esta configuración se puede evidenciar como el frente de combustión es más rápido cuando el buzamiento es negativo, es decir cuando el pozo productor se ubica en una posición más profunda que el inyector, se puede apreciar en la figura 34 como es de influyente el buzamiento sobre los picos de temperatura, no solo al incrementar el buzamiento retarda la velocidad del frente sino incrementa la temperatura del modelo.

**Figura 34.** Efecto del buzamiento sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.

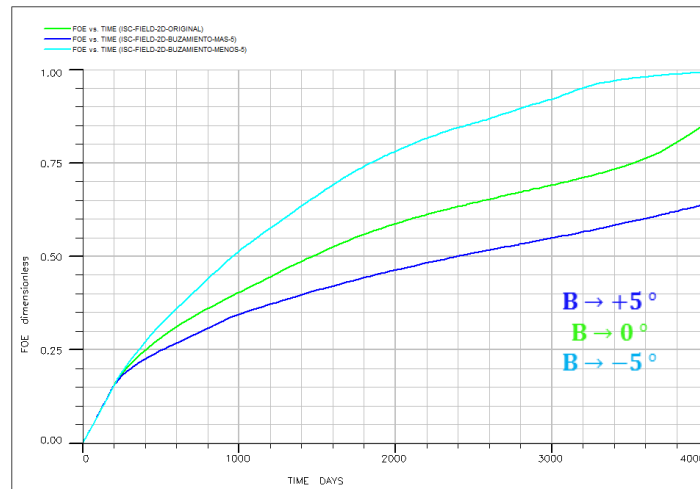


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento térmico cuando el buzamiento es positivo se debe a que el aire de inyección se canaliza por la primer capa, pero la inclinación trae consigo efectos desfavorables ya que los fluidos de interés tienden a segregarse hacia las zonas más profundas que en este caso se encontraría el pozo inyector, por esta razón el efecto segregacional iría en dirección contraria al frente de combustión que se desea generar, sin embargo analizando los picos de temperatura de este modelo no impide que se extinga el frente, simplemente retarda la velocidad de propagación por obstrucción gravitacional.

Cuando el buzamiento es negativo, los efectos de desplazamiento del frente de combustión y de segregación gravitacional tienden a sumarse a favor del proceso, permitiendo tener un frente más rápido y estable, reduciendo los efectos de canalización.

**Figura 35.** Efecto del buzamiento sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

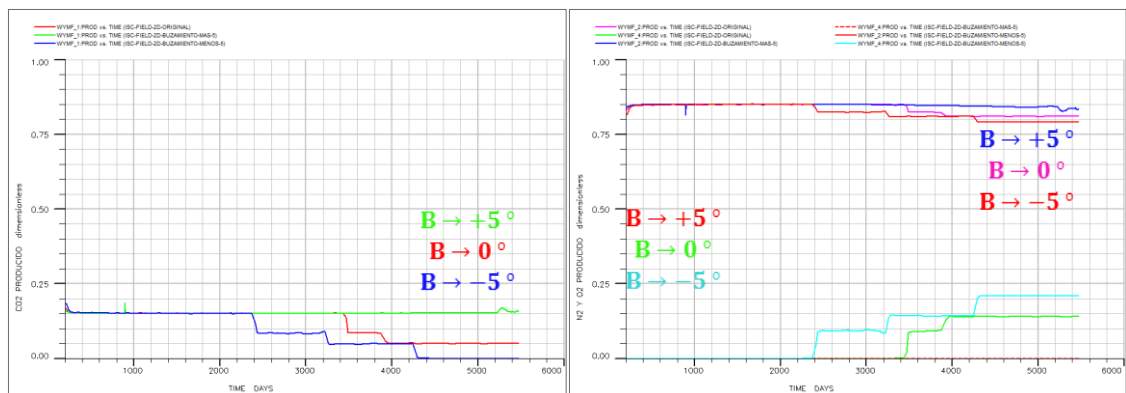
En el factor de recobro se puede apreciar la eficiencia de recuperación de cada escenario, se puede ver de forma clara para corroborar lo anteriormente mencionado como un buzamiento negativo tiende a una mejor recuperación de hidrocarburos y viceversa, cabe notar que escenarios como los que se proponen

en este proyecto tienen un grado de inclinación muy bajo pero que el efecto sobre la recuperación de crudo es fuertemente influyente (ver figura 35).

Como se aprecia el factor de recobro de 99% con una inclinación de  $-5^\circ$ , es un valor ilógico en la realidad ya que no se podría tener un proceso con tal eficiencia de recuperación, sin embargo este valor es dado como resultado de la simulación debido a que toda la configuración del modelo se presta a favor de la eficiencia del proceso, incluyendo altas tasas de inyección, altas permeabilidades y altas porosidades (ver figura 35).

Por otra parte analizando los gases de combustión (figura 36) es evidente como se ejecuta el modelo de reacciones propuesto, llevándose a cabo las reacciones de combustión de coque, y como el frente tiene un tiempo de ruptura más prorrogado cuando el buzamiento es positivo.

**Figura 36.** Efecto del buzamiento sobre la composición de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

También se puede apreciar que mientras el modelo se encuentre desde su etapa inicial hasta tiempo de ruptura la composición de los gases de combustión es igual, esto para aclarar que solo se perturba la velocidad del frente pero no el consumo en lb mol/día de las reacciones haciendo que generen mayores composiciones de salida, en otras palabras las reacciones que predominan en el proceso siguen siendo HTO esto se deduce por la composición de  $\text{CO}_2$  producido.

## **4.2 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS**

Para el análisis de parámetros hidrodinámicos como la permeabilidad, el caso de estudio original es un yacimiento homogéneo, escenario que no es semejante a la realidad ya que en la mayoría se encuentran bajo algún tipo de estratificación. Para esto conceptualmente se cuenta con un parámetro de bastante ayuda para caracterizar la heterogeneidad del yacimiento el cual es el coeficiente de variación de permeabilidad ( $V$ ), donde este puede indicar si el yacimiento es homogéneo ( $V=0$ ), o en su defecto fuertemente heterogéneo ( $V=1$ ).

Otro parámetro hidrodinámico que se somete a estudio en esta sección es la viscosidad del aceite para ello se analizaran las fracciones pesadas y livianas de dicho hidrocarburo de manera independiente, en el simulador la viscosidad fue ingresada en función de la temperatura ingresando los valores arrojados por la correlación de Andrade, así que se procede a sensibilizar parámetros de dicha correlación que van directamente relacionados con la viscosidad del fluido de interés.

### **4.2.1 Efecto de la permeabilidad absoluta**

Como ya se ha mencionado las diferencias de movilidad entre el fluido inyectado y el hidrocarburo pesado traen consigo notorios efectos de canalización, haciendo que el aire tome la parte superior del yacimiento y los fluidos de interés tiendan a segregarse y redistribuirse en los estratos inferiores, por esta razón en función de favorecer un frente de combustión más estable donde se restrinja o mitigue la canalización se procede a la variación de permeabilidad en la dirección vertical.

En la tabla 14 se encuentra la nueva distribución de permeabilidades cuantificadas con coeficientes de variación ( $V$ ), la cual ha quedado definida de manera ascendente, desde la primera hasta la última capa, con el fin de observar los efectos de overriding y problemas de canalización.

**Tabla 14.** Coeficientes de variación de permeabilidad.

Corrida	Coef. De variación(V)	K capa 1 (mD)	K capa 2 (mD)	K capa 3 (mD)
1 <sup>+</sup>	0.000	4000	4000	4000
2	0.228	4000	5000	8000
3	0.553	2000	4000	6000
4	0.721	1000	3000	8000

<sup>+</sup> caso de estudio original, modelo homogéneo.

Fuente. El autor.

Analizando las variables de salida se encuentra en primera instancia los picos de temperatura, mostrados en la figura 37 haciendo el análisis sobre el termopozo 5, se aprecia un ligero cambio respecto al pico.

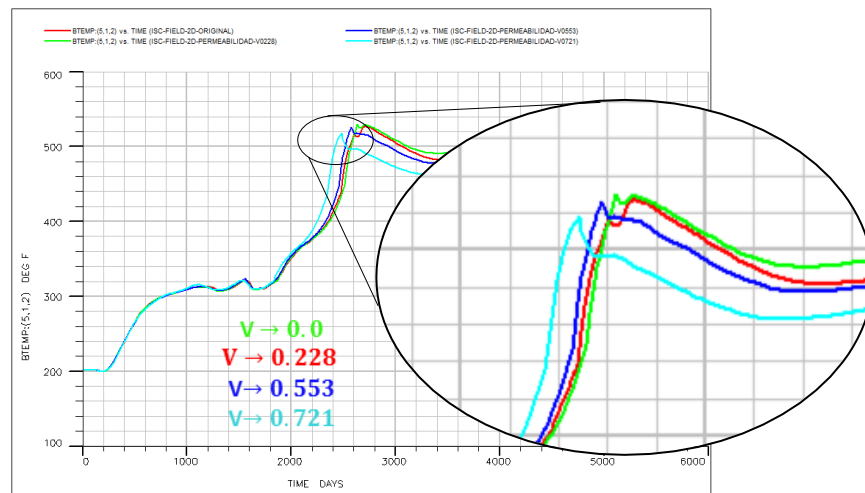
Como bien es sabido la movilidad es directamente proporcional a la permeabilidad absoluta según la ley de Darcy, por ende, al incrementar la permeabilidad en zonas donde el crudo tiene preferencia a estar se está incrementando la movilidad del aceite, esto implica una reducción en la cantidad de crudo disponible para la reacción de craqueo, lo que implica una menor depositación de combustible sólido (coque), en consecuencia de todo esto se manifiesta un pico con menor temperatura.

El resultado encontrado es que entre más heterogéneo sea el yacimiento más estable será el frente de combustión, esto se debe principalmente a que cuando se varia la permeabilidad absoluta se hizo a favor de mitigar la canalización, por ende, haber reducido la permeabilidad en zonas superiores de la formación no afecto fuertemente la movilidad del aire que tiende a canalizarse por esta zona, respecto al aumento de la permeabilidad de la zona inferior de la formación donde el hidrocarburo tiene preferencia para desplazarse si fue afectado debido a que se le entrega mayor facilidad del flujo haciendo que los fluidos de interés se desplacen más rápido, contrarrestando la diferencia que se presentaba

inicialmente respecto a los gases de inyección ( $O_2-N_2$ ) que denotan mayor movilidad.

Sin embargo como se mencionó existe una ligera perturbación en las variables de salida, y se aprecia una gran similitud en el comportamiento, arrojando valores dentro del rango de ajuste previamente establecido (modelo base) muy similares llegando a la conclusión que el comportamiento de la combustión in situ es semejante.

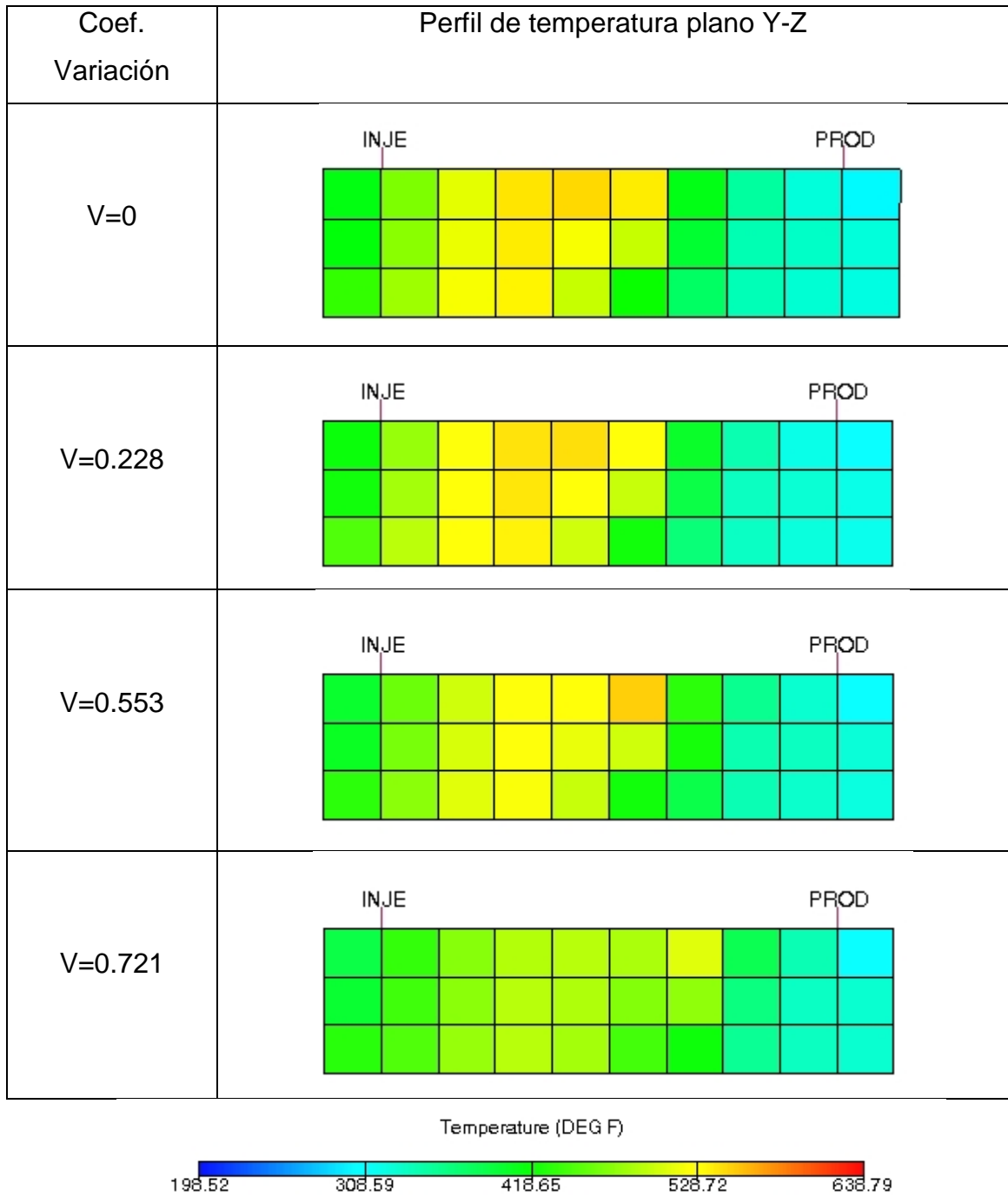
**Figura 37.** Efecto de la permeabilidad sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

En la figura 37 no es muy evidente el efecto de la permeabilidad sobre los perfiles de temperatura, sin embargo en función de visualizar de manera más clara se muestra a continuación (figura 38) la distribución de temperaturas en el plano Y-Z del modelo bidimensional en el timestep 15 para todos los casos.

**Figura 38.** Efecto de la permeabilidad sobre los perfiles de temperaturas en el plano Y-Z.



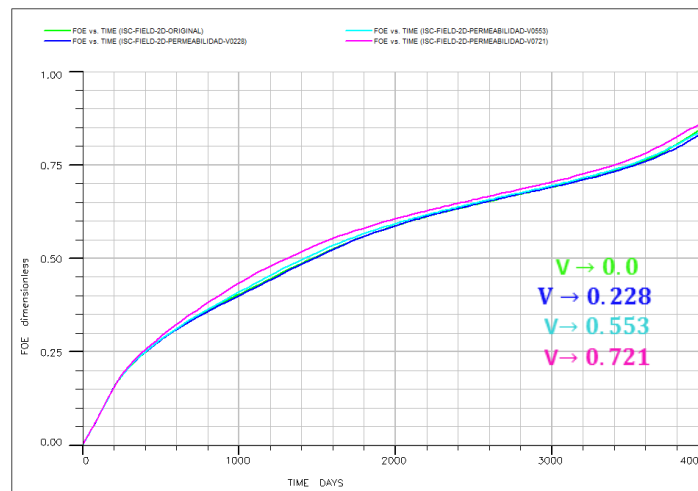
Fuente. Tomado y modificado de FloViz 2011.2.

Acá se denota de manera evidente la eficiencia de barrido para cada uno de los escenarios propuestos, indicando directamente la estabilidad y uniformidad del frente de combustión, pudiendo concluir que cuando se simulen modelos heterogéneos a favor de mitigar problemas de canalización por segregación gravitacional, el frente de combustión se propagara de manera más uniforme.

En el modelo homogéneo se aprecia que el frente de combustión llega más rápido al pozo productor, debido a que el aire sigue un canal preferencial de flujo que es el estrato superior del yacimiento por efectos de overriding. Cuando el coeficiente de variación es alterado incrementando las permeabilidades de los estratos inferiores a fin de favorecer el flujo de los fluidos de interés, el frente se estabiliza mitigando pero no eliminando del todo los problemas de canalización.

En la figura 38 se puede apreciar una mejor distribución del oxígeno por todo el yacimiento, generando perfiles de temperaturas semejantes entre zonas adyacentes, con esto se corrobora la estabilidad del frente de combustión con altos coeficientes de variación.

