

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA MATRIZ DE LA ROCA EN LA  
CINÉTICA DE LA COMBUSTIÓN PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DE  
AIRE EN CRUDOS PESADOS**

**MARTA LILIANA TRUJILLO PORTILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2015**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA MATRIZ DE LA ROCA EN LA  
CINÉTICA DE LA COMBUSTIÓN PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DE  
AIRE EN CRUDOS PESADOS**

**MARTA LILIANA TRUJILLO PORTILLO**

**Trabajo de grado presentado para optar por el título de magíster en  
ingeniería de hidrocarburos**

**M. Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO**

**Director**

**Dr. LOUIS CASTANIER**

**Codirector**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **DEDICATORIA**

A Dios, porque es quien hace que todo sea posible en mi vida.

A mi mamita y mi padre, pues gracias a ellos soy lo que soy. Les debo todo en mi vida.

A mi esposo Jose Ricardo Sandoval por ser mi apoyo incondicional y por esta familia llena de amor y felicidad que hemos construido.

A mi hija María Gabriela por darme el privilegio de ser su mamá y darme tanta felicidad.

A mi familia pues son lo más valioso que tengo.

A las cuatro chicas que tuve la fortuna de conocer en este proceso: Danisa, Silvia, Mayra y Cindy. La sufrimos pero la gozamos demasiado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al instituto Colombiano del Petróleo por suministrarme la información necesaria para desarrollar este trabajo.

A mis colegas y amigos del trabajo: Claudia Delgadillo y Jorge Palma por su amistad. Por escucharme y compartir conmigo tantos momentos especiales en el trabajo y fuera de él.

A mis compañeros del trabajo: Jorge Sandoval, Jorge Padilla, Hugo García, Eider Niz, Edwin Rodríguez y Hernando Bottia, por su apoyo técnico y moral durante el desarrollo de la maestría.

Al profesor Samuel Muñoz por su soporte en el desarrollo de este trabajo.

A los doctores Louis Castanier y Claude Gadelle por transmitirme tantos conocimientos y apoyarme técnicamente.

## CONTENIDO

|                                                                                                                                              | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                                           | 19   |
| 1. CONTEXTUALIZACION DE LA INVESTIGACION .....                                                                                               | 21   |
| 1.1 ANTECEDENTES.....                                                                                                                        | 21   |
| 1.2 CONTRIBUCIONES .....                                                                                                                     | 44   |
| 2. INYECCIÓN DE AIRE.....                                                                                                                    | 45   |
| 2.1 SCREENING PARA LA SELECCIÓN DE YACIMIENTOS CANDIDATOS A<br>IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE AIRE.....                                      | 47   |
| 2.2 ESTUDIOS DE LABORATORIO.....                                                                                                             | 48   |
| 2.2.1 Las reacciones.....                                                                                                                    | 49   |
| 2.2.2 Cinética.....                                                                                                                          | 49   |
| 2.2.3 Celda cinética .....                                                                                                                   | 50   |
| 2.2.4 Descripción del equipo.....                                                                                                            | 51   |
| 3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....                                                                                                                  | 54   |
| 3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CELDA CINETICA .....                                                                                        | 64   |
| 3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                                                                                                              | 67   |
| 3.2.1 Oxígeno consumido .....                                                                                                                | 68   |
| 3.2.2 Relación aparente hidrógeno-carbono (H/C), n .....                                                                                     | 73   |
| 3.3 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MUESTRAS DE ARENA<br>SINTÉTICA Y AFLORAMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE<br>CELDA CINÉTICA ..... | 76   |
| 4. AJUSTE NUMERICO DE LAS PRUEBAS DE CELDA CINETICA .....                                                                                    | 78   |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 5. CONCLUSIONES .....   | 87 |
| 7. RECOMENDACIONES..... | 89 |
| BIBLIOGRAFIA.....       | 90 |
| ANEXOS.....             | 93 |

## LISTADO DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Resultados de celda cinética usando arena y carbonato con el mismo tamaño de partícula (mesh 16-18) (Cinar et al, 2011) .....                             | 22 |
| Figura 2. Resultados de celda cinética usando arena mesh 16-18 y 60 (Cinar et al, 2011).....                                                                        | 23 |
| Figura 3. Resultados de celda cinética para la mezcla homogénea (caso base) (Fadaei et al, 2011).....                                                               | 24 |
| Figura 4. Resultados de la celda cinética para la mezcla de carbonato (Fadaei et al, 2011).....                                                                     | 25 |
| Figura 5. Resultados de celda cinética para el núcleo consolidado (Fadaei et al, 2011).....                                                                         | 26 |
| Figura 6. Resultados de celda cinética para los fragmentos de núcleo (Fadaei et al, 2011).....                                                                      | 27 |
| Figura 7. Resultados de celda cinética para la mezcla de arena + caolinita y matriz original triturada (Awoleke, 2007) .....                                        | 28 |
| Figura 8. Resultados de celda cinética para la mezcla arena + arcilla (Mamora, 1995).....                                                                           | 29 |
| Figura 9. Resultados de celda cinética usando solo arena (Mamora, 1995) .....                                                                                       | 30 |
| Figura 10. Resultados de celda cinética usando caliza triturada (Bagci et al, 1987) .....                                                                           | 32 |
| Figura 11. Resultados de celda cinética usando arena ottawa (Bagci et al, 1987) .....                                                                               | 32 |
| Figura 12. Relación molar $\text{CO}_2/\text{CO}$ y $\text{H/C}$ para el crudo del campo Ramán utilizando caliza triturada y arena ottawa (Bagci et al, 1987) ..... | 33 |
| Figura 13. Resultados de celda cinética usando mezcla de arena + arcilla (Fassihi, 1981).....                                                                       | 34 |
| Figura 14. Resultados de celda cinética usando matriz original (Fassihi, 1981).....                                                                                 | 35 |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15. Relación molar $\text{CO}_2/\text{CO}$ para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981) .....               | 36 |
| Figura 16. Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981) .....  | 36 |
| Figura 17. Composición del gas vs tiempo para el crudo san Ardo (arena + arcilla). Presión promedio = 550 kPa (Fassihi, 1981) .....                                                | 38 |
| Figura 18. Composición del gas vs tiempo para el crudo san Ardo (arena). Presión promedio = 690 kPa (Fassihi, 1981) .....                                                          | 38 |
| Figura 19. Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo del campo San Ardo utilizando empaquetamiento de arena y matriz original (Fassihi, 1981).....         | 39 |
| Figura 20. Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Bardon y Gadelle, 1977)..... | 41 |
| Figura 21. Resultados de celda cinética usando arena limpia (Burger y Sahuquet, 1972).....                                                                                         | 42 |
| Figura 22. Resultados de celda cinética usando matriz natural (Burger y Sahuquet, 1972).....                                                                                       | 43 |
| Figura 23. Proceso de inyección de aire .....                                                                                                                                      | 47 |
| Figura 24. Herramientas para la evaluación del potencial de un yacimiento para la implementación de inyección de aire .....                                                        | 48 |
| Figura 25. Perfil típico de producción de gases y consumo de oxígeno para una prueba de celda cinética .....                                                                       | 50 |
| Figura 26. Celda cinética Instituto Colombiano del Petróleo.....                                                                                                                   | 51 |
| Figura 27. Detalle de la celda cinética Instituto Colombiano del Petróleo.....                                                                                                     | 52 |
| Figura 28. Esquema general del equipo de celda cinética.....                                                                                                                       | 53 |
| Figura 29. Análisis mineralógico para la muestra de núcleo .....                                                                                                                   | 55 |
| Figura 30. Aspecto y composición de la muestra de núcleo .....                                                                                                                     | 55 |
| Figura 31. Análisis mineralógico para la muestra de afloramiento.....                                                                                                              | 56 |



|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32. Aspecto y composición de la muestra de afloramiento .....                                                                                  | 56 |
| Figura 33. Aspecto y composición de la muestra de núcleo .....                                                                                        | 59 |
| Figura 34. Clasificación de tamaño de grano para la muestra de núcleo .....                                                                           | 59 |
| Figura 35. Aspecto y composición de la muestra de afloramiento .....                                                                                  | 60 |
| Figura 36. Clasificación de tamaño de grano para la muestra de afloramiento .....                                                                     | 61 |
| Figura 37. Aspecto y composición de la muestra de ripios .....                                                                                        | 62 |
| Figura 38. Clasificación de tamaño de grano para la muestra de ripios .....                                                                           | 62 |
| Figura 39. Aspecto y composición de la muestra de arena sintética .....                                                                               | 63 |
| Figura 40. Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con núcleo .....                                                       | 65 |
| Figura 41. Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con afloramiento .....                                                 | 65 |
| Figura 42. Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con arena sintética 1 .....                                            | 66 |
| Figura 43. Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con arena sintética 2 .....                                            | 66 |
| Figura 44. Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con ripios .....                                                       | 67 |
| Figura 45. Consumo de oxígeno para las pruebas de celda cinética realizadas con núcleo, afloramiento, arena sintética y ripios. ....                  | 69 |
| Figura 46. Oxígeno consumido y gases producidos en las pruebas de celda cinética realizadas con matriz afloramiento .....                             | 70 |
| Figura 47. Tasa relativa de consumo de oxígeno en la región de baja temperatura para las pruebas Sintética 1 y sintética 2 .....                      | 72 |
| Figura 48. Oxígeno consumido y gases producidos en las pruebas de celda cinética realizadas con matriz núcleo, afloramiento y arena sintética 2 ..... | 73 |
| Figura 49. Relación aparente H/C para las pruebas de celda cinética realizadas con núcleo, afloramiento, arena sintética y ripios. ....               | 75 |
| Figura 50. Dimensiones de las celdas en el modelo radial .....                                                                                        | 78 |

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 51. Gases de combustión y relación $\text{CO}/\text{CO}_2$ y $\text{O}_2/\text{CO}_2$ para la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....         | 81  |
| Figura 52. Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con núcleo.....                             | 85  |
| Figura 53. Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con afloramiento .....                      | 85  |
| Figura 54. Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con arena sintética 2.....                  | 86  |
| Figura 55. Curvas de permeabilidad relativa sistema agua - aceite.....                                                                                           | 97  |
| Figura 56. Curvas de permeabilidad relativa sistema gas -líquido.....                                                                                            | 97  |
| Figura 57. Gases producidos en la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....                                                                            | 98  |
| Figura 58.Tasa relativa de consumo de oxígeno para la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....                                                        | 99  |
| Figura 59. Curva de Arrhenius para la tasa de reacción de combustión para la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....                                 | 100 |
| Figura 60. Curva de Arrhenius para las tasas de reacción de combustión y depositación de combustible para la prueba de celda cinética realizada con núcleo ..... | 101 |
| Figura 61. Oxígeno consumido en la reacción de baja temperatura.....                                                                                             | 101 |
| Figura 62. Curva de Arrhenius para la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....                                                                        | 102 |

## LISTADO DE TABLAS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas de celda cinética (Cinar et al, 2011) .....   | 22 |
| Tabla 2. Composición del medio poroso en la celda cinética (Fadaei et al, 2011) .....                                                                | 24 |
| Tabla 3. Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Awoleke, 2007) .....                         | 28 |
| Tabla 4. Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Mamora, 1995) .....                          | 30 |
| Tabla 5. Principales propiedades del crudo y empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Bagci et al, 1987) .....                    | 31 |
| Tabla 6. Principales propiedades del crudo y empaquetamientos (Fassihi, 1981) .....                                                                  | 34 |
| Tabla 7. Análisis de tamiz para el empaquetamiento de arena (Fassihi, 1981) .....                                                                    | 34 |
| Tabla 8. Energía de activación para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981) .....    | 37 |
| Tabla 9. Propiedades del crudo del campo San Ardo (Fassihi, 1981) .....                                                                              | 37 |
| Tabla 10. Energía de activación para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Fassihi, 1981) .....          | 39 |
| Tabla 11. Principales propiedades del crudo francés, empaquetamiento de arena y condiciones de operación de la prueba (Bardon y Gadelle, 1977) ..... | 40 |
| Tabla 12. Análisis de tamiz para los diferentes empaquetamientos (Bardon y Gadelle, 1977) .....                                                      | 40 |
| Tabla 13. Energía de activación para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Bardon y Gadelle, 1977) ..... | 41 |
| Tabla 14. Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Burger y Sahuquet, 1972) .....              | 42 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 15. Principales propiedades del crudo de ChichimeneT2 utilizado para realizar las pruebas de celda cinética.....                            | 54 |
| Tabla 16. Análisis petrofísico para las muestras de núcleo y afloramiento.....                                                                    | 57 |
| Tabla 17. Procedimiento de limpieza realizado para las muestras de núcleo, afloramiento y ripios.....                                             | 58 |
| Tabla 18. Cantidades de roca y fluidos utilizadas para preparación de las mezclas .....                                                           | 64 |
| Tabla 19. Condiciones de operación establecidas para las pruebas de celda cinética.....                                                           | 64 |
| Tabla 20. Propiedades del modelo de simulación.....                                                                                               | 79 |
| Tabla 21. Parámetros cinéticos para la prueba de celda cinética realizada con núcleo .....                                                        | 80 |
| Tabla 22. Balances estequiométricos y parámetros cinéticos finales obtenidos del ajuste de la prueba de celda cinética realizada con núcleo ..... | 84 |
| Tabla 23. Conductividades térmicas para los componentes de la mezcla.....                                                                         | 95 |
| Tabla 24. Conductividad térmica de la pared del reactor .....                                                                                     | 96 |
| Tabla 25. Propiedades aceite muerto, muestra CH-44 .....                                                                                          | 96 |

## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                                                                                                 | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ANEXO A. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MEZCLA Y EL REACTOR,<br>MODELO DE FLUIDOS Y CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA<br>UTILIZADAS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN ..... | 93   |
| ANEXO B. MODELAMIENTO DE LAS REACCIONES POR MEDIO DE LA<br>METODLOGÍA FASSIHI .....                                                                             | 98   |

## **RESUMEN**

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA MATRIZ DE LA ROCA EN LA CINÉTICA DE LA COMBUSTIÓN PARA EL PROCESO DE INYECCIÓN DE AIRE EN CRUDOS PESADOS\*

**AUTOR:** MARTA LILIANA TRUJILLO PORTILLO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** INYECCIÓN DE AIRE, EVALUACIÓN EXPERIMENTAL, MATRIZ

### **DESCRIPCIÓN:**

A pesar del éxito económico y técnico obtenido en experiencias de campo mediante la implementación de la inyección de aire, la industria petrolera se ha mostrado renuente a su aplicación por varias razones. Una de ellas, es el elevado número de fracasos que han llevado a la concepción de que su operación en campo es de alto riesgo. Además, durante más de un siglo de su aplicación, diversos autores han desarrollado metodologías analíticas y numéricas para su estudio, sin que se pueda asegurar que son herramientas confiables y precisas para su análisis a nivel de laboratorio y predicción eficiente a nivel de campo.