**Figura 39.** Efecto de la permeabilidad absoluta sobre el factor de recobro.

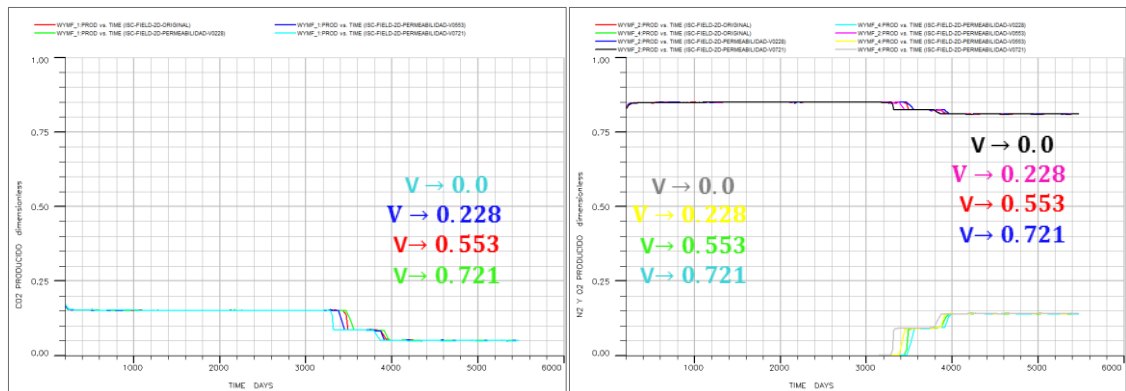


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Respecto a la eficiencia de recobro ligeramente se alteró con la variación de permeabilidades absolutas, sin embargo tiende a incrementar la eficiencia de recuperación cuanto más heterogéneo es el modelo, es decir cuando el coeficiente de variación  $V=0.721$ , en otras palabras cuando el frente de combustión sea más estable o se genere una mejor distribución de oxígeno por todo el yacimiento la eficiencia de recuperación incrementara (ver figura 39).

Respecto a los gases de combustión con la figura 40 se corrobora lo que se había expresado anteriormente, en cuanto a que el comportamiento de la combustión es semejante.

**Figura 40.** Efecto de la permeabilidad absoluta sobre la composición de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

La composición de los gases de producción es similar para todos los escenarios propuestos, se aprecia una ligera diferencia en el tiempo de ruptura del frente de combustión, pero esto no es significativo porque la discrepancia es mínima, esto se debe principalmente a que se alteraron las permeabilidades absolutas del modelo usando coeficientes de variación pero se conservó el mismo valor de permeabilidad (4000 mD) promedio para todos los casos.

#### 4.2.2 Efecto de la viscosidad del aceite

Como previamente se mencionó los datos de viscosidad fueron ingresados en función de la temperatura y estos valores procedían de la correlación de Andrade:

$$\mu_o = 10^{(A+\frac{B}{T})} = 10^{(A)} * 10^{(\frac{B}{T})}$$

Dónde:

$\mu_o$  es la viscosidad del aceite en cP.

A y B son constantes halladas experimentalmente.

T corresponde a la temperatura en ° F.

La expresión potencial por separado es más comprensible para el actual estudio de sensibilidad,  $10^A$  corresponde a una constante que por efectos de simplicidad se le asignara el nombre A, que será de ayuda más adelante.

Como se trabaja con un crudo cuya composición es una fracción pesada (98% de C36) y una fracción ligera (2% de C10), se es necesario usar la siguiente dependencia de la composición:

$$\mu_{HO} = \mu_o^{X_{HO}}$$

$$\mu_{LO} = \mu_o^{X_{LO}}$$

Dónde:

$\mu_{HO}$  corresponde a la viscosidad de la fracción pesada (Heavy Oil).

$\mu_{LO}$  corresponde a la viscosidad de la fracción liviana (Light Oil).

$X_i$  hace referencia a la fracción molar del componente i.

Para este estudio de sensibilidad se alteraran las constantes de la ecuación de Andrade, sin embargo para no perturbarlas ambas se procede a hacer este análisis únicamente con la variación de la constante A.

La tabla 15 resume los valores originales y valores a usar de la constante de Andrade A.

**Tabla 15.** Valores usados de la ecuación de Andrade.

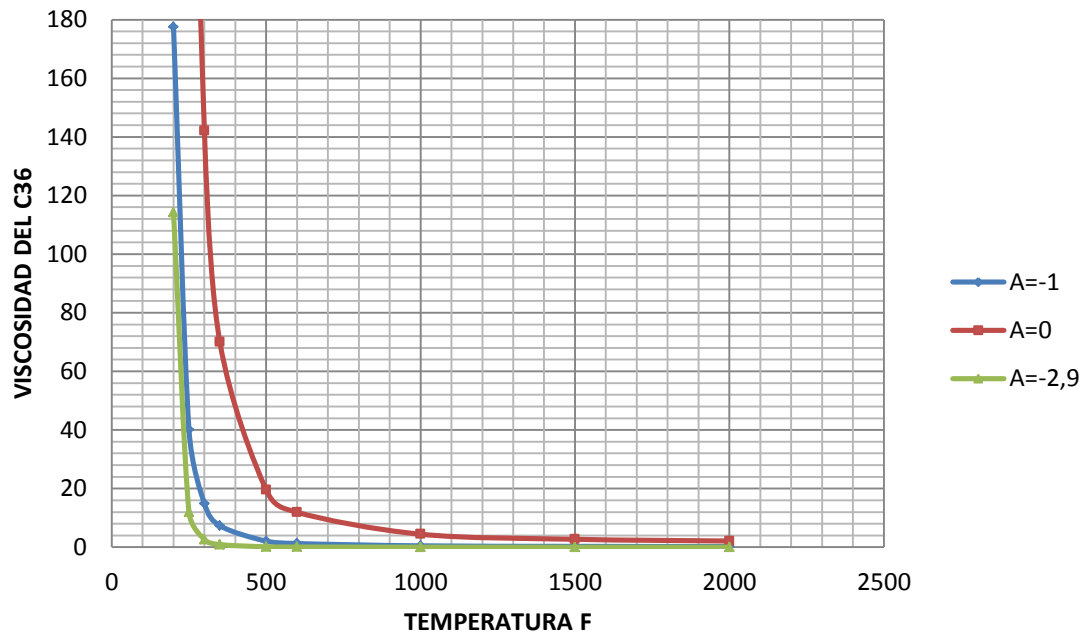
COMPONENTES	CONSTANTE A			CONSTANTE B
	0	-1 <sup>+</sup>	-2,9	
HEAVY OIL	0	-1 <sup>+</sup>	-2,9	659 <sup>+</sup>
LIGHT OIL	-80	-90 <sup>+</sup>	-110	21000 <sup>+</sup>

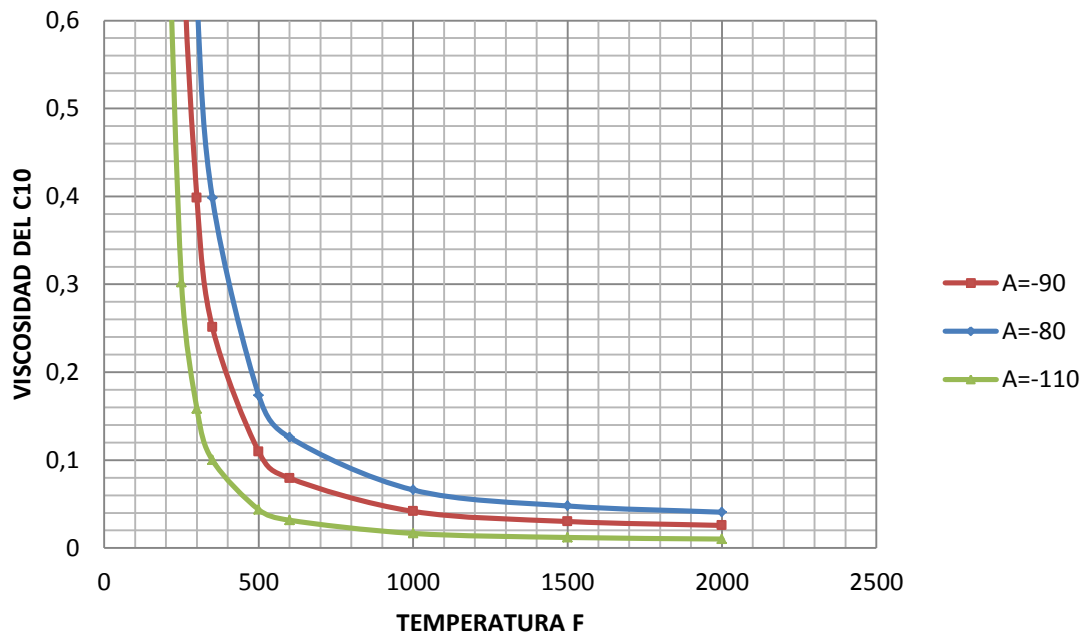
<sup>+</sup>Caso de estudio original.

Fuente. El autor.

La figura 41 muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura cuando se lleva a variación la constante A, logrando visualizar que la restricción de flujo es directamente proporcional a esta constante, es decir cuando incremente el valor de A la viscosidad del fluido tendrá a ser mayor.

**Figura 41.** Efecto de la constante de Andrade A sobre la viscosidad del fluido.

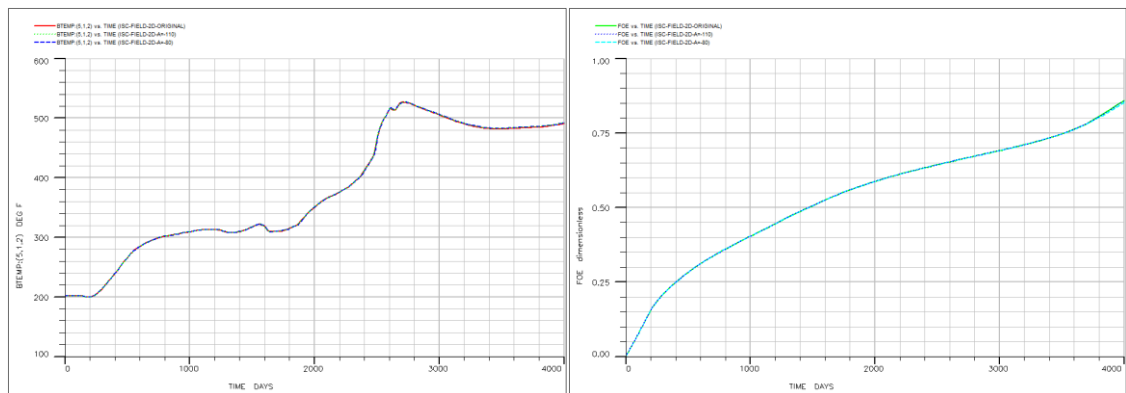




Fuente. El autor.

Llevando los resultados a un documento legible por el simulador (archivo “.data”) y generando la corrida se llega a la conclusión que la viscosidad de las fracciones ligeras del hidrocarburo no son un parámetro que perturbe las características de desempeño del proceso de combustión in situ, como se logra apreciar en la figura 42 el modelo fue insensible a la variación de dicho parámetro, este comportamiento se le atribuye a la composición original del hidrocarburo, debido a que se está modelando un aceite pesado y las fracciones livianas en él no son representativas.

**Figura 42.** Efecto de la viscosidad de las fracciones livianas sobre la temperatura en la termopozo 5 y el factor de recobro.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

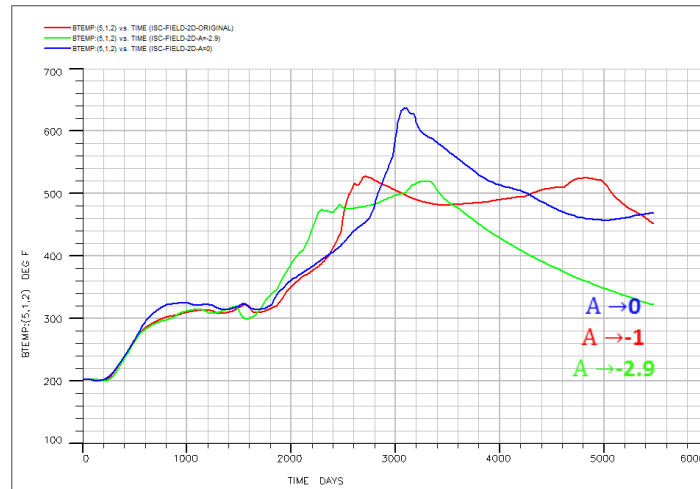
En vista que prácticamente la totalidad del fluido inicial es aceite pesado, se podría concluir que las fracciones livianas de hidrocarburos surgen de las reacciones de craqueo del C36 (ver estequiometría de la reacción), esto ocurre a temperaturas donde todas las fracciones livianas se generan en estado gaseoso, como ya se ha explicado la variación de la constante de Andrade es directamente proporcional a la viscosidad del aceite liviano (fase líquida), por ende no tiene un efecto relevante sobre el desempeño del proceso CIS.

Observando la ecuación de Andrade se aprecia que la viscosidad de las fracciones pesadas son proporcionales a la constante A, por otra parte como la viscosidad va inversamente relacionada con la movilidad de los fluidos, se puede afirmar, que un incremento en la constante de Andrade A da como resultado un modelo de con menores movilidades, menores eficiencias de desplazamiento, y mayores restricciones de flujo, por ende menores velocidades en los fluidos in situ.

Observando los resultados, la figura 43 denota claramente el comportamiento de este parámetro sobre los picos de temperatura, llegando a concluir que un aumento de la constante A (aumento de la viscosidad) genera más restricción al flujo, por ende los fluidos tienden a estar más tiempo en el yacimiento, estos se

someten a un calentamiento extra donde tienden a incrementar su temperatura y viceversa.

**Figura 43.** Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



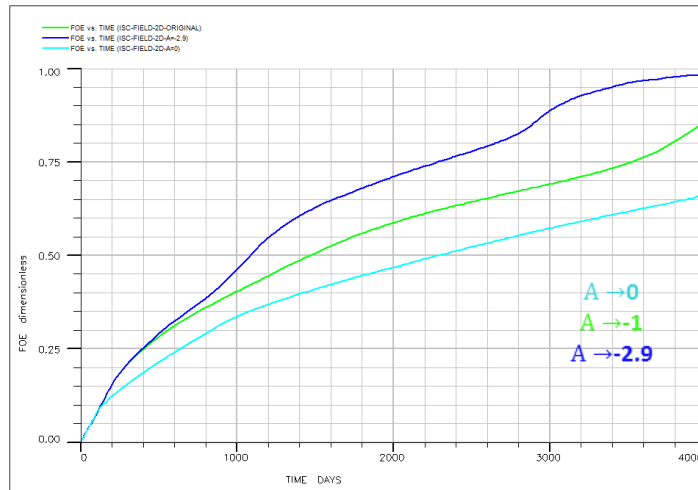
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento también se puede atribuir a que el pico de temperatura es función de la cantidad de combustible disponible, al tener una mayor dificultad el fluido para moverse este tiende a permanecer en el medio poroso, para cuando los fluidos alcancen las temperaturas a las cuales se generan las reacciones habrá una mayor cantidad de reactivos, específicamente la reacción ITO generará una mayor depositación de coque por la cantidad de fluido remanente, esto finalmente se manifiesta en un aumento del pico de temperatura.

Inspeccionando las eficiencias de recobro de los escenarios planteados se aprecia en la figura 44 como una mayor constante de Andrade da una menor eficiencia de recobro, esto se debe a lo que ya se ha hecho alusión, para mayores constantes de Andrade menores movilidades de aceite, esta restricción de flujo hace que se incrementen las cantidades de petróleo remanente haciendo que se reduzca la eficiencia del proceso, con esta explicación se puede concluir que la constante de

Andrade es inversamente proporcional a la eficiencia de un proceso de combustión in situ.

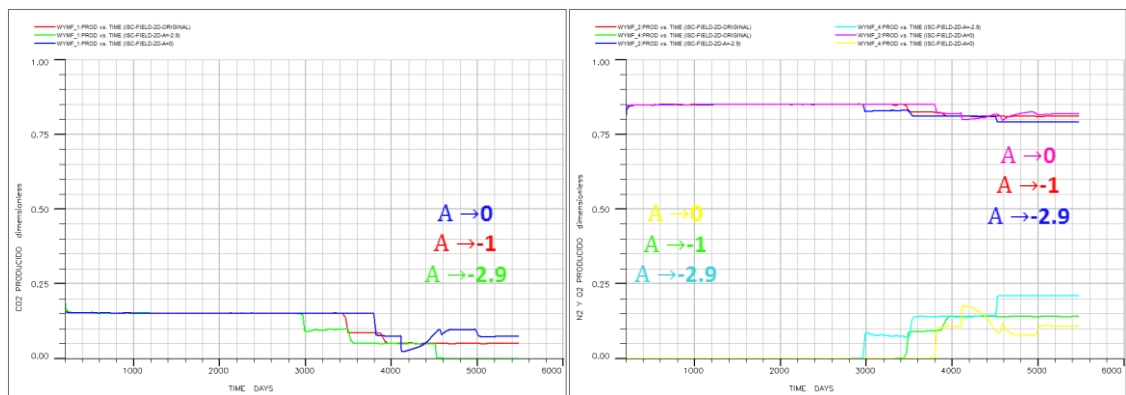
**Figura 44.** Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Analizando los gases de combustión se puede observar que el frente de combustión es más lento cuando aumenta la constante de Andrade y viceversa (ver figura 45).

**Figura 45.** Efecto de la viscosidad de las fracciones pesadas sobre la composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Esto se debe a que un aumento en la constante A genera un incremento en la viscosidad del fluido, por consiguiente, mayores tiempos de producción

ocasionado por las menores velocidades de desplazamiento, esto se aprecia claramente en la figura 45 observando los tiempos de ruptura.

### **4.3 PARÁMETROS OPERACIONALES**

Este estudio se centrara en primera instancia a analizar las condiciones de operación del pozo inyector, específicamente el efecto de la tasa, temperatura, y concentración del agente oxidante del fluido de inyección (aire), sobre las variables de salida de interés que son perfiles térmicos, eficiencias de recobro y gases de combustión.

Un parámetro operativo en el pozo productor que se controla con herramientas de sistema de levantamiento artificial es la presión de fondo fluyente, este parámetro también se analizara ya que va directamente relacionado con la cantidad de fluido que el yacimiento puede entregar en la cara del pozo para ser extraído.

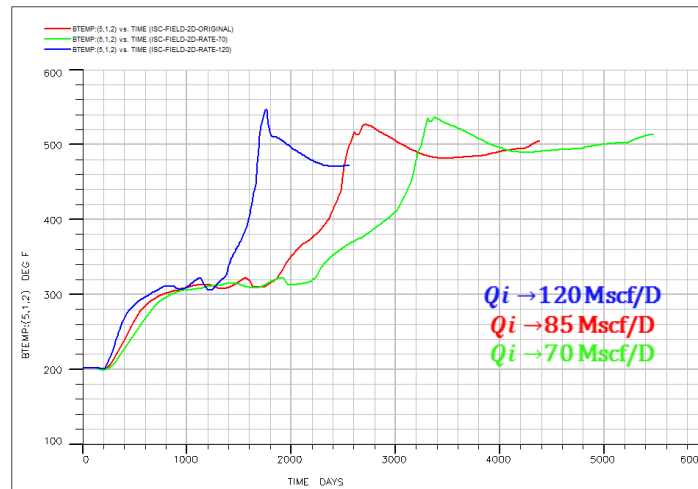
#### **4.3.1 Efecto de la tasa de inyección**

Se establece la variación de la tasa de inyección debido a que es un parámetro crucial para el proceso de combustión in situ, este parámetro suele tener una amplia influencia sobre la velocidad del frente de combustión, haciendo que este sea más estable o que por el contrario se inestabilice hasta ocasionar la extinción del mismo, es de vital importancia una condición de operación optima en este parámetro ya que influye directamente con el éxito económico de un proyecto CIS.

Las tasas de inyección empleadas están tanto por encima como por debajo del modelo original 2D usado actualmente, se usaron tasas de 70 Mscf/día, 120 Mscf/día y 85 Mscf/día siendo esta ultima la que corresponde al caso inicial. Examinando los resultados obtenidos se pudo encontrar que al incrementar la tasa de inyección de aire se altera directamente la velocidad del frente de combustión,

debido a que hay una mayor cantidad de agente oxidante, provocando que el modelo de reacciones de combustión se lleve de manera más acelerada como se aprecia en el análisis de picos de temperatura según los registros del termopozo 5 (ver figura 46).

**Figura 46.** Efecto de la tasa de inyección sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



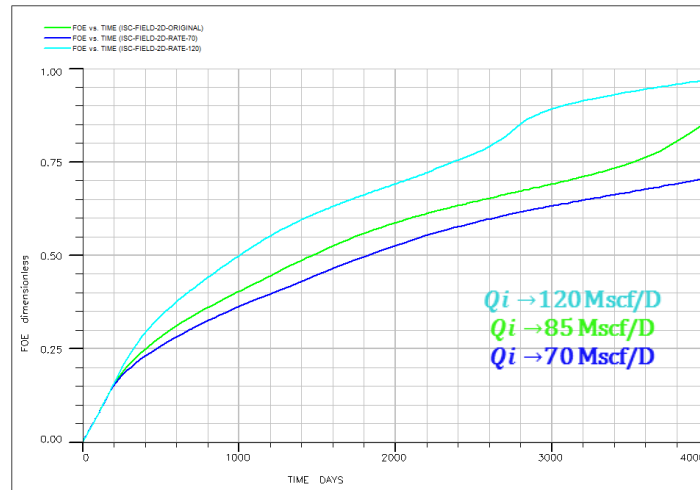
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

La variación de la tasa de inyección altera de manera directa la presión del yacimiento debido a que el contenido de fluidos in situ aumenta o disminuye, por otra parte los perfiles térmicos (específicamente los picos de temperatura) son función de la cantidad de combustible disponible; perturbando la tasa de inyección no produjo un efecto significativo sobre la temperatura como se manifiesta en la figura 46, esto es porque la tasa de reacción para la producción de combustible sólido (reacción de craqueo de crudo pesado-ITO) no es función de la presión sino de la cantidad de energía almacenada en el yacimiento manifestada finalmente como altas temperaturas.

Además de eso se aprecia en las eficiencias de recobro una alteración directamente proporcional a la tasa de inyección (ver figura 47), sin embargo, a altas tasas se asocia mayor incertidumbre debido a que el frente es más inestable,

bajo estas condiciones provoca un mayor riesgo a la hora de controlar su propagación.

**Figura 47.** Efecto de la tasa de inyección sobre el factor de recobro.

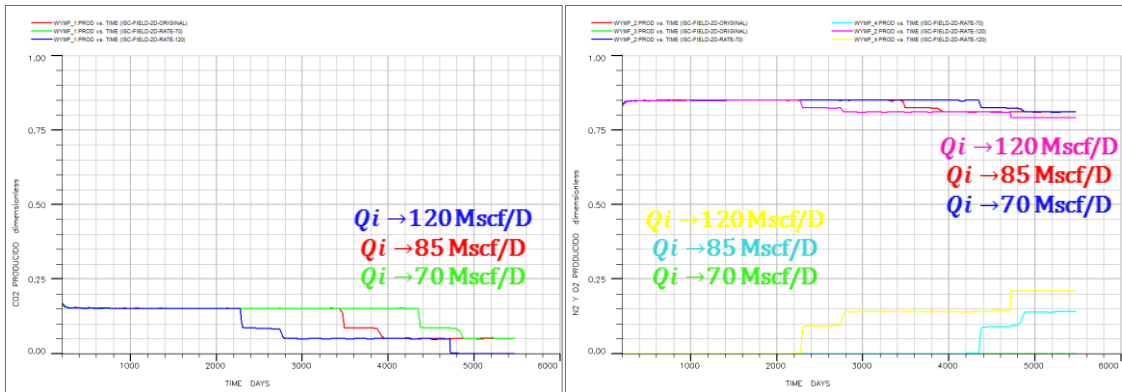


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

El aire se encuentra fácilmente en el medio, pero este requiere el uso de compresores que para estar en operación requieren una gran inversión, en términos de rentabilidad del proyecto sería necesario hacer un análisis económico, para saber si se justifica la inversión de un mayor suministro de fluido de inyección contrarrestando las ganancias generadas por la recuperación de hidrocarburos incremental.

Al aumentar la velocidad del frente de combustión este se inestabiliza desplazándose por zonas preferentes de flujo, presentando pronunciados problemas de canalización, esto se evidencia en la figura 48 con el análisis de la composición de gases de producción, aflorando un tiempo de ruptura reducido, generando que la producción de oxígeno se evidencie más rápido incrementando de manera progresiva hasta alcanzar la composición original del gas de inyección (21%), siendo esta composición la correspondiente cuando el frente de combustión se ha extinguido.

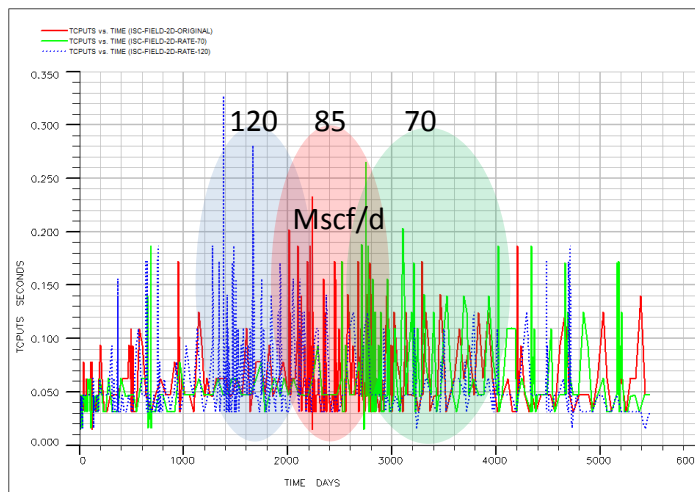
Figura 48. Efecto de la tasa de inyección sobre la composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento genera grandes pérdidas en la distribución del agente oxidante por todo el yacimiento, sabiendo que la compresión de este fluido de inyección y el suministro hasta la cara de la formación en fondo requiere gran inversión, por tanto hay que tener presente que el aumento no controlado de la tasa de inyección es desfavorable, traduciéndose en grandes pérdidas del fluido inyectado que finalmente no reacciona ya que el tiempo de ruptura es acelerado.

Figura 49. Efecto de la tasa de inyección sobre el tiempo de cómputo.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

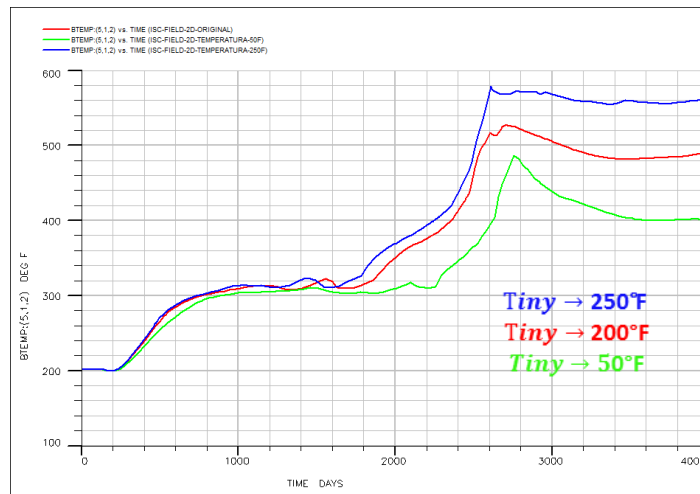
Para finalizar con el análisis de la tasa de inyección se encontró una considerable variación en el esfuerzo computacional empleado por el ordenador, en la figura 49 se aprecia que el rango de las reacción HTO (desde inicio de ignición hasta tiempo de ruptura) requiere mayores tiempos de computo que los demás rangos, es decir mientras el frente de combustión se mantenga encendido ahí habrá mayores requerimientos de computo.

La figura 49 muestra claramente que a altas tasas (línea azul), el mayor consumo de tiempo de computo se da a comienzos del periodo de simulación, a tasas bajas (línea verde) el mayor esfuerzo computacional se encuentra a tiempos tardíos, al final del periodo de simulación y a tasas medianas (línea roja- caso base) la dispersión de mayor tiempo de computo se concentra en periodos intermedios de la corrida de simulación, en todos los casos las zonas donde se reúne el mayor esfuerzo computacional coincide mientras se llevan a cabo las reacciones HTO.

#### **4.3.2 Efecto de la temperatura del fluido de inyección**

Al observar las variables de salida se halla en la figura 50 que la temperatura del fluido de inyección varia el comportamiento de los perfiles térmicos de manera proporcional, esto se atribuye a que un aumento de la temperatura del fluido de inyección tiende a aumentar la energía cinética del modelo, haciendo que las moléculas se encuentre en un estado de mayor colisión, dando como resultado una mayor probabilidad de que reaccionen generando una ligera mayor depositación de coque, perturbando los picos de temperatura.

**Figura 50.** Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.

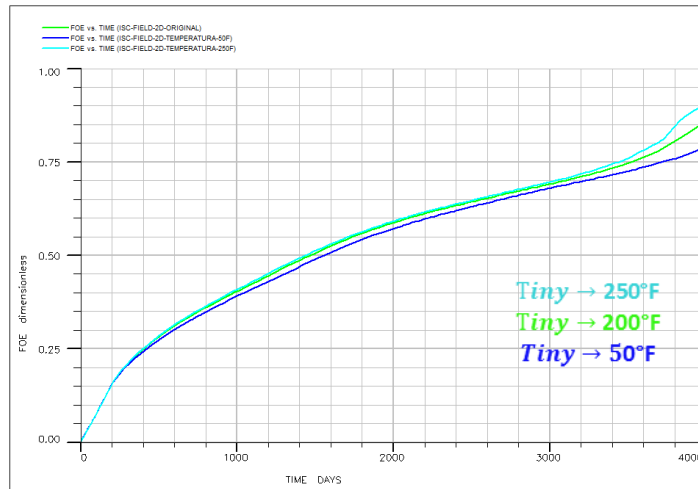


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Al aumentar la energía interna del modelo, debido a la tasa de alimentación del fluido caliente, el fluido in situ está siendo sometido a un calentamiento extra provocando que las reacciones se lleven a cabo a temperaturas superiores, por otra parte también se puede apreciar que el efecto no es significativo para la variación de la velocidad del frente de combustión, ocasionando que a tiempos semejantes se genera la combustión en dicha celda (ver figura 50).

Un aumento en la temperatura del yacimiento trae consigo una reducción en las viscosidades del crudo pesado, otorgando una mayor movilidad que es presentado en la figura 51 como un aumento en la eficiencia de recuperación, en síntesis, el incremento de temperatura del fluido de inyección, genera un escenario con condiciones más apropiadas para una recuperación de hidrocarburos más eficiente.

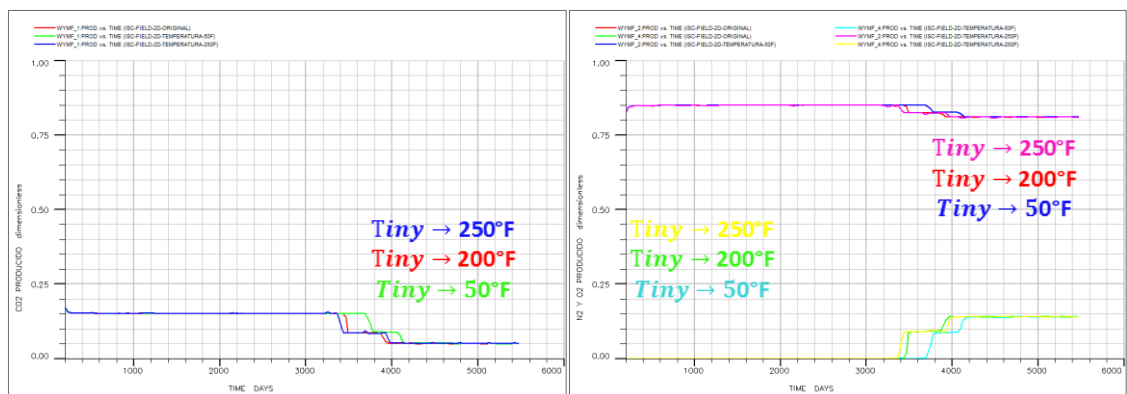
**Figura 51.** Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Analizando los gases de combustión no se aprecian perturbaciones considerables cuando se hace la variación, se aprecia un ligero incremento del tiempo de ruptura cuando decrece la temperatura del fluido de inyección, el efecto sobre las movilidades es mínimo y al final del periodo de simulación (ver figura 52), esto corrobora y hace alusión a que la velocidad del frente de combustión no es perturbada directamente con la variación de la temperatura del fluido de inyección.

**Figura 52.** Efecto de la temperatura del fluido de inyección sobre la composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

### 4.3.3 Efecto de la concentración de oxígeno

Otro parámetro de interés que puede ser alterado a nivel operativo es enriqueciendo el fluido de inyección con oxígeno, este se puede encontrar con composiciones originales en el medio de 21% Oxígeno y 79% Nitrógeno como lo está definido en el caso de estudio 2D ajustado.

Para especificaciones del fluido de inyección y su concentración de oxígeno se emplearon diferentes escenarios teniendo concentraciones de 15% y 25% de oxígeno y la composición restante corresponde al nitrógeno (gas inerte), se alteraron ligeramente estas concentraciones respecto al caso original ya que este parámetro perturba la estabilidad del frente haciendo que una alta relación de oxígeno en el modelo de reacciones de como resultado la extinción del frente con la configuración de tasa de inyección propuesta, como también una concentración muy baja podría ocasionar una baja relación del agente oxidante (oxígeno) con el agente oxidado(hidrocarburo), provocando un modelo de reacciones bastante demorado con tiempos de ignición espontánea y de ruptura bastante elevados.

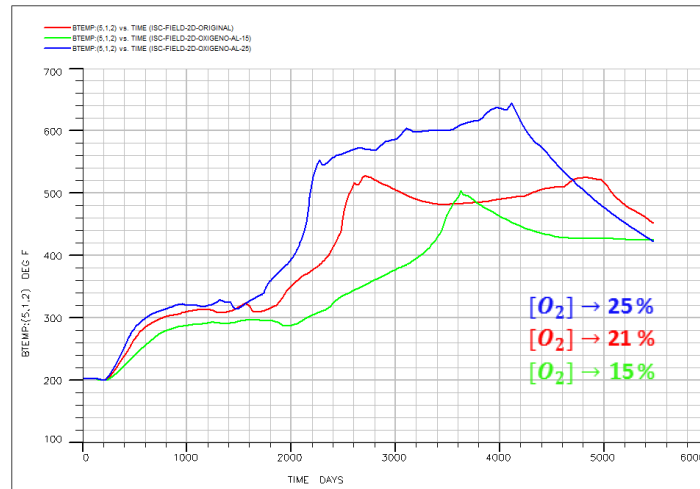
La concentración de oxígeno promueve el aumento de la gravedad específica del aceite producido, mejoramiento del tipo del crudo (upgrading), este puede suele ser de la destilación y craqueo térmico que ocurre por delante de la zona de combustión<sup>38</sup>.

En la figura 53 se aprecia el efecto de la concentración de oxígeno sobre los perfiles térmicos, como se había mencionado una pequeña variación en esta concentración trajo consigo una perturbación fuerte en esta variable de salida. Se nota indiscutiblemente como la velocidad y pico máximo de temperatura del frente de combustión es directamente proporcional a la concentración de O<sub>2</sub>.

---

<sup>38</sup>RODRIGUEZ, J.R. 2005, "Analytical Model Of The combustion Zone In Oxygen Enriched In Situ combustion Tube Experiments", paper presented at the petroleum societies 6<sup>th</sup> Canadian international petroleum conference, Calgary, Alberta Canada, paper 2005-072.