Una gran variedad de técnicas experimentales, han ratificado la influencia que tiene la roca en el desempeño del proceso, mostrando cambios significativos en el consumo de oxígeno, óxidos de carbono producidos, parámetros cinéticos, entre otros; cuando se varía la matriz de la prueba pero utilizando el mismo crudo y condiciones de operación. Lo anterior, confirma que los mecanismos de la combustión, son en gran parte una función del sistema roca/fluido.

Este trabajo se centra en el estudio de la influencia de la matriz en la cinética de la combustión, a través del análisis de pruebas de celda cinética realizadas para un crudo colombiano, utilizando diferentes tipos de matriz: arena sintética, ripios, afloramiento y núcleo. El objetivo principal es evaluar el uso de empaquetamientos diferentes a la matriz original, para la realización de pruebas de laboratorio, sin perder la representatividad y confiabilidad en los resultados; logrando ahorros significativos de dinero al no tener que utilizar siempre muestras de núcleo del yacimiento. Adicionalmente, se presenta una metodología para el ajuste numérico de pruebas de celda cinética, la cual es el primer paso en la generación de un modelo cinético representativo que permita realizar predicciones confiables a nivel de campo.

\* Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro, Ingeniero de Petróleos.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** EVALUATION OF ROCK MATRIX INFLUENCE IN THE COMBUSTION KINETICS TO THE AIR INJECTION PROCESS FOR A HEAVY OIL

**AUTHOR:** MARTA LILIANA TRUJILLO PORTILLO

**KEYWORDS:** AIR INJECTION, EXPERIMENTAL EVALUATION, MATRIX

### **DESCRIPTION:**

Despite the economic and technical success of a significant number of air injection field developments, the oil industry has been reluctant to its implementation for various reasons. One of them is the high number of failures that have led to the idea that its field operation is high risk. In addition, throughout more than a century of application, several authors have developed analytical and numerical methodologies to study the process, without being able to ensure their reliability and accuracy for laboratory analysis and field level prediction.

A wide variety of experimental techniques, have ratified the rock influence on air injection performance, showing significant changes in oxygen consumption, carbon oxides produced, kinetic parameters, picks of low and high temperature, among others; when the test matrix varies, but using the same oil and operating conditions. This confirms that the mechanisms of combustion are largely a function of rock / fluid system.

This work focuses on the study of matrix influence in combustion kinetics, through the analysis of cell kinetics tests conducted for a colombian crude, using different matrix types: synthetic sand, drill cuttings, outcrop and original matrix. The main objective is to evaluate the use of packings different to the original matrix to perform laboratory tests, without losing the representativeness and reliability of results; making significant savings of money by not using expensive reservoir core samples. In addition, a methodology for matching numerical kinetic cell tests, which is the first step in generating a representative kinetic model to make reliable predictions at the field level, is presented.

\* Research work.

\*\* Faculty of Engineering Phisicochemical Petroleum. Petroleum Engineering School. Director: M. Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Petroleum Engineer.

## INTRODUCCIÓN

A pesar del éxito económico y técnico obtenido en experiencias de campo mediante la implementación de la inyección de aire, la industria petrolera se ha mostrado renuente a su aplicación por varias razones. Una de ellas es el elevado número de fracasos que han llevado a la concepción de que su operación en campo es de alto riesgo. Además, durante más de un siglo de su aplicación, diversos autores han desarrollado metodologías y software para su estudio, sin que se pueda asegurar que son herramientas confiables y precisas para su análisis a nivel de laboratorio y predicción eficiente a nivel de campo.

Para comprender a fondo el proceso de inyección de aire a nivel de laboratorio y campo, es necesario entender diferentes fenómenos físicos, tales como: cambio de fase, transferencia de calor y masa, y reactividad química. Precisamente, es este último fenómeno el que hace de la inyección de aire un proceso único entre los métodos de recobro mejorado. El crudo del yacimiento pasa a través de una serie de transformaciones por el efecto del calor, dejando atrás un residuo carbonoso que alimenta el proceso. La cantidad y la reactividad del coque depositado son controladas por la cinética química<sup>1</sup>.

La complejidad de la cinética radica en la heterogeneidad del reactivo y la influencia de la matriz de la roca en las reacciones. El crudo del yacimiento que reacciona con el oxígeno inyectado, está formado por cientos de componentes hidrocarburos y sería una tarea complicada formular un esquema de reacciones que contemple la oxidación de todos sus componentes. Por otro lado, una gran variedad de técnicas experimentales, han ratificado la influencia que tiene la matriz de la roca en el desempeño del proceso, mostrando cambios significativos en el consumo de oxígeno, óxidos de carbono producidos, parámetros cinéticos, picos de baja y alta temperatura, entre otros, cuando se varía la matriz de la prueba

---

<sup>1</sup> CINAR, Murat. Kinetics of crude-oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 2011.



utilizando el mismo crudo y condiciones de operación. Lo anterior, confirma que los mecanismos de la combustión, son en gran parte una función del sistema roca/fluido.

Por lo tanto, los estudios de laboratorio, ampliamente recomendados antes de implementar un proceso de inyección de aire, deberían ser realizados usando el crudo y la matriz original del yacimiento. Pero, qué tan factible es utilizar siempre matriz original y crudo del yacimiento en la realización de las pruebas de laboratorio?. En cuanto al crudo del yacimiento las dificultades se reducen a la toma, transporte y deshidratación de la muestra. En el caso de la matriz original las dificultades son aún mayores debido al alto costo asociado a un corazonamiento y a la disponibilidad del corazón para realizar pruebas de laboratorio y no otros estudios geológicos. En consecuencia, se hace necesario realizar un estudio cuantitativo del efecto de la matriz de la roca en las pruebas de celda cinética que permita utilizar otros tipos de empaquetamientos si perder la representatividad en los resultados de las mismas.

Este trabajo se centra en el estudio de la influencia de la matriz de la roca en la cinética de la combustión, a través del análisis de pruebas de celda cinética realizadas para un crudo colombiano, utilizando diferentes tipos de matriz: arena sintética, ripios, muestras de afloramiento y matriz original. El estudio comprende la comparación de los resultados a través de: (1) Cálculo de parámetros de la combustión (2) Construcción de modelos de reacciones para cada uno de los sistemas roca/matriz y (3) Ajuste histórico usando de simulación numérica.