**Figura 53.** Efecto de la concentración de oxígeno sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.

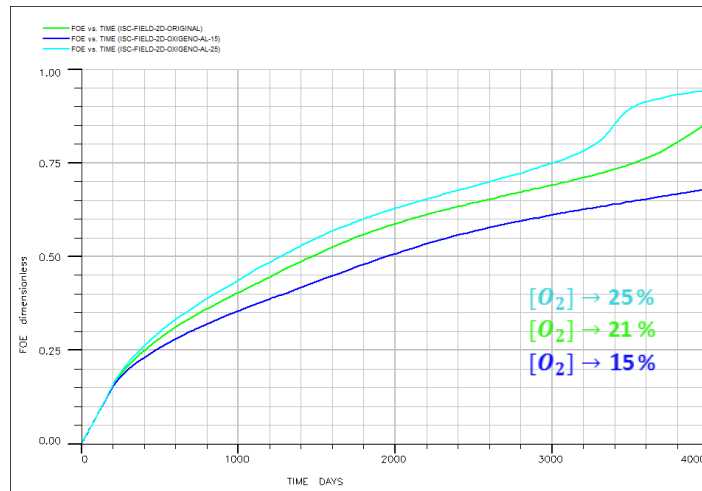


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento se le atribuye a que una reducción en la concentración de oxígeno da como resultado una presión parcial de oxígeno más baja y esto afecta directamente la tasa de reacción, en otras palabras, si la tasa de reacción disminuye habrá menor depositación de combustible sólido (coque), afectando finalmente el pico de temperatura dando como resultado un perfil más bajo y viceversa.

Respecto al factor de recobro, cuando el modelo presente mayor concentración de oxígeno en el fluido de inyección el proceso tiende a mejorar la eficiencia de recuperación y viceversa, esto se debe a que bajo estas condiciones se generaran altas tasas de reacción haciendo que se deposite más combustible sólido, provocando un comportamiento térmico del modelo más alto de lo normal, este incremento de temperatura del yacimiento presentara mejores eficiencias de barrido (ver figura 54).

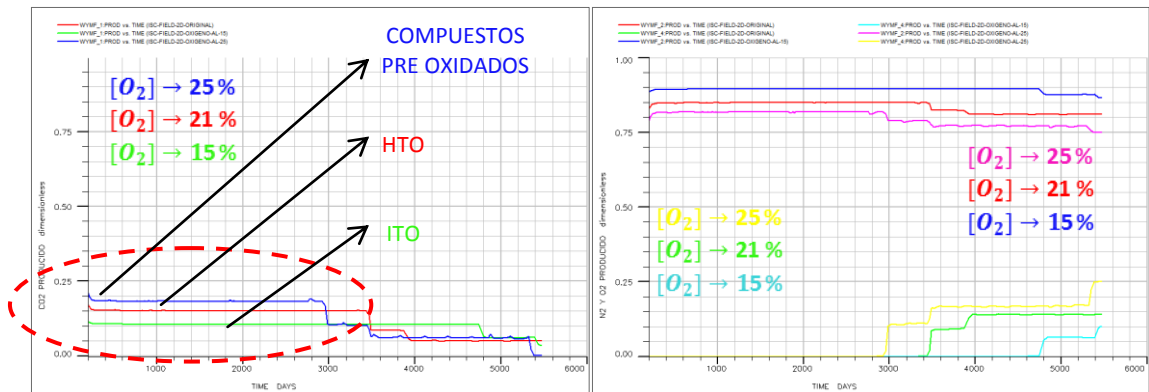
**Figura 54.** Efecto de la concentración de oxígeno sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Al incrementar la concentración de oxígeno aumenta la presión parcial de los productos de combustión específicamente  $\text{CO}_2$ , este puede disolverse en el aceite, el cual resulta en la expansión y reducción de viscosidad, estos últimos dos efectos promueven el flujo de aceite<sup>39</sup>, por esta razón es que la eficiencia de recuperación aumenta (ver figura 54).

**Figura 55.** Efecto de la concentración de oxígeno sobre la composición de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

<sup>39</sup>TINGAS, J.1996, “Field Scale Simulation Study Of In Situ combustion In High Pressure Light Oil Reservoirs”, University of Bath, UK, Paper SPE 35395.

Inspeccionando el comportamiento de los gases de producción  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  se aprecia como es afectada la velocidad del frente de combustión, obteniendo mayores tiempos de producción cuando se disminuya la concentración de  $\text{O}_2$ , lo cual no resultaría económicamente atractivo para un proyecto CIS (ver figura 55).

También salta a la vista por primera vez en todo el proyecto como la composición de gases de salida es diferente para cada uno de los escenarios planteados, es decir la concentración de agente oxidante es directamente influyente sobre la estequiometría de la reacción y para los compuestos que se generan como productos de estas.

Para tener un análisis claro respecto a las composiciones de los gases de combustión es necesario acudir al estudio de Ursernbach<sup>40</sup> el cual asocia los rangos de concentración de  $\text{CO}_2$  a regímenes de temperatura que podrían ser predominantes en el proceso CIS (ver tabla 16):

**Tabla 16.** Composición de  $\text{CO}_2$  para diferentes regímenes de temperatura.

RÉGIMEN DE TEMPERATURAS	CONCENTRACIÓN DE $\text{CO}_2$
LTO	<10%
ITO	12-18%
HTO	12-15%
QUEMADO DE COMPUESTOS PRE- OXIDADOS	15-18%

Fuente. Tomado y modificado de URSENBACH MATTHEW G. An overview of laboratory in situ combustion behavior of Athabasca oil sands. The University of Calgary. 1992. P. 74

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir respecto a la composición de  $\text{CO}_2$  mostrada por los escenarios dados cuando se alteró la concentración de oxígeno que, el caso original da como resultado una composición dentro del rango

<sup>40</sup>URSENBACH MATTHEW G. An overview of laboratory in situ combustion behaviour of Athabasca oil sands. The University of Calgary. 1992. P. 74.

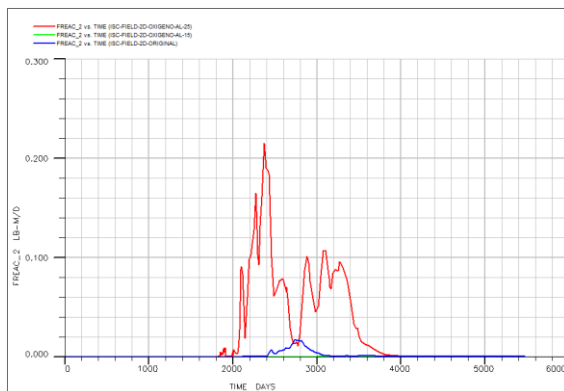
convencional correspondiente a régimen de temperaturas HTO, sin embargo cuando se baja la concentración de oxígeno a 15% las reacciones que predominan en el modelo son tipo ITO-LTO, esto da un aviso de que el proceso tiene un pobre quemado en el yacimiento.

Por otra parte cuando se aumenta la concentración de oxígeno a parte de llevarse a cabo las reacciones HTO se incrementa la eficiencia de este compuesto utilizado, reaccionando a tal punto de alcanzar un alto nivel de CO<sub>2</sub> igual a 18%, esto ocurre porque el exceso de agente oxidante genera una previa oxidación del aceite ocasionando una liberación extra de CO<sub>2</sub> que finalmente hace una contribución al efecto convencional.

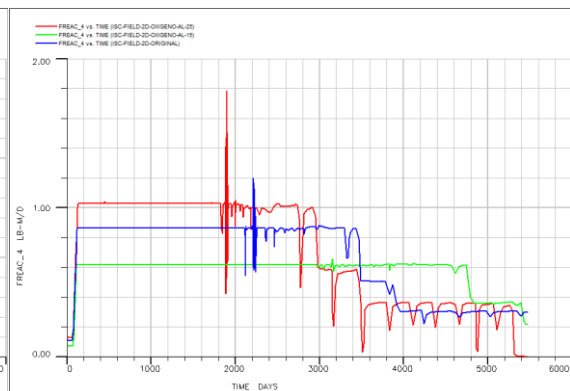
Analizando la tasa de reacción se aprecia en la figura 56 como para una mayor concentración de oxígeno los consumos de cada reacción incrementan y viceversa, esto se debe a que un mayor suministro de agente oxidante estimula la estequiometría de la reacción previamente establecida, alterando la cantidad de componentes a reaccionar.

**Figura 56.** Efecto de la concentración de oxígeno sobre la tasa de consumo de cada reacción.

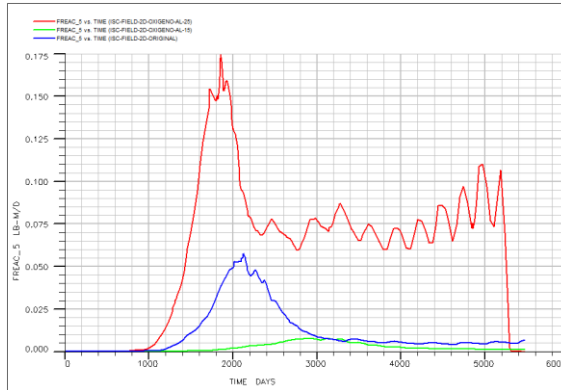
Reacción de oxidación del C10



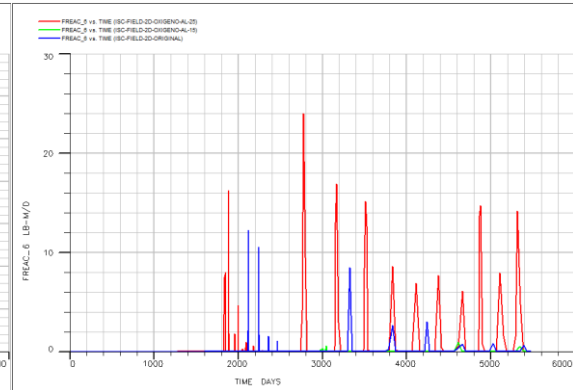
Reacción de oxidación del C36



## Reacción de craqueo del C36



## Reacción de combustión del coque



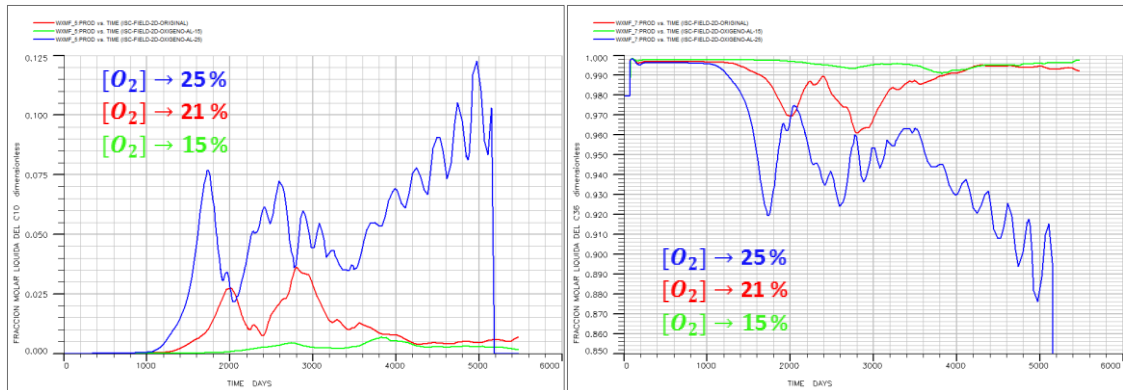
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Debido a la naturaleza de la combustión in situ estos modelos térmicos son viables para un proceso de mejoramiento de crudo, comúnmente conocido como Upgrading, donde para un crudo pesado ocurre una mejora significativa en su API, debido a que las fracciones pesadas quedan inmóviles (combustible sólido), depositándose para posteriormente quemarse mientras la mayoría de las fracciones ligeras son móviles y estas son producidas, el Upgrading es un proceso muy beneficioso ya que elimina componentes no deseados en el yacimiento y contribuye a una creciente gravedad API.<sup>41</sup>

Al alterarse las fracciones en fase vapor se decide inspeccionar las fracciones líquidas del fluido de producción y se aprecian grandes rasgos importantes. La figura 57 muestra el proceso upgrading donde indica claramente un incremento de la calidad del crudo, la tendencia convencional que se aprecia es que mientras se mantenga el frente de combustión encendido desplazándose por la formación se reduce la producción de fracciones pesadas de crudo (C36) contrarrestando ese efecto aumentan las fracciones ligeras (C10).

<sup>41</sup>CASTANIER, L.M.,2002, "Upgrading Of Crude Oil Via In Situ Combustion", Stanford University, Journal of petroleum science and engineering, p 125-136.

**Figura 57.** Efecto de la concentración de oxígeno sobre el Upgrading de crudo.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Por otra parte para este caso de sensibilidad se aprecia como el incremento de la concentración de oxígeno contribuye con los procesos Upgrading, dando a favor una mejora en el fluido de producción, en otras palabras favorece el incremento de la producción de fracciones ligeras (C10) y reduce las fracciones pesadas (C36), esto se debe a que una mayor cantidad de agente oxidante estimulara el modelo de reacciones perturbando fuertemente la reacción de craqueo del C36 liberando C10.

#### 4.3.4 Efecto de la presión de fondo fluyente

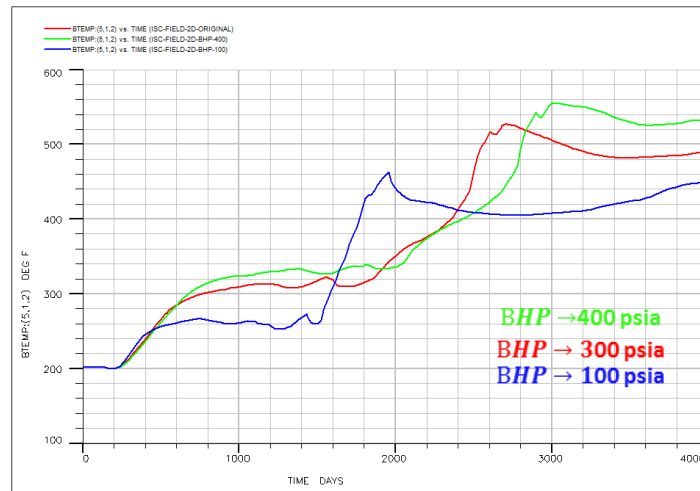
La presión de fondo fluyente o BHP (Bottom Hole Pressure) es el parámetro operativo por el cual está controlado el pozo productor. La caída de presión a la que un fluido se somete es directamente proporcional al caudal o velocidad aparente de flujo en cierta región según Darcy<sup>42</sup>, para este caso cuando la presión de fondo sea menor, mayor será la caída de presión y viceversa.

La figura 58 muestra el comportamiento de los picos de temperatura bajo los cambios de la presión de fondo fluyente la relación que se aprecia es directamente

<sup>42</sup> OSORIO, G. "Simulación Numérica de Yacimientos. Capítulo 2: Ecuaciones Fundamentales De Flujo En Medios Porosos". 2002, pag. 10.

proporcional, esto se debe a que una mayor BHP generara una menor caída de presión ocasionando una reducción en la velocidad aparente de flujo, esto hace que los fluidos perduren más tiempo en el yacimiento sometiéndose a los efectos térmicos generados por el modelo de reacciones, esto se traduce en aumentos de temperatura por el contenido extra de hidrocarburos presentes que finalmente se traduce en mayores cantidades de combustible disponible in situ.

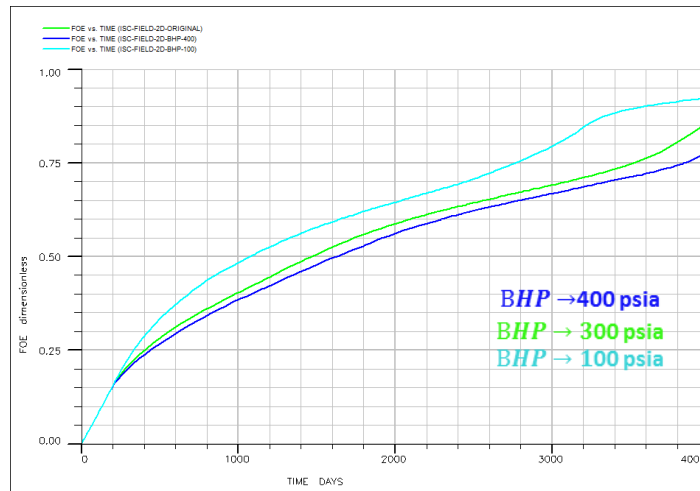
**Figura 58.** Efecto de la presión de fondo fluyente sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

La eficiencia de recuperación se ve pronunciada desde el principio del periodo de simulación cuando se reduce la BHP, haciendo que el factor de recobro aumente, esto se da debido a que al tener una mayor caída de presión se genera un incremento en la movilidad de los fluidos in situ, por consiguiente, menores restricciones de flujo y viceversa (ver figura 59).

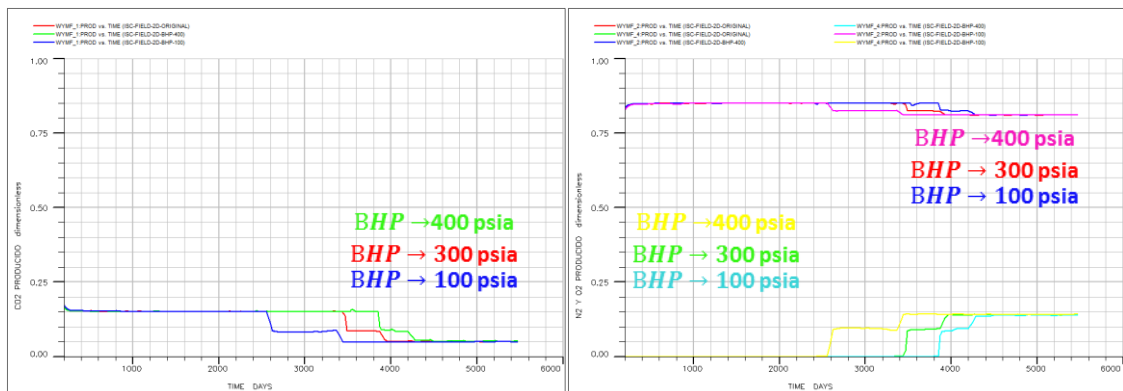
**Figura 59.** Efecto de la presión de fondo fluyente sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

En cuanto a los gases de producción sus composiciones no son alteradas, pero si se aprecia la variación en el tiempo de ruptura, al tener una menor BHP se tienen menores tiempos de producción, este comportamiento es desfavorable debido a que una alta caída e presión genera una gran cantidad de flujo de fluidos de interés hacia la zona de producción, generando un rápido vaciamiento del yacimiento, esto traería consigo problemas asociados a tiempos de ruptura muy rápidos ocasionados por la canalización del aire(ver figura 60).