## 1. CONTEXTUALIZACION DE LA INVESTIGACION

### 1.1 ANTECEDENTES

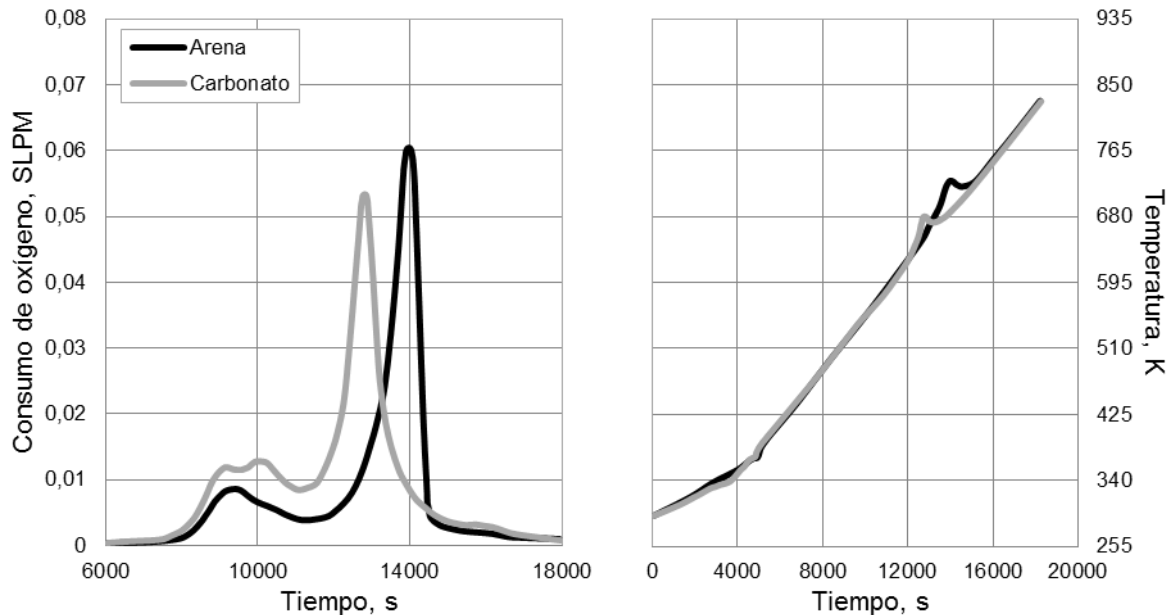
En este capítulo se presenta una compilación de los diferentes estudios de laboratorio que se han realizado a través del tiempo para analizar el efecto de la matriz de la roca en los resultados de las pruebas de celda cinética. La literatura muestra que se han realizado pruebas de celda cinética variando el tipo de matriz y manteniendo las mismas condiciones de operación y fluidos; y en otros casos se adiciona un porcentaje de arcilla, generalmente a la arena ottawa, para analizar el efecto de este componente sobre el desempeño de la prueba. A continuación se presentan en forma cronológica los principales trabajos desarrollados alrededor de este tema:

- Cinar et al (2011)<sup>2</sup> publicaron resultados de dos pruebas de celda cinética (Figura 1) empleando el mismo aceite y dos empaquetamientos diferentes: arena y matriz original del yacimiento, compuesta de magnesio y carbonatos de calcio, ambos con el mismo tamaño de grano (mesh 16-18). Los resultados mostraron que las reacciones de baja temperatura iniciaban a aproximadamente a la misma temperatura; sin embargo, el consumo de oxígeno fue más grande en la prueba con el carbonato (matriz original) comparado con la prueba realizada con arena. En cuanto a las reacciones HTO, estas iniciaron a una temperatura más baja para el carbonato. En la Tabla 1 se presentan las principales propiedades del crudo y empaquetamientos, así como las condiciones de operación de las pruebas.

---

<sup>2</sup>CINAR, M, *et al.* Predictability of crude oil in-situ combustion by the isoconversional kinetic approach. En: SPE Journal. Septiembre, 2011.pp 545.

**Figura 1.** Resultados de celda cinética usando arena y carbonato con el mismo tamaño de partícula (mesh 16-18) (Cinar et al, 2011)



**Fuente:** Editada de: CINAR, M, et al. Predictability of crude oil in-situ combustion by the isoconversional kinetic approach. En: SPE Journal. Septiembre, 2011.

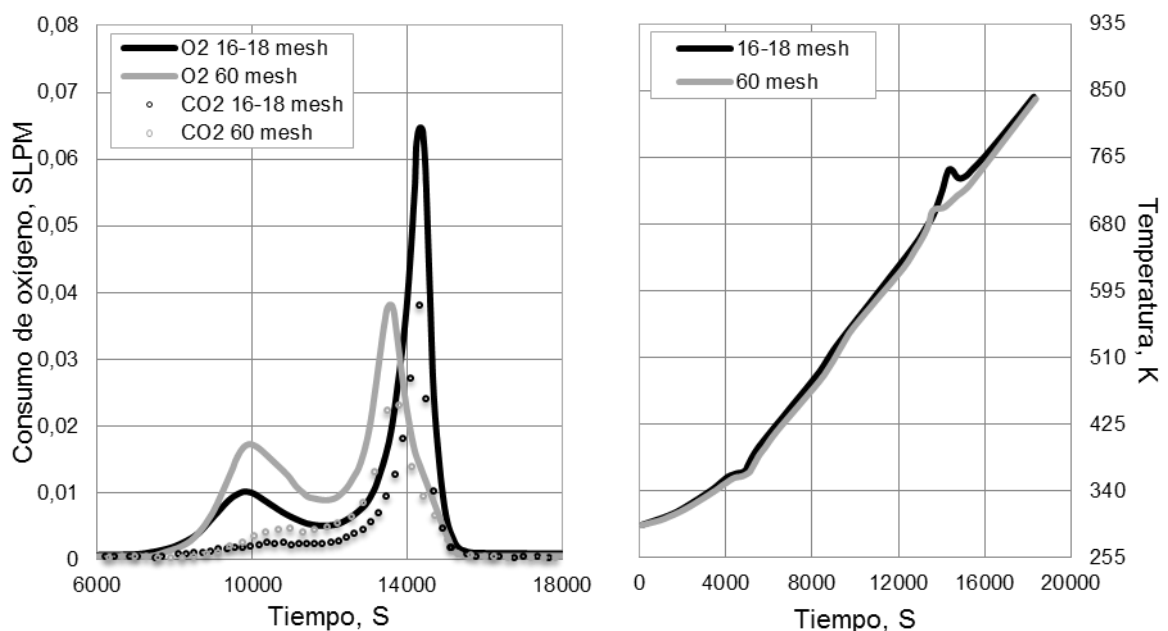
**Tabla 1.** Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas de celda cinética (Cinar et al, 2011)

| PROPIEDADES DEL CRUDO   |                   |                          |                              | PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS |                       |        |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------|
| °API                    |                   | Contenido de asfalteno   |                              | Matriz original del yacimiento      | Tipo de arena         |        |
| 10.5                    |                   | 14.5                     |                              | Roca del yacimiento (mesh 16-18 )   | Arena mesh 60 y 16-18 |        |
| VARIABLES OPERACIONALES |                   |                          |                              | MATERIALES                          |                       |        |
| T máx °C                | Flujo de aire LPM | Presión de la celda psia | Tasa de calentamiento °C/min | Arena g                             | Aceite g              | Agua g |
| 650                     | 2                 | 100                      | 1.74-2.74                    | 38-40                               | 2--4                  | 4      |

Los autores también realizaron pruebas usando arena con diferente área superficial (mesh 60 y mesh 16-18). Los resultados (Figura 2) mostraron que las

reacciones de baja temperatura iniciaban aproximadamente en el mismo valor, sin embargo, fue mayor el consumo de oxígeno con la arena de área superficial más grande (mesh 60). La producción de CO<sub>2</sub> en la región de baja temperatura era aproximadamente igual en los dos casos, por lo tanto, el incremento en el consumo de oxígeno en el caso de área superficial más grande se atribuyó a las reacciones de adición de oxígeno. Por último, la reacción de alta temperatura inició a un valor más bajo en la prueba con arena de área superficial mayor, pero, esta generó menos energía.