**Figura 60.** Efecto de la presión de fondo fluyente sobre composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

## 4.4 PARÁMETROS TÉRMICOS

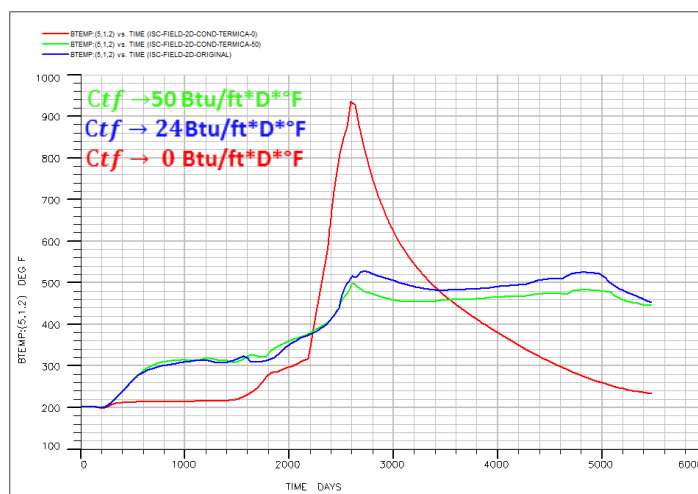
En este módulo se dará importancia a los parámetros térmicos asociados a la formación y al modelo de reacciones, correspondientes a la conductividad térmica y entalpías respectivamente, en otras palabras se analizará el efecto sobre la capacidad de conducción de calor de la formación y la cantidad de calor dada por las reacciones.

### 4.4.1 Efecto de la conductividad térmica de la formación

La conductividad térmica de la formación es la capacidad de transferir energía cinética a través de la matriz de la roca, para un modelo discretizado sería la capacidad de transferir energía entre celdas adyacentes, como lo son los escenarios computacionales a los que se está enfrentando en este proyecto.

Inspeccionando la figura 61 correspondiente a los picos de temperatura, se ve un comportamiento inversamente proporcional con la variación de la conductividad térmica.

**Figura 61.** Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.

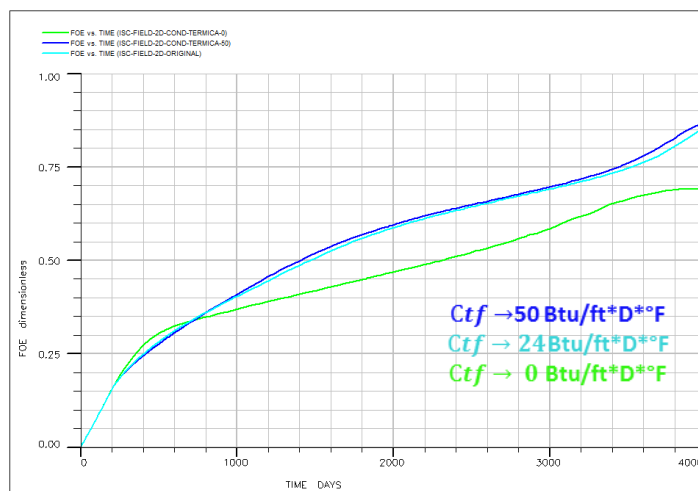


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento se debe a que un incremento de la conductividad térmica de la formación da como resultado una alta pérdida de calor a los estratos adyacentes, debido a que la conductividad incrementa el calor por conducción pero además también aumenta el calor por convección, por el caso contrario cuando se tiene el modelo adiabático (conductividad térmica=0 Btu/ft\*D\*°F) el yacimiento está sometido a la eficiencia térmica más alta ya que no se darían pérdidas de calor a los alrededores, por este motivo toda la energía generada se almacenaría dentro del modelo sin tener pérdidas por convección, dando como resultado el pico de temperatura más elevado que se pudiera dar en el mejor de los casos (ver figura 61).

Estudiando el factor de recobro (figura 62) se encontró que una alta conductividad térmica no altera considerablemente la eficiencia del proceso, sin embargo, el modelo adiabático presenta una caída en la eficiencia de recuperación de hidrocarburos pero es estable el comportamiento, por otra parte con conductividades térmicas de la formación bajas (pero no nulas-“adiabático”), se presenta un cambio en el comportamiento del factor de recobro al mismo tiempo que se alcanzan temperaturas superiores a los 1000° F.

**Figura 62.** Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre el factor de recobro.

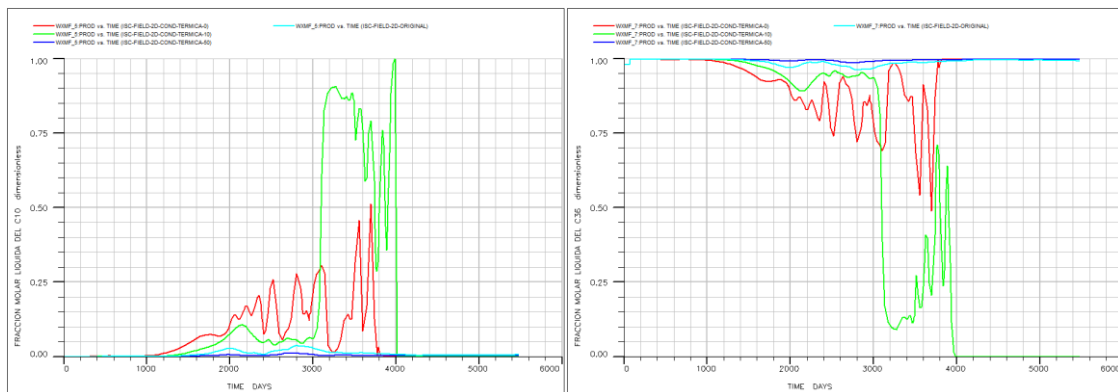


Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Este comportamiento se da a que una baja conductividad térmica permite que el modelo no se disipe tanta energía en los alrededores, dando como resultado un incremento en los picos de temperaturas, este aumento de temperatura contribuye con la reducción de viscosidad del fluido de interés otorgándole mayor movilidad a tal punto que se alcanza una recuperación bastante eficiente (línea azul oscura).

Corroborando lo anterior, con el proceso upgrading se presentan resultados más eficientes para el caso de conductividades térmicas más bajas, dando mayores composiciones de fracciones ligeras y reduciendo las fracciones pesadas, por esta razón los componentes que se disponen a salir son de viscosidad más reducida y de movilidad más pronunciada (ver figura 63).

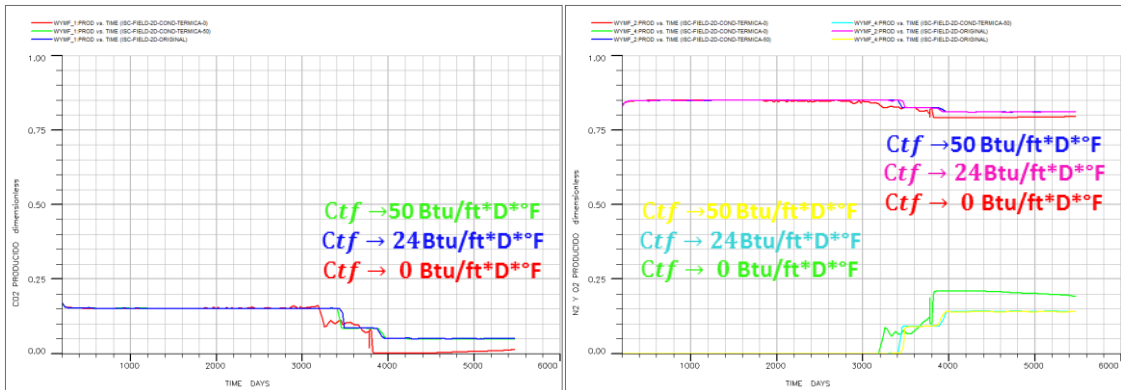
**Figura 63.** Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre el Upgrading.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Analizando los gases de producción se visualiza la velocidad del frente de combustión (figura 64), para variaciones de la conductividad térmica no se aprecian considerables cambios en el tiempo de ruptura, sin embargo para el caso adiabático da como resultado un tiempo de ruptura ligeramente menor a los demás, por ende, un frente de combustión más rápido debido al alto grado de temperaturas que se están trabajando cuando no se consideran pérdidas de energía en forma de calor a los alrededores.

**Figura 64.** Efecto de la conductividad térmica de la formación sobre composición de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producido.



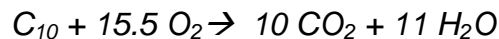
Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

#### 4.4.2 Efecto de las entalpías de la reacción

Para este análisis de sensibilidad se procederá a revisar la influencia de las entalpías de la reacción de oxidación de fracciones ligeras, oxidación de fracciones pesadas, craqueo de las fracciones pesadas, y combustión del coque.

#### Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras

Para el análisis de la entalpía se analizará la reacción cuya estequiometría corresponde a:

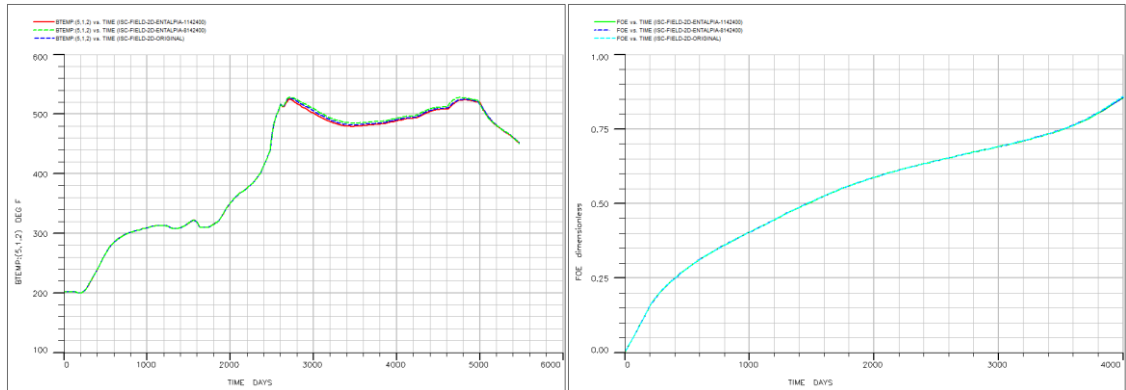


Cuyo valor de entalpía se alterará por encima y por debajo del modelo original, correspondiente al caso 2D ajustado, especificados en la tabla 17 que se encuentra de resumen al final de la sección.

Para la variación de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras del crudo, se puede visualizar en la figura 65 como los cambios en el calor de esta reacción no son un efecto significativo sobre el desempeño de las

características del proceso de combustión in situ, este comportamiento se da debido a que la composición de crudo ligero inicialmente en el yacimiento es mínima, al punto de ser despreciable (2% - ver tabla de composiciones iniciales, tabla 7).

**Figura 65.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre los picos de temperatura y factor de recobro.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Los datos arrojados por las variables de salida y los valores empleados para cada corrida de simulación se resumen en la tabla 17.

**Tabla 17.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida.

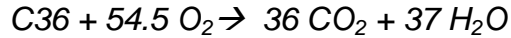
OXIDACIÓN DEL C10			
Variables de salida	ENTALPÍAS DE REACCIÓN (BTU/lb mol)		
	1142400	5142400 <sup>+</sup>	8142400
Pico de temperatura (° F)	524.74884	527.03467	528.42603
Factor de recobro (fracción)	0.85846674	0.86183226	0.85990554
Tiempo de ruptura (D)	3441	3434	3442.5

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

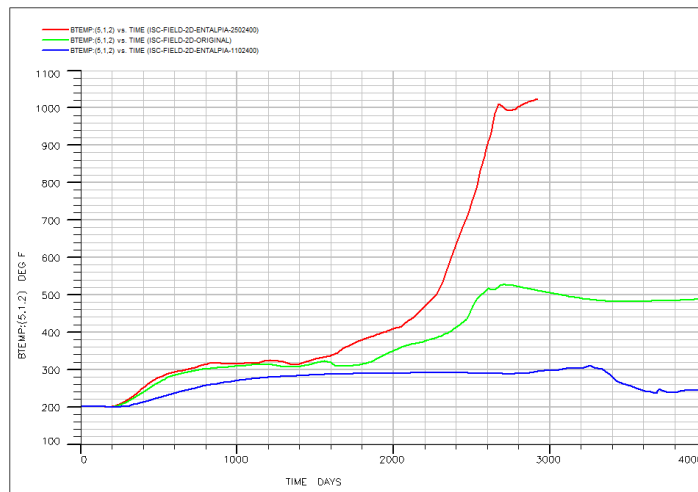
## Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas

Para el análisis de la entalpía se analizara la reacción cuya estequiometría corresponde a:



Los valores tomados por encima y por debajo del caso original dan como resultado una gran perturbación en las variables de salida, en la figura 66 se aprecia como la entalpía de la reacción de oxidación del C36 afecta los picos de temperatura de manera proporcional.

**Figura 66.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre los picos de temperatura en la termopozo 5.



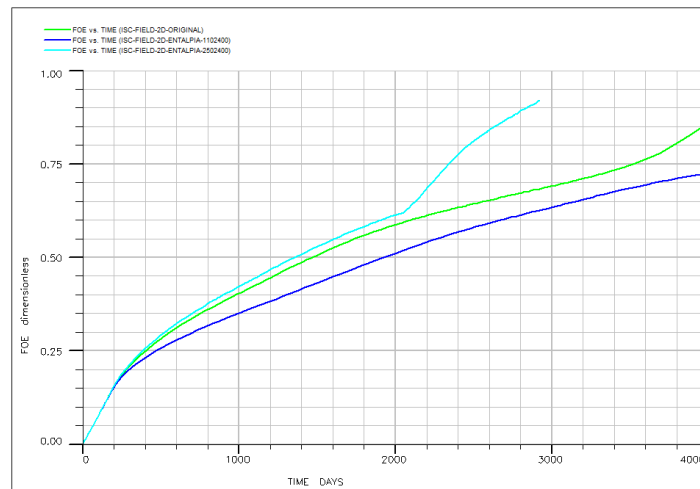
Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

En vista a que la composición original del crudo casi en su totalidad es C36 el efecto es pronunciado cuando se altera este parámetro, por ende, una de las reacciones que predominan en el modelo será esta, contribuyendo como fuente de calentamiento disponible al yacimiento.

La figura 67 da una idea clara del comportamiento del factor de recobro y como una variación de esta entalpía influye directamente proporcional a la eficiencia de recuperación del proceso, pudiendo concluir que un incremento en el calor

otorgado por esta reacción contribuye a un aumento en la movilidad del aceite, haciendo que los tiempos de producción sean menores.

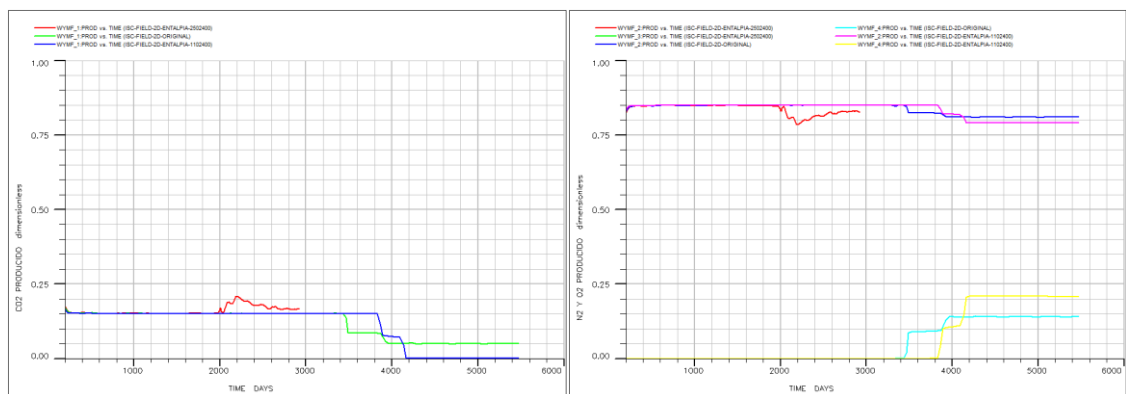
**Figura 67.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre el factor de recobro.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Los gases de producción generados muestran una ligera variación en el tiempo de ruptura del frente de combustión en el pozo productor (figura 68).

**Figura 68.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de fracciones pesadas sobre los gases de producción.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Acá se revela que el valor de entalpía es inversamente proporcional al tiempo de ruptura, por otra parte con entalpías altas se logra cambiar el régimen de

temperaturas en el modelo, dado que la composición de CO<sub>2</sub> incrementa, llevando a cabo con preferencia reacciones donde los compuestos se pre-oxidan.

Para sintetizar todos los resultados del estudio de sensibilidad de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas, se consignan en la tabla 18.

**Tabla 18.** Efecto de la entalpía de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida.

OXIDACIÓN DEL C36			
Variables de salida	ENTALPÍAS DE REACCIÓN (BTU/lb mol)		
	1102400	2102400 <sup>+</sup>	2502400
Pico de temperatura (° F)	309.31308	527.03467	1011.0777
Factor de recobro (fracción)	0.724024	0.86183226	0.91988212
Tiempo de ruptura (D)	3830	3434	--

<sup>+</sup>Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

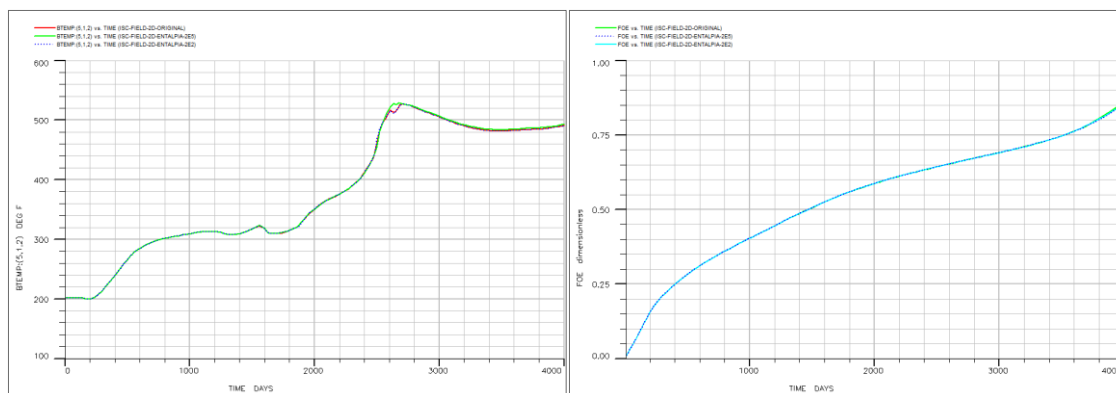
### Efecto de la entalpía de la reacción de craqueo de aceite pesado

La entalpía de la reacción que se procede a sensibilizar corresponde a la siguiente estequiometría:



El comportamiento sobre los picos de temperatura y el factor de recobro quedan consignados en la figura 69, donde salta a la vista que el modelo no es sensible a la variación de esta entalpía.

**Figura 69.** Efecto de la entalpía de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre los picos de temperatura en la termopozo 5 y factor de recobro.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Aunque no se tuvieron perturbaciones en las características del proceso CIS, se resumen en la tabla 19 las variables de salida arrojadas por la simulación.

**Tabla 19.** Efecto de la entalpía de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida.

CRAQUEO DEL C36			
Variables de salida	ENTALPÍAS DE REACCIÓN (BTU/lb mol)		
	2.0E2	2.0E4 <sup>+</sup>	2.0E5
Pico de temperatura (° F)	524.89844	527.03467	527.34863
Factor de recobro (fracción)	0.85692972	0.86183226	0.85690415
Tiempo de ruptura (D)	3436	3434	3425

<sup>+</sup>Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

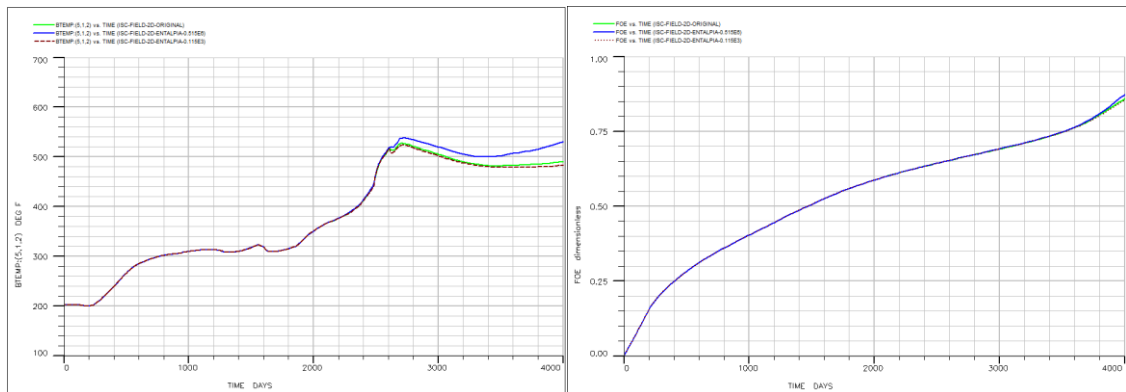
## Efecto de la entalpía de la reacción de combustión de coque

La reacción a la que se somete a variación su entalpía corresponde a la siguiente estequiometría:



Visualizando los resultados se aprecia en la figura 70 el comportamiento sobre los picos de temperatura y el factor de recobro, arrojando resultados muy semejantes indicando que la variación de la entalpía de la reacción de oxidación de coque no es un parámetro que altere el desempeño de las características propias del proceso de combustión in situ.

**Figura 70.** Efecto de la entalpía de la reacción de combustión de coque sobre los picos de temperatura en la termopozo 5 y el factor de recobro.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Se aprecian unas ligeras variaciones en los picos de temperatura directamente proporcional a al cambio de la entalpía, sin embargo la perturbación no es significativa frente a este modelo a escala de campo.

La tabla 20 registra el estudio de sensibilidad hecho con la entalpía de la reacción de combustión del coque.

**Tabla 20.** Efecto de la entalpía de la reacción de combustión de coque sobre las variables de salida.

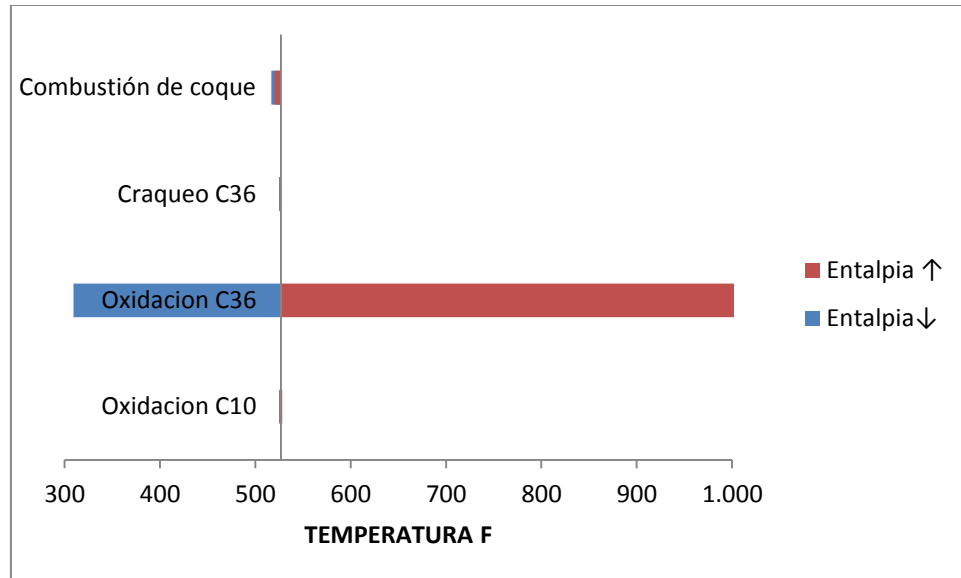
COMBUSTIÓN DEL COQUE			
Variables de salida	ENTALPÍAS DE REACCIÓN (BTU/lb mol)		
	0.115E3	0.115E6 <sup>+</sup>	0.515E6
Pico de temperatura (° F)	516.91028	527.03467	520.06842
Factor de recobro (fracción)	0.8576439	0.86183226	0.87580615
Tiempo de ruptura (D)	3428	3434	3438.5

<sup>+</sup>Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Tomando todos los resultados y superponiéndolos en un diagrama de influencia se puede apreciar el efecto de la entalpía de cada reacción frente al desempeño del proceso CIS en general (figura 71).

**Figura 71.** Diagrama de influencia de la entalpía de cada reacción sobre los picos de temperatura.

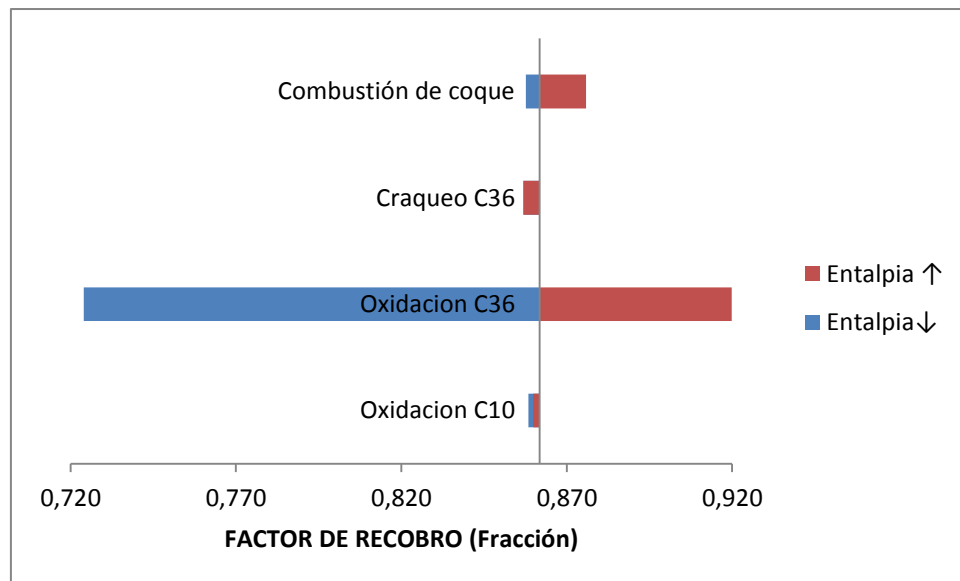


Fuente. El autor.

En la figura 71 se representa la influencia de la entalpía de cada reacción sobre los picos de temperatura, logrando concluir que el modelo es fuertemente dependiente de la entalpía de la reacción de oxidación de crudo pesado, esto se le atribuye a que el fluido in situ en su totalidad es C36, al tener una mayor liberación de energía (reacción exotérmica) de esta reacción, provocara un calentamiento de la formación más prominente, estableciendo un escenario óptimo para que el incremento de temperaturas optimice la tasa de reacción del craqueo de la fracción pesada posteriormente, al tener mayor cantidad de combustible sólido disponible el modelo traerá consigo mejoras en la calidad de crudo y en la eficiencia de recuperación.

Analizando los resultados de la eficiencia del proceso, en el siguiente diagrama de influencia (figura 72) se corrobora lo ya mencionado.

**Figura 72.** Diagrama de influencia de la entalpía de cada reacción sobre la eficiencia de recobro.



Fuente. El autor.

La alta composición inicial del fluido (básicamente solo C36=98%), ocasiona que la oxidación de este componente establece una reacción exotérmica, otorgando un medio más favorable para la optimización del proceso, en función de que el

incremento de temperatura permite tener una mayor cantidad de combustible disponible, mejorando la calidad y movilidad del fluido de interés, provocando que el barrido del hidrocarburo sea más eficiente, y viceversa.

#### **4.5 PARÁMETROSCINÉTICOS**

Antes de comenzar este estudio de sensibilidad cabe aclarar que el análisis de los parámetros cinéticos requiere de una profunda investigación, acá se darán conclusiones, pero no pueden ser generalizadas en vista a la incertidumbre que está asociada a ellos, por tanto se mostraran los rasgos más representativos sobre las variables de salida.

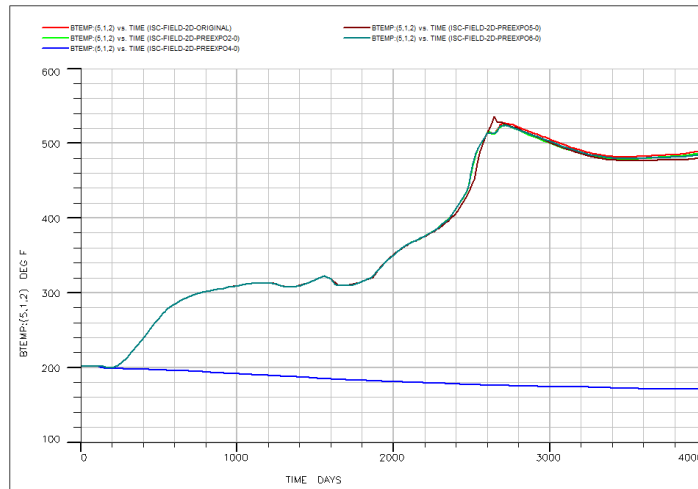
Los parámetros cinéticos que serán de estudio en este módulo serán la constante de Arrhenius o factor pre-exponencial y la energía de activación para las reacciones más representativas del modelo de simulación, como lo son, la oxidación de las fracciones livianas (C10) y pesadas (C36) del crudo, el craqueo del aceite pesado y la combustión del coque.

##### **4.5.1 Efecto del factor pre-exponencial**

El factor pre-exponencial es la frecuencia de colisión que se requiere entre reactivos para convertirse en nuevos productos, según la teoría del estado de transición es importante ya que si no se alcanza cierta frecuencia no se llevaran a cabo las reacciones propuestas.

Como se aprecia en la ecuación de Arrhenius, el factor pre-exponencial es directamente proporcional a la tasa de reacción, en la figura73 se analizan los perfiles térmicos cuando es eliminada una reacción asignándole un valor de “0” (cero) al factor pre-exponencial de dicha reacción.

**Figura 73.** Perfiles de temperatura para un factor preexponencial = 0, eliminando cada reacción.



Fuente. Tomado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Acá se aprecia claramente que el desempeño del proceso de combustión in situ no es fuertemente dependiente de la frecuencia de colisión intermolecular de las reacciones de oxidación de las fracciones livianas, craqueo de aceite pesado, y oxidación del coque, por otra parte, si es sensible a la variación de la frecuencia de colisión de la oxidación de la fracción pesada (C36), ya que, al no tener frecuencia de colisión el modelo de reacciones no permitirá que se oxide primeramente la fracción pesada, por ende, luego de esta oxidación y del incremento de temperatura no se lograra realizar el craqueo para la depositación del combustible sólido, en síntesis este parámetro (frecuencia de colisión de la reacción de oxidación de la fracción pesada) es importante para el desempeño del proceso CIS.

Para este caso en donde la reacción de oxidación de la fracción pesada tiene una frecuencia de colisión que tiende a cero, hace que el modelo no tienda a la ignición espontánea y la temperatura no incrementara a tal punto que se inicie la oxidación del coque depositado.

Por otra parte haciendo el estudio de manera detallada a cada reacción inicialmente se tomara la constante de Arrhenius de la reacción de oxidación de la

fracción liviana la cual presenta un efecto insignificante en el proceso de combustión in situ ya que la cantidad de este componente en el yacimiento es insignificante (2%), el resumen de las corridas de simulación se pueden encontrar en la tabla 21.

**Tabla 21.** Efecto del factor preexponencial de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida.

OXIDACIÓN DEL C10			
Variables de salida	FACTOR PREEXPONENCIAL		
	1.0054E12	3.4054E12 <sup>+</sup>	8.9054E12
Pico de temperatura (° F)	525.70782	527.03467	528.7002
Factor de recobro (fracción)	0.85295665	0.86183226	0.86312205
Tiempo de ruptura (D)	3439.5	3434	3432.2

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

El efecto de la frecuencia de colisión de la oxidación de la fracción pesada del crudo como ya se menciona es significativo, se encontró que los picos de temperatura son proporcionales al factor preexponencial, esto se debe a que un incremento en la frecuencia de colisión incrementa la tasa de consumo de esta reacción exotérmica, por consiguiente una mayor liberación de energía, llevando el modelo a una temperatura superior, en otras palabras, al tener un mayor número de colisiones se incrementara la temperatura del sistema (ver tabla 22).

Respecto a la misma reacción el incremento de la frecuencia de colisión favorece un aumento de temperatura en el sistema para facilitar el craqueo de la fracción pesada, por ende una mayor depositación de combustible sólido, esto trae por consecuencia un incremento en la eficiencia de recuperación del modelo.

**Tabla 22.** Efecto del factor preexponencial de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida.

OXIDACIÓN DEL C36			
Variables de salida	FACTOR PREEXPONENCIAL		
	0.0135E16	0.4035E16 <sup>+</sup>	7.6035E16
Pico de temperatura (° F)	523.87817	527.03467	529.36127
Factor de recobro (fracción)	0.85715312	0.86183226	0.85591239
Tiempo de ruptura (D)	3420.5	3434	3421.75

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Respecto a la frecuencia de colisión de la reacción de craqueo del aceite pesado hay cambios considerablemente pronunciados, en la tabla 23 se aprecia que el pico de temperatura es directamente proporcional a la constante de Arrhenius, esto se debe a que un incremento de las colisiones en esta reacción dará como resultado una mayor cantidad del coque como producto.

Este combustible sólido extra depositado provee una cantidad de calor extra la cual hace que todo el comportamiento térmico del yacimiento aumente, este incremento de temperatura trae consigo menores viscosidades, otorgando mayor movilidad a los fluidos de interés es por esto que la recuperación de hidrocarburos es más eficiente bajo este escenario, obteniendo un mayor factor de recobro, como también mayor velocidad del frente de combustión haciendo que los tiempos de ruptura sean más cortos.

**Tabla 23.** Efecto del factor preexponencial de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida.

CRAQUEO DEL C36			
Variables de salida	FACTOR PREEXPONENCIAL		
	0.20E7	2.70E7 <sup>+</sup>	7.40E7
Pico de temperatura (° F)	529.98956	527.03467	544.47003
Factor de recobro (fracción)	0.84592766	0.86183226	0.88904685
Tiempo de ruptura (D)	3443.1	3434	3438.2

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

El efecto de la frecuencia de colisión en la reacción de oxidación de coque es insignificante para el caso presentado, se puede concluir que este parámetro no tiende a ser representativo para el desempeño del proceso CIS en campo (ver tabla 24).