**Figura 2.** Resultados de celda cinética usando arena mesh 16-18 y 60 (Cinar et al, 2011)



**Fuente:** Editada de: CINAR, M, *et al.* Predictability of crude oil in-situ combustion by the isoconversional kinetic approach. En: SPE Journal. Septiembre, 2011.

- Fadaei et al (2011)<sup>3</sup> realizaron pruebas de celda cinética utilizando diferentes composiciones en el medio poroso (Tabla 2). La primera prueba estudió la

<sup>3</sup>FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011. pp 364-366

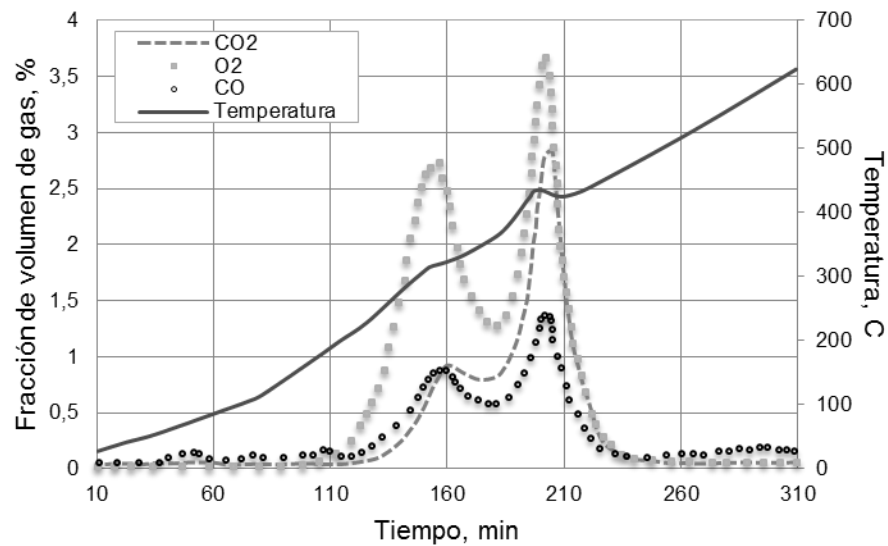
cinética de la combustión del crudo en un sistema no consolidado sin carbonato (caso base) (Figura 3).

**Tabla 2.** Composición del medio poroso en la celda cinética (Fadaei et al, 2011)

|                           | Arena | Aceite | Agua | Arcilla |
|---------------------------|-------|--------|------|---------|
|                           | (%)   | (%)    | (%)  | (%)     |
| <b>Mezcla homogénea</b>   | 84    | 7      | 7    | 2       |
| <b>Carbonato</b>          | 84    | 7      | 7    | 2       |
| <b>Núcleo consolidado</b> | 93    | 5      | 2    | -       |

**Fuente:** Editada de: FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011.

**Figura 3.** Resultados de celda cinética para la mezcla homogénea (caso base) (Fadaei et al, 2011)

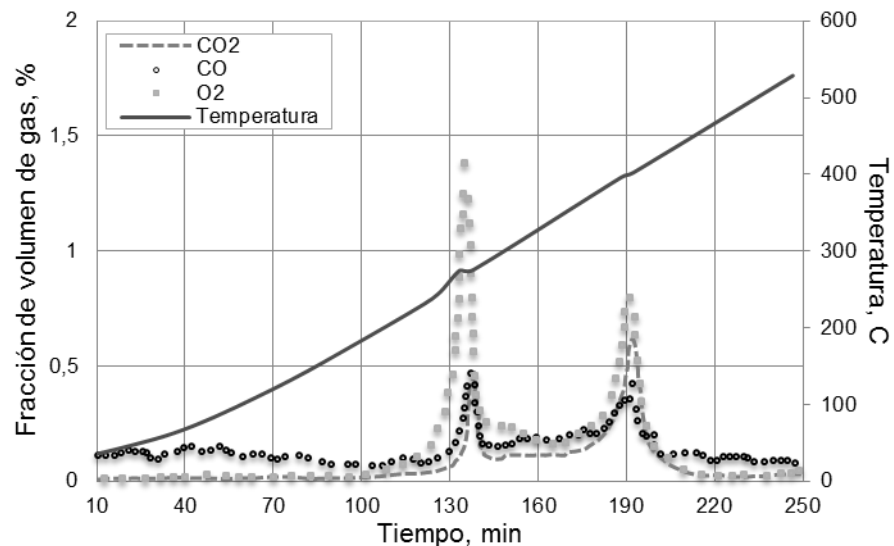


**Fuente:** Editada de: FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011.

El efecto de los carbonatos fue estudiado en la segunda prueba, donde se reemplazó la arena de la mezcla por carbonato puro ( $\text{CaCO}_3$ ) (Figura 4). La comparación con el caso base, indica que la cinética es considerablemente

modificada. El pico de consumo de oxígeno en la región de alta temperatura en ausencia de carbonato, es más grande que el pico en la región de baja temperatura; mientras que, en presencia de carbonato la situación es al contrario. Sin embargo, este no es el caso para la producción de  $\text{CO}_2$ , la cual es menor durante el pico de baja temperatura que durante el pico de alta temperatura en los dos experimentos. Los autores atribuyeron este comportamiento a la presencia de carbonato, el cual parece favorecer las reacciones de baja temperatura, principalmente las que consumen oxígeno sin producción significativa de  $\text{CO}_2$ . El contenido de CO fue similar o un poco más alto a baja temperatura que a alta temperatura en presencia de carbonatos. Esta tendencia es diferente para el caso base donde ocurre un pico pronunciado durante la alta temperatura.

**Figura 4.** Resultados de la celda cinética para la mezcla de carbonato (Fadaei et al, 2011)

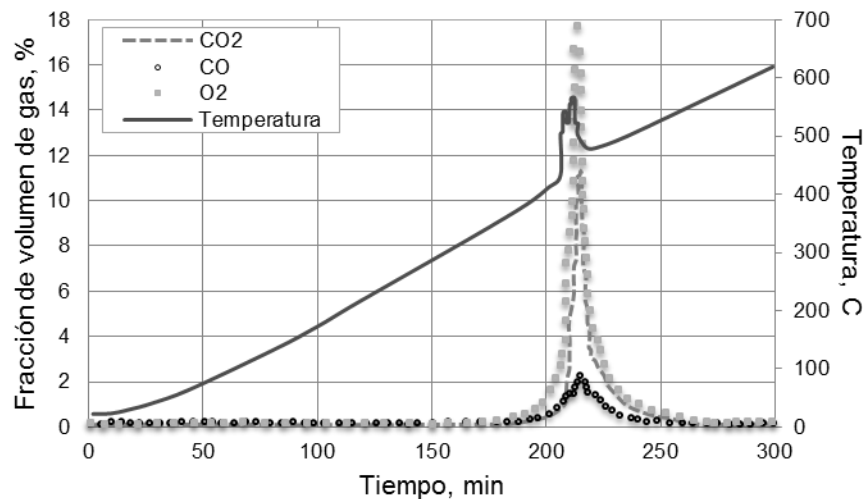


**Fuente:** Editada de: FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011.

El efecto de la consolidación de la matriz se analizó en una tercera prueba en la cual se utilizó un núcleo consolidado y saturado (Figura 5). Los resultados mostraron que el pico de baja temperatura desapareció completamente y el pico

de alta temperatura resultó ser más significativo. Según los autores, esto podría indicar que la naturaleza del suministro de oxígeno a la zona de reacción es diferente para sistemas consolidados y no consolidados. En el caso base, debido a la alta permeabilidad homogéneamente distribuida, está disponible suficiente oxígeno para las reacciones y la cinética está limitada solamente por la tasa. En el caso del núcleo consolidado, la cantidad de oxígeno que entra es limitado debido a la baja permeabilidad de la matriz, limitando a la cinética por el suministro de oxígeno. Adicionalmente, la baja permeabilidad de la matriz no permite que el aceite sea producido fácilmente como en el caso de la mezcla arena/aceite. Por lo tanto, se esperaría que más aceite en forma de combustible permanezca en la matriz y se queme a alta temperatura haciendo más significativo su pico.

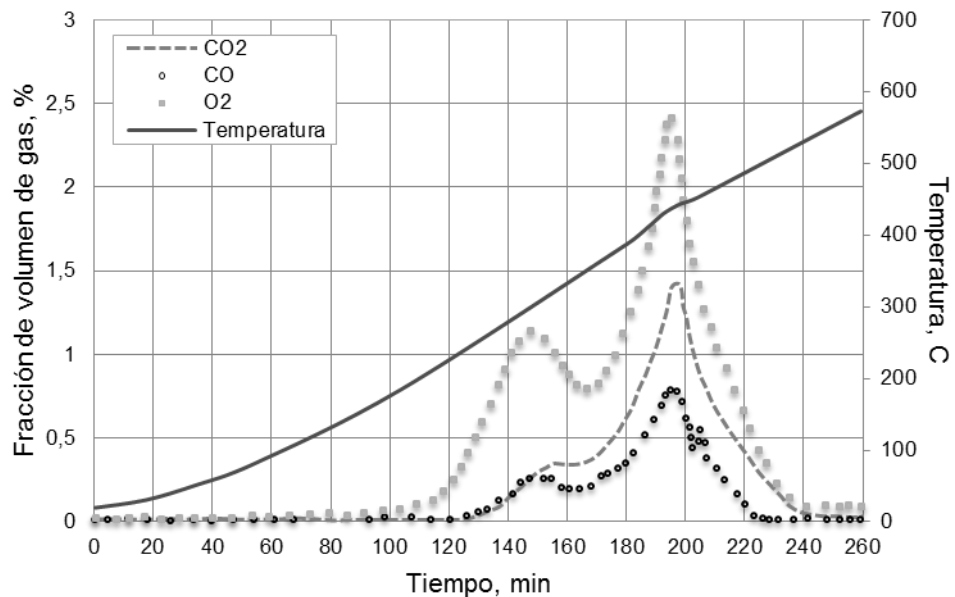
**Figura 5.** Resultados de celda cinética para el núcleo consolidado (Fadaei et al, 2011)



**Fuente:** Editada de: FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011.

Por último, fue realizada una prueba utilizando fragmentos de núcleo saturado (Figura 6) y se compararon sus resultados con los obtenidos en la prueba de núcleo consolidado, mostrando que la cinética de la combustión es muy diferente.

**Figura 6.** Resultados de celda cinética para los fragmentos de núcleo (Fadaei et al, 2011)



**Fuente:** Editada de: FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011.

- Awoleke (2007)<sup>4</sup> comparó el efecto de la matriz del yacimiento en el consumo de oxígeno por medio de dos pruebas de celda cinética. En la primera prueba utilizó una mezcla de arena limpia y caolinita, mientras que en la segunda prueba utilizó núcleos del yacimiento triturados con alta saturación de aceite. Ambos experimentos fueron realizados bajo las mismas condiciones de operación. Las propiedades de los fluidos y empaquetamientos así como las condiciones de operación se muestran en la Tabla 3. Los resultados de las pruebas se muestran en la Figura 7.

Los datos de oxígeno consumido para la mezcla de arena y arcilla indicaron que la oxidación a baja temperatura ocurrió a aproximadamente 350 °C y la oxidación a alta temperatura a aproximadamente 485 °C. El oxígeno consumido para la

<sup>4</sup> AWOLEKE, Olurotimi. An experimental investigation of in-situ combustion in heterogeneous media. Tesis de maestría. Universidad de Stanford. 2007. pp 43-45.

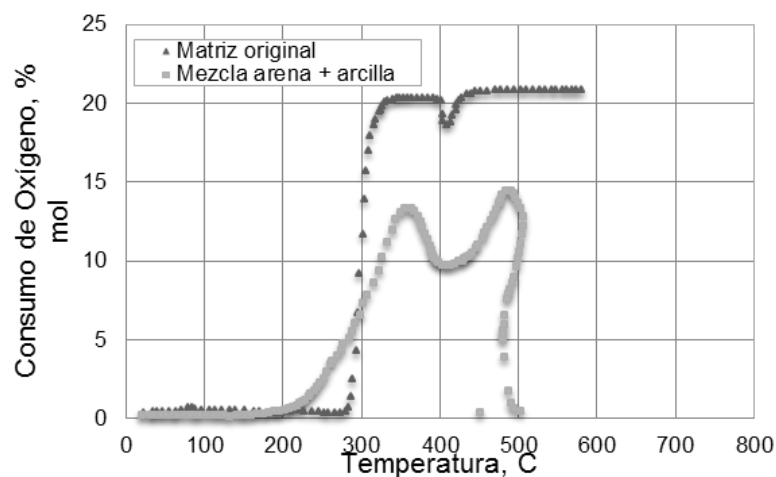


prueba realizada con núcleos del yacimiento triturados con alta saturación de aceite, fue más bajo en ambos picos, sin embargo, estos ocurrieron a una temperatura similar. El autor realizó dos pruebas adicionales utilizando núcleos del yacimiento triturados con alta saturación de aceite, pero incrementando la presión (200-290 psi) y la tasa de flujo de aire (1.5 L/min). Los resultados indicaron que estas muestras requieren altas condiciones de presión y flujo de aire para una combustión satisfactoria debido a la significativa cantidad de combustible en la matriz.

**Tabla 3.** Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Awoleke, 2007)

| PROPIEDADES DEL CRUDO   | PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS                   |                        |            |                 |             |           |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|------------|-----------------|-------------|-----------|
| °API                    | Matriz original                                       | Mezcla arena + arcilla |            |                 |             |           |
|                         |                                                       | Tipo de arena          |            | Tipo de arcilla |             |           |
| 19.7.                   | Núcleo triturado con alta saturación de hidrocarburos | Arena #60              |            | Caolinita       |             |           |
| VARIABLES OPERACIONALES |                                                       |                        | MATERIALES |                 |             |           |
| Flujo de aire<br>SLPM   | Presión<br>psig                                       | Back pressure<br>psig  | Arena<br>g | Arcilla<br>g    | Aceite<br>g | Agua<br>g |
| 0.5                     | 50                                                    | 40                     | 85         | 45              | 4.5-12      | 4         |