**Tabla 24.** Efecto del factor preexponencial de la reacción de combustión del coque sobre las variables de salida.

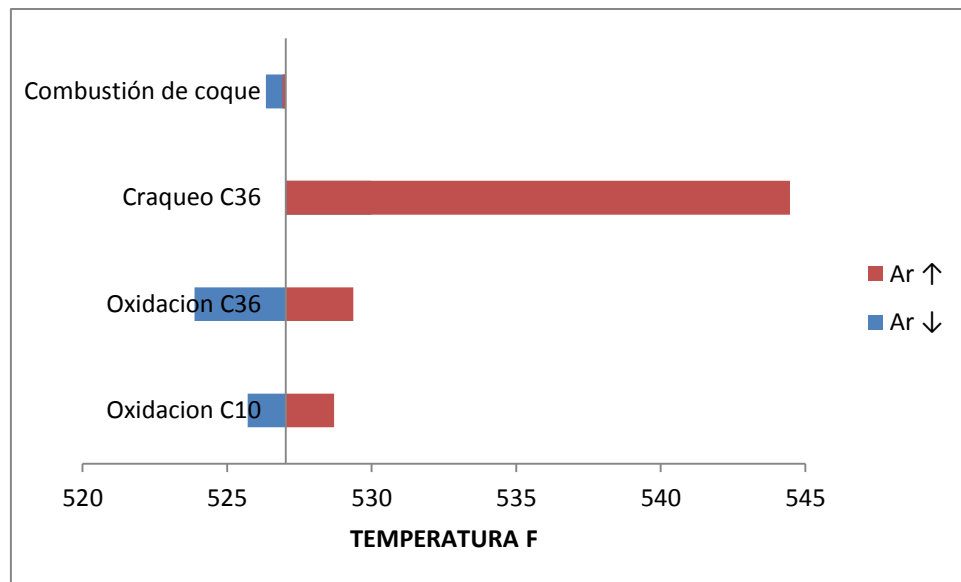
COMBUSTIÓN DEL COQUE			
Variables de salida	FACTOR PREEXPONENCIAL		
	0.50E8	1.0E8 <sup>+</sup>	9.40E8
Pico de temperatura (° F)	526.34351	527.03467	526.9187
Factor de recobro (fracción)	0.85705245	0.86183226	0.86262137
Tiempo de ruptura	3439.5	3434	3432.1

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

A manera de resumen se encuentra a continuación un diagrama de influencia de la frecuencia de colisión sobre los picos de temperatura, confirmando lo previamente mencionado (ver figura 74).

**Figura 74.** Diagrama de influencia de la frecuencia de colisión de cada reacción sobre los picos de temperatura.



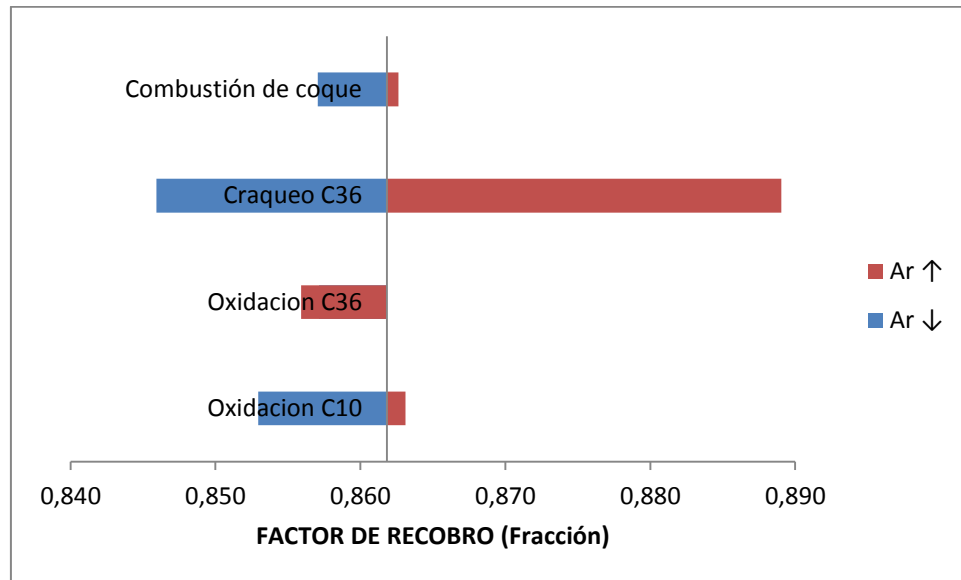
Fuente. El autor.

En este diagrama de influencia salta a la vista la sensibilidad del modelo frente al cambio de la frecuencia de colisión de la reacción de pirólisis, esto se debe que la relación proporcional entre el factor preexponencial y la tasa de reacción hace que se tenga una mayor depositación de combustible sólido (coque), al aumentar la cantidad de combustible disponible, el modelo estará sometido a un incremento de temperatura ocasionado por el tiempo extra que se requiere para consumir el coque incremental (ver figura 74).

Sintetizando los resultados del efecto de la frecuencia de colisión sobre la eficiencia del proceso en el siguiente diagrama de influencia (figura 75), los resultados corroboran la optimización del proceso frente al incremento del factor preexponencial de la reacción de pirólisis, esto se debe a que el incremento de temperaturas que experimenta el modelo con la variación de este parámetro

permite mejorar las movilidades del fluido de interés optimizando el vaciamiento del yacimiento.

**Figura 75.** Diagrama de influencia de la frecuencia de colisión de cada reacción sobre la eficiencia de recobro.



Fuente. El autor.

Respecto al estudio realizado se puede concluir que las frecuencias de colisión de las reacciones de oxidación de las fracciones pesadas y de pirolisis juegan un rol importante en el proceso de combustión in situ.

#### 4.5.2 Efecto de las energías de activación

Como ya se mencionó las energías de activación es esa energía mínima que se requiere para convertir los reactivos en productos, existe mucha incertidumbre cuando este parámetro toma valores muy bajos haciendo que la teoría del estado de transición presente inconsistencias, provocando que se obtengan productos de una reacción aun cuando las moléculas no se encuentren en una dirección preferente de colisión.

Las frecuencias de colisión y energías de activación hacen parte de la ecuación de Arrhenius y perturban el modelo de manera proporcional y exponencial

respectivamente, por esta razón, se espera tener resultados más pronunciados en las variables de salida seleccionadas en este estudio de sensibilidad de la energía de activación.

El efecto de la energía de activación de la reacción de oxidación del C10 es inversamente proporcional sobre los picos de temperatura y el factor de recobro, esto se debe a que cuando se reduce la energía de activación se da acceso a que se generen los gases de combustión propuestos por la estequiometría de esta reacción, dado este excedente de productos (especialmente CO<sub>2</sub>) incrementa la temperatura del modelo, como también existe una mayor probabilidad de que se disuelva con el hidrocarburo y reduzca su viscosidad, esto provoca un aumento de su movilidad generando como variable de salida un factor de recobro más alto y viceversa (ver tabla 25).

**Tabla 25.** Efecto de la energía de activación de la reacción de oxidación de las fracciones ligeras sobre las variables de salida.

OXIDACIÓN DEL C10			
Variables de salida	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN(BTU/lb mol)		
	20000	32785 <sup>+</sup>	50000
Pico de temperatura (° F)	557.36688	527.03467	524.4292
Factor de recobro (fracción)	0.88087666	0.86183226	0.85214472
Tiempo de ruptura (D)	3467	3434	3431

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Con la energía de activación de la reacción de oxidación del C36 se aprecia un comportamiento similar, mostrando claramente que una reducción de este parámetro aumenta el pico de temperatura, pero que un incremento de la energía de activación no altera de manera significativa el proceso de combustión in situ

(ver tabla 26), esto se debe a que para esta reacción se restringe la facilidad de reacción, sin embargo al no ser alterada la variable de salida indica que los suministros de calor provienen de otra reacción.

**Tabla 26.** Efecto de la energía de activación de la reacción de oxidación de las fracciones pesadas sobre las variables de salida.

OXIDACIÓN DEL C36			
Variables de salida	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN(BTU/lb mol)		
	20000	32785 <sup>+</sup>	50000
Pico de temperatura (° F)	530.59619	527.03467	526.52826
Factor de recobro (fracción)	0.85961926	0.86183226	0.85489058
Tiempo de ruptura (D)	3411	3434	3430

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

Para el craqueo de C36 se aprecia un comportamiento inversamente proporcional cuando se disminuye ya energía de activación, sin embargo cuando se aumenta el pico de temperatura tiende a permanecer (inalterado), cabe resaltar que es mucho más sensible cuando se disminuye la energía de activación ya que aumenta la tasa de consumo de la reacción de craqueo, provocando mayores cantidades molares en los productos de la reacción, trayendo consigo mayores depositaciones de combustible sólido, este último provoca que los picos de temperatura incrementen como se aprecia en la tabla 27.

**Tabla 27.** Efecto de la energía de activación de la reacción de craqueo de aceite pesado sobre las variables de salida.

CRAQUEO DEL C36			
Variables de salida	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (BTU/lb mol)		
	53800	55800 <sup>+</sup>	70000
Pico de temperatura (° F)	542.0929	527.03467	527.00671
Factor de recobro (fracción)	0.88724869	0.86183226	0.84701622
Tiempo de ruptura (D)	3424.1	3434	3467.5

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

**Tabla 28.** Efecto de la energía de activación de la reacción de combustión del coque sobre las variables de salida.

COMBUSTIÓN DEL COQUE			
Variables de salida	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (BTU/lb mol)		
	16000	23900 <sup>+</sup>	27900
Pico de temperatura (° F)	527.18555	527.03467	526.82996
Factor de recobro (fracción)	0.8614729	0.86183226	0.86035877
Tiempo de ruptura (D)	3436	3434	3441

<sup>+</sup> Caso de estudio original

Fuente. Tomado y modificado de Result Viewer Module – ECLIPSE Office 2011.2.

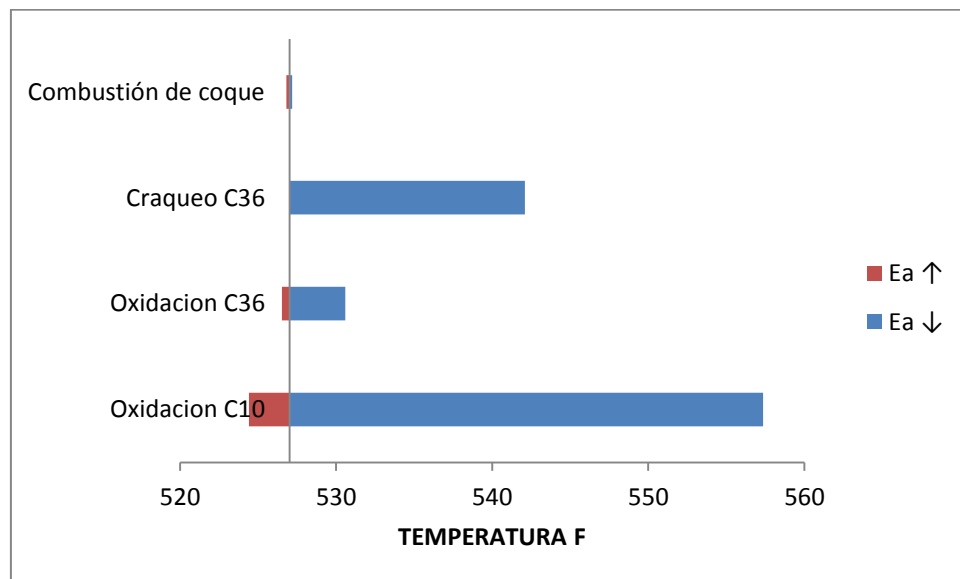
Respecto a la energía de activación de la oxidación del coque, los cambios en las variables de salida no fueron significativos (tabla 28), esto se debe a que al activar la reacción en un umbral de energía menor no indica que dicha reacción tenga un

aporte significativo en el suministro de energía en forma de calor al medio, en otras palabras es una reacción exotérmica y su entalpía no es predominante sobre las demás reacciones.

En síntesis analizando las energías de activación sobre las reacciones predominantes en el modelo, se analizan a continuación en un diagrama de influencia respecto al modelo base (2D ajustado).

Acá se encuentra una representación más clara del efecto de la energía de activación sobre los picos de temperatura (figura 76), se aprecia en primera instancia que energías de activación altas da como resultado picos de temperatura por debajo del modelo base o en su defecto despreciable, pero para  $E_a$  bajas el umbral de activación es menor, otorgando a la reacción mayor facilidad a que se generen los productos, por tratarse de reacciones exotérmicas implícitamente se está relacionando la entalpía de la reacción, ese calor liberado trae como consecuencias aumentos de temperatura.

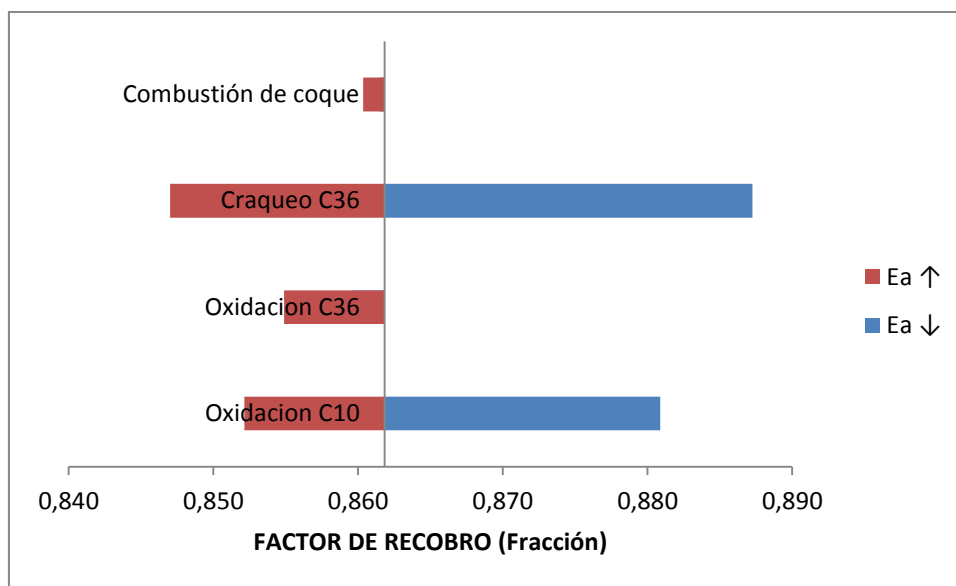
**Figura 76.** Diagrama de influencia de la energía de activación de cada reacción sobre los picos de temperatura.



Fuente. El autor.

Por otra parte en el siguiente diagrama se ve la influencia de la energía de activación sobre el factor de recobro (figura 77), pudiendo visualizar que la relación entre estos dos parámetros es inversamente proporcional, dando como resultado que las reacciones con menor entalpía (oxidación del C36 y coque) no producen resultados significativos, en otra instancia la energía de activación de la reacción de craqueo fue la más representativa, esto se debe a que este umbral de activación va directamente relacionado con la tasa de reacción, relacionando directamente la tasa de coque depositado, otorgando mayores temperaturas, por ende, mayores movilidades del fluido de interés que se ve representado con mayores eficiencias de recobro en el proceso.

**Figura 77.** Diagrama de influencia de la energía de activación de cada reacción sobre la eficiencia de recobro.



Fuente. El autor.

Se puede apreciar que con una ligera variación de la energía de activación de la reacción de craqueo de la fracción pesada se obtienen cambios drásticos en las variables de salida, esto se debe a que esta reacción va directamente relacionada con la cantidad de coque depositado que al final del proceso que se busca es quemarlo, al tener mayor disponibilidad de este combustible se tendrá un frente de combustión más estable, permitiendo tener mejores eficiencias de recuperación,

como también mejoras en la calidad de crudo ya que mayor cantidad de fracciones pesadas están siendo consumidas en fondo, dando como resultado un fluido de producción más rico en componentes livianos.

## **RESUMEN CUALITATIVO**

Ya para finalizar se presenta una tabla con un resumen en términos cualitativos de la influencia de los parámetros de estudio sobre las características de desempeño del proceso de combustión in situ (ver tabla 29).

La estabilidad del frente de combustión se obtiene en el momento que se pueda tener un control y monitoreo de los picos de temperatura este a su vez está directamente relacionado con la capacidad de depositación de combustible sólido en el yacimiento, sin embargo, este último es fuertemente dependiente por el tiempo de permanencia del hidrocarburo en el yacimiento que puede ser controlado con la velocidad del frente de combustión.

La velocidad de avance del frente de combustión otorgaba una estabilidad al mismo, además de eso la forma más clara para visualizarla era en el tiempo la producción de agente oxidante por los pozos de producción que finalmente son la forma más directa de apreciar los problemas de canalización ocasionados por el overriding.

Tabla 299. Resumen cualitativo de los parámetros de estudio sobre los procesos de combustión in Situ.

Propiedad	Variable de salida	PICO DE TEMPERATURA	FACTOR DE RECOBRO	TIEMPO DE RUPTURA	VELOCIDAD DEL FRENTE	CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub>
↑ POROSIDAD	↑	↑↑↑	→	↑↑↑	↓↓↓	-
↑ BUZAMIENTO	↑	↑↑↑	↓↓↓	↑↑↑	↓↓↓	-
↑ PERMEABILIDAD ABS	↓	↓	↑	↑	--	-
↑ VISCOSIDAD	↑	↑↑	↓↓↓	↑↑	↓↓	-
↑ TASA DE INYECCIÓN	--	--	↑↑	↓↓↓	↑↑↑	-
↑ TEMPERATURA DE INYECCIÓN	↑	↑↑	↑	--	--	-
↑ CONCENTRACIÓN DE OXIGENO	↑	↑↑↑	↑↑↑	↓↓↓	↑↑↑	↑↑↑
↑ BHP	↑	↑↑↑	↓↓	↑↑↑	↓↓↓	-
↓ CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	↓	↑↑↑	↓↓	↓	--	-
↑ ENTALPIAS DE REACCIÓN*	↑	↑↑↑	↑↑	--	--	-
↑ FACTOR PRE-EXPONENCIAL**	↑	↑↑↑	↑↑↑	--	--	-
↑ ENERGÍA DE ACTIVACIÓN***	↓	↓↓↓	↓↓↓	--	--	-

Fuente. El autor.