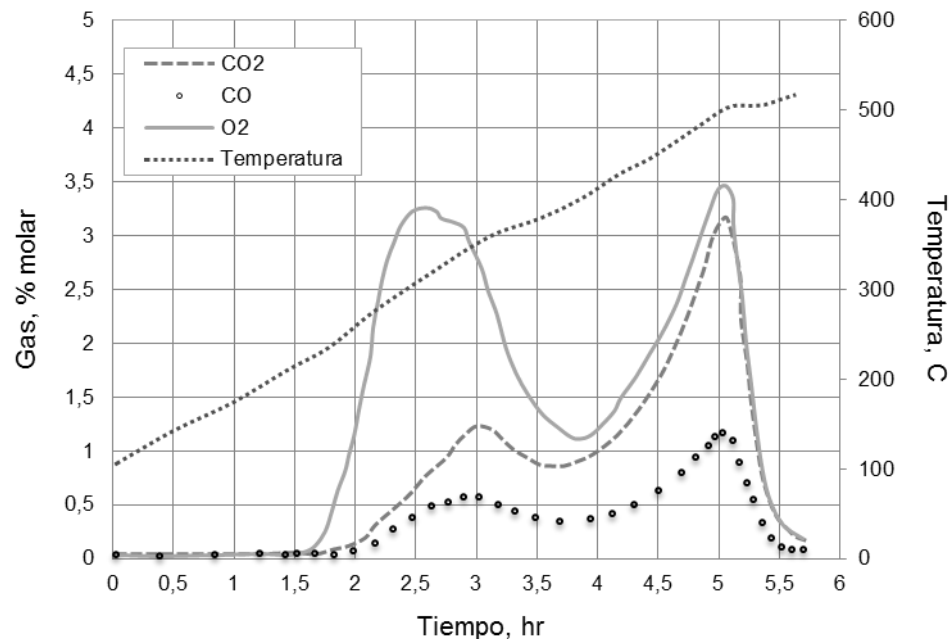
**Figura 7.** Resultados de celda cinética para la mezcla de arena + caolinita y matriz original triturada (Awoleke, 2007)



**Fuente:** Editada de: AWOLEKE, Olurotimi. An experimental investigation of in-situ combustion in heterogeneous media. Tesis de maestría. Universidad de Stanford. 2007.

- Para estudiar el efecto del área superficial en las reacciones de oxidación, Mamora (1995)<sup>5</sup> realizó una prueba cinética usando una mezcla de bitumen, arena mesh 20-30 y arcilla. En esta prueba se observó un incremento significativo en la reacción de baja temperatura (Figura 8), con una marcada disminución en la reacción de alta temperatura comparada con una corrida similar donde no se adicionó arcilla (Figura 9). Las principales propiedades del crudo y empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas se muestran en la Tabla 4.

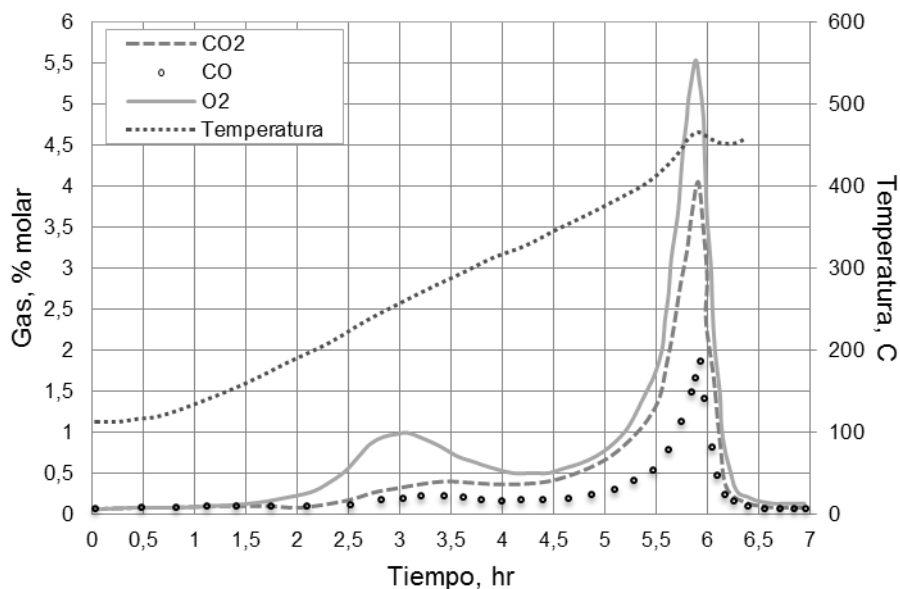
**Figura 8.** Resultados de celda cinética para la mezcla arena + arcilla (Mamora, 1995)



**Fuente:** Editada de: MAMORA. D. New findings in low-temperature oxidation of crude oil. SPE 29324. 1995.

<sup>5</sup>MAMORA. D. New findings in low-temperature oxidation of crude oil. SPE 29324. 1995. pp 581.

**Figura 9.** Resultados de celda cinética usando solo arena (Mamora, 1995)



**Fuente:** Editada de: MAMORA. D. New findings in low-temperature oxidation of crude oil. SPE 29324. 1995.

**Tabla 4.** Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Mamora, 1995)

| PROPIEDADES DEL CRUDO    | PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS |                             |
|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| °API                     | Tipo de arena                       | Tipo de arcilla             |
| 11.5                     | Arena Ottawa mesh 20-30             | Arcilla                     |
| CONDICIONES DE OPERACION |                                     |                             |
| Flujo de aire, LPM       | Presión, psig                       | Tasa de calentamiento, °C/h |
| 0.7                      | 100                                 | 50                          |

- Bagci et al (1987)<sup>6</sup> estudiaron el efecto del tipo de matriz en la energía de activación y otros parámetros de reacción a través de dos pruebas de celda cinética. Ambas pruebas fueron realizadas con crudo del campo Ramán y a las mismas condiciones de operación pero con dos tipos de empaquetamiento diferentes: caliza y arena ottawa. Las principales propiedades del fluido y de los

<sup>6</sup> BAGCI, et al. Combustion reaction kinetics in limestone containing heavy oils. SPE 15737.pp 408.

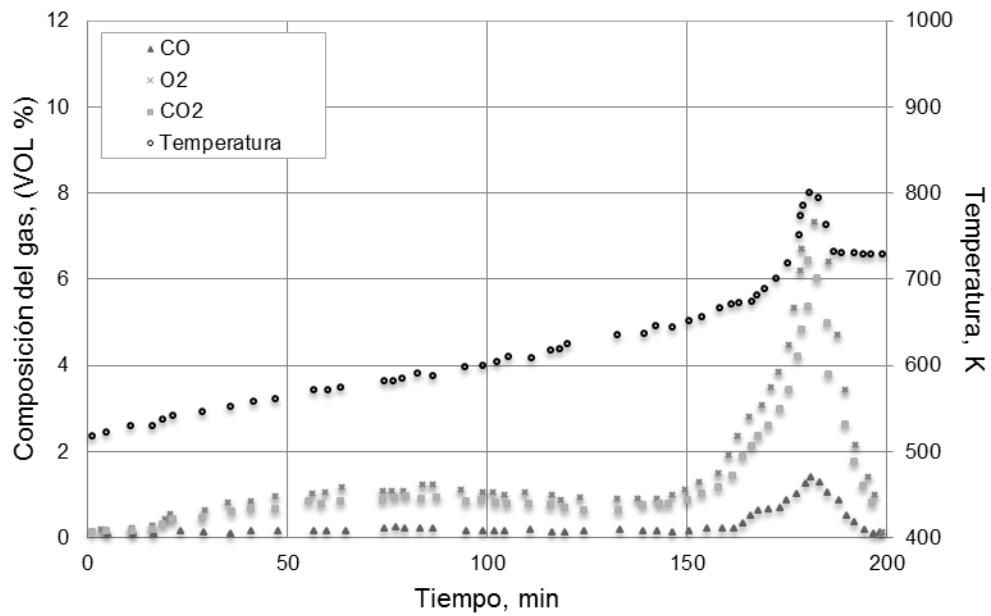
empaquetamientos; así como las condiciones de operación, se muestran en la Tabla 5. Los resultados de CO<sub>2</sub> y CO producidos y el oxígeno consumido en ambas pruebas se muestran en las Figura 10 y Figura 11. Por último, la relación molar CO<sub>2</sub>/CO y H/C se presentan en la Figura 12.