## CONCLUSIONES

Analizando el modelo bidimensional se puede considerar el impacto de la segregación de los fluidos sobre las características de desempeño del proceso, permitiendo visualizar los problemas de canalización que traen consigo una reducción en la eficiencia de recuperación de crudo, debido a la inestabilidad del frente de combustión por la estratificación, generando una producción de agente oxidante a tiempos menores, impidiendo que reaccionen con el fluido remanente.

El pico de temperatura es función de la cantidad de combustible disponible y este está directamente influenciado por el tiempo de permanencia del hidrocarburo en el yacimiento que puede ser controlado con la velocidad del frente de combustión.

El esfuerzo computacional, en términos de tiempo, fue más elevado en el modelo 2D debido al mayor número de cálculos que se realizan, esto se debe a que hay un mayor número de bloques, también se pudo encontrar que las zonas que requieren mayor tiempo de cómputo corresponden a un rango que coincide con los tiempos delimitados desde el inicio de la ignición del frente de combustión en la primer celda hasta el tiempo de ruptura, concluyendo que el esfuerzo computacional se centra donde se ejecutan las reacciones HTO.

Evaluando el efecto de las propiedades del yacimiento sobre el desempeño del proceso CIS, a fin de encontrar como las condiciones estáticas contribuyen de manera implícita al incremento de la eficiencia del mismo, se encontró que altas porosidades trae consigo mayor cantidad de crudo y combustible disponible en el yacimiento, por ende perfiles térmicos más elevados. Respecto al buzamiento se encontró que estructuras con inclinaciones por debajo de la horizontal da por resultado un frente más estable, más veloz y más uniforme en todos los estratos mitigando problemas de canalización.

Apreciando el efecto de los parámetros hidrodinámicos se encontró que, cuando el yacimiento es más heterogéneo se mitigan los problemas de canalización por segregación gravitacional, favoreciendo un frente de combustión más estable, uniforme y lento con una eficiencia de barrido superior, dado que la restricción de flujo en las zonas de canalización aumenta y reduce la velocidad por obstrucción del banco de fluidos que van delante.

Evaluando el efecto de la viscosidad de la fracción pesada modelada con la ecuación de Andrade, permite concluir que un incremento en la constante de Andrade  $A$  da como resultado un modelo con menor movilidad, menor eficiencia de desplazamiento y mayor restricción de flujo reduciendo velocidad en el frente de combustión.

Analizando los resultados obtenidos en las variables de salida, se puede apreciar que la velocidad del frente de combustión está fuertemente relacionada de forma proporcional con la tasa de inyección de aire. Una tasa excesivamente alta o baja puede extinguir la llama del frente, por esto se debe calibrar este parámetro operativo de tal manera que incremente la eficiencia de barrido, manteniendo un frente estable sin que genere problemas de canalización de forma abrupta.

Inspeccionando el efecto de la concentración del agente oxidante se encontró que va directamente relacionada a la composición del  $\text{CO}_2$  producido y está a su vez está asociada a un régimen de temperaturas que permite definir el tipo de reacción que predomina en el modelo, para el caso original da como resultado una composición dentro del rango convencional correspondiente a régimen de temperaturas HTO. Sin embargo cuando se baja la concentración de oxígeno las reacciones que predominan en el modelo son tipo ITO-LTO, esto da un aviso de que el proceso tiene un pobre quemado en el yacimiento. Por otra parte cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  incrementa, se localiza en un régimen de temperaturas donde se establece el quemado de compuestos pre-oxidados.

Evaluando la conductividad térmica de la formación se vio inversamente relacionada con la calidad del fluido de producción, ya que bajas conductividades térmicas favorecen los procesos de upgrading, porque presentan menores pérdidas de calor hacia los alrededores haciendo que las reacciones sobrepasen de manera más fácil los umbrales de activación, por la cantidad de energía que el medio almacena, incrementando la tasa de reacción y obteniendo mayores cantidades de combustible sólido disponible, arrojando en la cromatografía del fluido de producción mayores composiciones de fracciones livianas y menores de las fracciones pesadas.

La entalpía de la oxidación del crudo pesado fue el parámetro térmico más sensible comparado con el efecto que producen las entalpías de las otras reacciones, esta perturbación significativamente elevada se dio ya que la composición del fluido era 98% fracción pesada de C36, ya que esta reacción es de tipo exotérmica, el calor liberado genera escenarios más eficientes para el desempeño del proceso CIS donde se obtienen mejores eficiencias de barrido y perfiles térmicos más elevados.

La frecuencia de colisión que genera mayores efectos sobre el desempeño del proceso CIS corresponde a la reacción de pirólisis. El incremento de las colisiones aumenta la tasa de reacción, por tal razón mayores depositaciones de combustible sólido (coque) hacen que el modelo esté sometido a un incremento de temperatura, ocasionado por el tiempo extra que se requiere para consumir el coque incremental, permitiendo mejorar la movilidad del fluido de interés optimizando el vaciamiento del yacimiento.

Evaluando el umbral de activación se encontró una relación inversamente proporcional con los picos de temperatura. Este parámetro controla la facilidad para que la reacción genere los productos estequiométricos, cuanto menor sea la energía de activación, más fácil se crearan dichos productos, el calor liberado por

esta reacción exotérmica traerá como consecuencias mejoras en la eficiencia de recuperación y aumentos de temperatura.

El estudio exhaustivo de los parámetros de entrada se realizó con el fin de obtener una respuesta de la influencia de datos de construcción del modelo, que estarían disponibles en escenarios reales, probando la complejidad de los modelos sobre el rendimiento del proceso de combustión in situ.

## RECOMENDACIONES

A partir de la cantidad de información suministrada para la construcción del modelo, se podría desarrollar más adelante un estudio de sensibilidad dirigido a enmallados 3D, con el fin de cuantificar el riesgo que existe cuando se tiene en cuenta la eficiencia areal, observando la influencia directa sobre la estabilidad del frente de combustión estudiando los problemas de digitación ocasionados por la heterogeneidad del yacimiento teniendo en cuenta la variación tridimensional.

Realizar el mismo estudio del efecto de los parámetros estáticos, hidrodinámicos, operacionales, térmicos y cinéticos sobre las características de desempeño del proceso CIS teniendo en cuenta los fenómenos capilares donde se estudie la influencia de las zonas de transición entre fases sobre la estabilidad del frente de combustión.

Se propone la realización de un estudio de análisis financiero bajo los resultados obtenidos en este proyecto para cada escenario, donde se obtenga de manera detallada la rentabilidad del proceso de combustión in situ, teniendo en cuenta la inversión inicial los costos durante la operación y finalmente la utilidad neta, con el fin de hacer una evaluación financiera donde se encuentre la Tasa Interna de Retorno (TIR), el tiempo de repago (Payback) y relación costo beneficio de los procesos CIS en campo.

Con este proyecto se encontró una gran sensibilidad sobre el desempeño del proceso frente a la concentración de agente oxidante en el fluido de inyección, sería importante estudiar de forma detallada la influencia de la concentración de oxígeno durante la construcción de este tipo de modelos CIS dado el alto grado de reactividad de este compuesto con el combustible in situ.

Sería importante observar las características de desempeño del proceso CIS bajo nuevos escenarios de inyección, para que la combustión sea inducida por medio de calentadores o inyección de gas de purga, a fin de acelerar el proceso y alcanzar de manera pronta las condiciones térmicas necesarias para que ocurran las reacciones.

En vista que ECLIPSE carece de una Keyword para visualizar la temperatura máxima promedio del sistema, se propone programar una UDQ, donde permita tener esta variable de salida con el objetivo de poder hacer el ajuste térmico con este parámetro.

Una vez identificados los parámetros más influyentes sobre el proceso CIS en este proyecto, crear modelos con mayores heterogeneidades y anisotropías para poder usar las características físicas del yacimiento, condiciones operativas y cinéticas para finalmente establecerlas configuraciones apropiadas para tener un frente de combustión estable en el modelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABU-KHAMSIN, S.A., W.E. BRIGHAM, AND H.J. RARNSEY, 1988. "Reaction Kinetics of Fuel Formation for In-Situ Combustion", SPE November pp. 1308-16.
- ADEGBESAN, KO., J.K. DONNELLY, R.G. MOORE, AND D.W. BENNION. 1987. "Low Temperature Oxidation Kinetic Parameters for In-Situ Combustion Numerical Simulation". Soc. of Petroleum Engineers I, Vol. 2, No. 4, November, pp. 573-582.
- ALEXANDER, J.D., W.L. MARTIN, AND J.N. DEW. 1962. "Factors Affecting Fuel Availability and Composition During In-Situ Combustion", J. Petroleum Tech. Vol, 14, No. 10, October, pp. 1 156-1 164.
- ALI, F:S:M:, "Multiphase, Multidimensional Simulation Of In Situ Combustion", SPE 6896, 52<sup>nd</sup> annual technical conference an exhibition, 1977.
- AL-SAADON, F.T. 1970. "An Experimental and Statistical Study of Residual Oil Saturation After Gas, Water, and Steam Drive and Fuel Availability for the In-Situ Combustion Process", University of Pittsburg, Pennsylvania.
- BABU, D.R. AND D.E. CORMACK, 1984. "Effect of Low Temperature Oxidation on the Composition of Athabasca Bitumen Fuel". Vol. 63, June. pp. 858-861.
- BAENA, C.J., L.M. CASTANIER, AND W.E. BRIGHAM. 1990. "Effect of Metallic Additives on In Situ Combustion of Huntington Beach Crude Experiments". U.S. DOE Report Number DOE/BC/14126-26, August.
- BOUSAID, I.S. AND H.J. RAMSEY, Jr. 1968." Oxidation of Crude Oils in Porous Media". SPE Journal, Vol. 8, No. 3, June, pp. 137-148.
- BURDON, C. AND C. GADELLE, 1977. "Essaide de LaboraroirePour L' Etude de la Combustion In-Situ". Paper Presented at the French Sovient Symposium on Enhanced Oil Recovery, Moscow, May.
- BURGER, J.,"Chemical Aspects Of In-Situ Combustion- Heat Of Combustion And Kinetics", Soc. Pet. Eng. Journal, Vol. 12, No. 5, October.

- BURGER, J.G. AND B.C. SAHUQUET. 1972. "Chemical Aspects of In-Situ Combustion - Heat of Combustion and Kinetics". SPE. J. Vol. 12, No. 5.
- CASTANIER, L.M.,2002, "Upgrading Of Crude Oil Via In Situ Combustion", Stanford University, Journal of petroleum science and engineering, p 125-136.
- CLARA, G., "Laboratorio Química Física I", Universidad de Valencia, Open CourseWare, 2009-2010.
- COAST, K.H., "In Situ Combustion Model", SPE 8394.
- CROOKSTON,H:B:, "Numerical Simulation Model Form Thermal Recovery Processes", SPE feb 1979 37-58, AIME 267.
- CURTIS, J.H. 1989, "Performance Evaluation of the MOCO T In-Situ Combustion Project, Midway-Sunset Field", Paper SPE 18809-MS.
- DABBOUS, M.K. AND P.F. FULTON. 1974. "Low Temperature Oxidation Reaction Kinetics and Effects on the In-Situ Combustion Process". SPE. J., Vol. 14, No. 3, June. pp. 253- 62.
- DE LOS RIOS, C.F., W.E. BRIGHAM, AND L.M. CASTAMIER, 1988. "The Effect of Metallic Additives on the Kinetics of Oil Oxidation Reactions in In-Situ Combustion", US. DOE Report DOE/BC/1412&4 (DE 88001248) November.
- DRICI, Q. AND S. VOSSOUSHI, 1985. "Study of the Surface Area Effect on Crude Oil Combustion by Thermal Analysis Techniques". J. Pet. Tech. Vol. No. 4, April.
- ECLIPSE Technical Description, chapter 10 of Chemical Ractions, Examples For Combustion, pag 165.
- EYRING, H.; Journal of Chemical Physics, 1935, 3, 107-115.
- FASSIHI, M.R. AND W.E. BRIGHAM, 1982. Analysis of Fuel Oxidation in In-Situ Combustion Oil Recovery. U.S. DOE Report, DOE/ET/12056-26. August.
- FASSIHI, M.R., W.E. BRIGHAM, AND H.J. RAMSEY JR. 1984. "Reaction Kinetics of In-Situ Combustion". Soc. of Pet. Eng. J. Vol. 24, No. 4.

- HOLT, R.J. 1992. "In-Situ Combustion with Metallic Additives ",U.S. DOE Report No. DOE/BC/14600-29 (DE-92001057), July.
- HUGHES, R., V.M. KAMATIN, AND D. PRICE. 1987. "Kinetics of In-Situ Combustion for Oil Recovery", Chem. Eng. Dev. Vol. 65, No. 1, January.
- ISLAM, M.R., A. CHAKMA, AND S.M. FAROUQ ALI. 1989. "State of the Art of In-Situ Combustion Modeling and Operations". SPE Paper 18755 Presented at the California Regional Meeting, Bakersfield, California.
- KUMAR, M.; "Simulation Of Laboratory In-Situ Combustion Data And Effect Of Process Variations", SPE 16027.
- LIN, C.Y., W.H. CHEN, AND W.E. CULHAM, 1984. "New Kinetic Models for Thermal Cracking of Crude Oils in In-Situ Combustion Process". SPE 13074.
- MAMORA, D.D.," New Findings in Low-Temperature Oxidation of Crude Oil", Conference Paper, Texas A&M U., SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, 20-22 March 1995, Kuala Lumpur, Malaysia, 29324-MS.
- MAJERRISON D.M, FASSIHI M.R, A Procedure For Scaling Heavy Oil Combustion Tube Results To A Model Field, SPE/DOE 24175, pag 193.
- MASEL, R. Principles of Adsorption and Reactions on Solid Surfaces; Wiley, New York, 1996.
- MOORE R.G. 1997." Observations and Design Considerations For In Situ Combustion Projects". University of Calgary.
- MOORE, R.G. 1993. "New Strategies for In-Situ Combustion". J. Can Pet. Tech., Vol. 32, No. 10, December, pp. 11-13.
- MOSCHOPEDIA, S.E. AND J.G. SPEIGHT 1975. "Oxidation of a Bitumen Fuel", Vol. 54, July. pp. 210-12.
- N. JIA, R.G. MOORE, S.A. MEHTA, M.G. URSENBACH," Kinetic Modelling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reactions",University of Calgary, Journal of Canadian Petroleum Technology.

- National Institute for Petroleum and Energy Research, “Enhanced Oil Recovery Information” Bartlesville, Oklahoma, April 1986 revised edition, pag 23.
- OLIVEROS, L., Determinación De Parámetros De Diseño Y Evaluación Técnica De Procesos De Combustion In Situ A Partir De Pruebas De Tubo De Combustion, trabajo de grado Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2011.
- OSORIO, G. “Simulación Numérica de Yacimientos. Capítulo 2: Ecuaciones Fundamentales De Flujo En Medios Porosos”. 2002, pag. 10.
- PALACIO, O.Carlos.,” Evaluación De Yacimientos Prospectos Para La Implementación De Procesos De Combustion In Situ Mediante Analogías”, trabajo de grado UIS, Bucaramanga 2010, pag 37.
- PALMA, J.M., Apuntes clase de recobro mejorado, 5ª presentación pag 6, UIS 2012, I semestre.
- RODRIGUEZ, J.R. 2005, “Analytical Model Of The Combustion Zone In Oxygen Enriched In Situ Combustion Tube Experiments”, paper presented at the petroleum societies 6<sup>th</sup> Canadian international petroleum conference, Calgary, Alberta Canada, paper 2005-072.
- SANTAFÉ, E., “In-Situ Combustion and Chemical Reactions with ECLIPSE”, Schlumberger SIS Training Course, Houston 2011.
- SARATHI P.; In Situ Combustion Handbook - Principles and practice; Libro U.S. Department of Energy, 1999.
- SCARBOROUGH, R.M. AND G.V. CADY, 1982, “The Design and Installation of an Oxygen Supported In-Situ Combustion Project in Meyer”, R.F., Editors: The Future of Heavy Oil and Tar Sands. Proceedings of second (UNITAR) International Conference on Heavy Oil and Tar Sands. Maracaibo, Venezuela.
- SEVERIN, D., O. GLINZER, H. KILLESREITER, AND H.J. NEWMAN, 1983. “The Quiet Oxidation of a Crude Oil and the Effect on its Viscosity”. Erdol and Kohl-Erdgas, Vol. 36, No. 3, March. pp. 127-130.

- SHALLCROSS, D.C. 1989. "Modifying In-Situ Combustion Performance by the Use of Water Soluble Additives". Paper SPE 19485 Presented at the SPE Asia-Pacific Conference. Sydney, Australia, September.
- TANABE, K. 1970." Solids Acids and Bases - Their Catalytic Properties", New York.
- TINGAS, J.1996, "Field Scale Simulation Study Of In Situ Combustion In High Pressure Light Oil Reservoirs", University of Bath, UK, Paper SPE 35395.
- URSERNBACH MATTHEW G. An overview of laboratory in situ Combustion behaviour of Athabasca oil sands. The University of Calgary. 1992. P. 74.
- VENUTO, P.B. AND E.T. HABIB, JR. 1979. "Fluid Catalytic Cracking with Zeolite Catalysts". Merrell Dekker Inc., New York.
- VOSSOUGH, S., G. WILLHITE, Y. EL SHOUBARY, AND G. BARTLETT, 1983. "Study of the Clay Effect on Crude Oil Combustion by Thermogravimetry and Differential Scanning Calorimetry", Vol. 27.
- YATTE, G., Camilo; "Seminario De Combustión In Situ, Curso Recobro Mejorado", Maestría En Ingeniería De Hidrocarburos UIS, 2009.