La relación molar CO<sub>2</sub>/CO resultó ser dos veces más baja para la corrida en la cual se usó arena. Las energías de activación no fueron muy diferentes para la temperatura baja y la reacción de depositación de combustible, lo cual indicó que estas reacciones eran sensibles solo al tipo de crudo. Sin embargo, en la región de alta temperatura, la energía de activación fue dos veces más alta para la prueba en la cual se usó arena.

**Tabla 5.** Principales propiedades del crudo y empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Bagci et al, 1987)

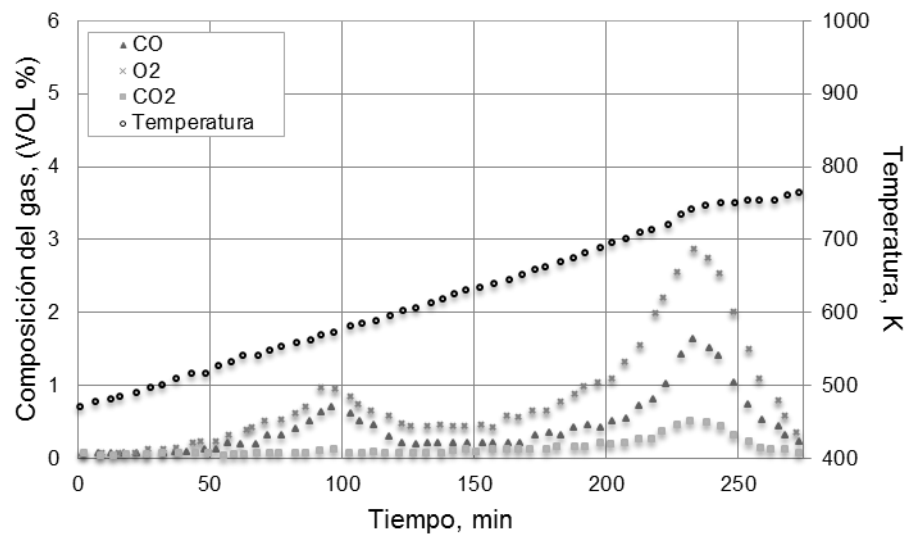
| PROPIEDADES DEL CRUDO    | PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS |                                 |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| °API                     | Prueba 1                            | Prueba 2                        |
| 18.7                     | Caliza triturada                    | Arena Ottawa                    |
| CONDICIONES DE OPERACION |                                     |                                 |
| Flujo de aire<br>LPM     | Presión<br>psig                     | Tasa de calentamiento<br>°C/min |
| 1.5                      | 25                                  | 1                               |

**Figura 10.** Resultados de celda cinética usando caliza triturada (Bagci et al, 1987)



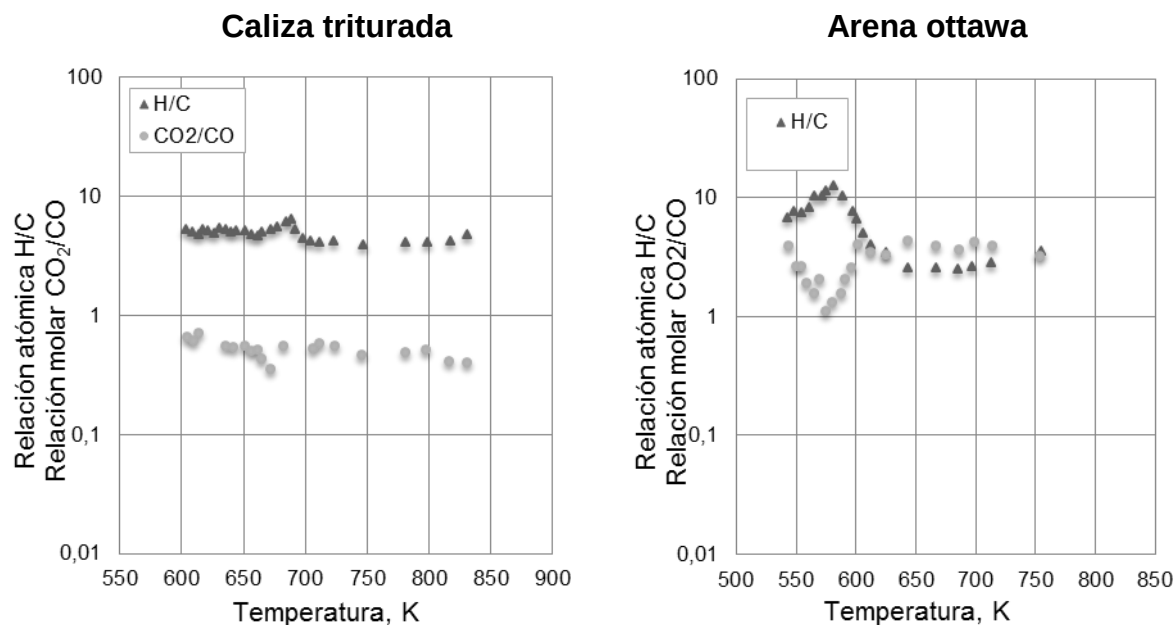
**Fuente:** BAGSI, A, .et al. Combustion reaction kinetics in limestone containing heavy oils. SPE 15737

**Figura 11.** Resultados de celda cinética usando arena ottawa (Bagci et al, 1987)



**Fuente:** BAGSI, A, .et al. Combustion reaction kinetics in limestone containing heavy oils. SPE 15737

**Figura 12.** Relación molar  $\text{CO}_2/\text{CO}$  y  $\text{H}/\text{C}$  para el crudo del campo Ramán utilizando caliza triturada y arena ottawa (Bagci et al, 1987)



**Fuente:** BAGSI, A, .et al. Combustion reaction kinetics in limestone containing heavy oils. SPE

15737

- Fassihi (1981)<sup>7</sup> realizó experimentos usando matriz original y una mezcla de arena y arcilla con el crudo del campo Jobo en Venezuela para estudiar cuantitativamente los efectos de la matriz en la cinética del proceso. Las principales propiedades del fluido y empaquetamientos se muestran en la Tabla 6. El análisis de tamiz para la arena se muestra en la Tabla 7. Los resultados de las pruebas se muestran en Figura 13 y Figura 14. En ambas pruebas se evidenció que el pico de combustión es mucho más alto que el pico de baja temperatura. Esto indica la propensión de este crudo a la depositación de combustible. En la región de baja temperatura el consumo de oxígeno y la generación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ , son más bajos para la prueba realizada con la mezcla de arena y arcilla.

<sup>7</sup> FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 164-168.

**Tabla 6.** Principales propiedades del crudo y empaquetamientos (Fassihi, 1981)

| PROPIEDADES DEL CRUDO                                                                       |       |       |                           |     |                          |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|---------------------------|-----|--------------------------|-----|
| °API                                                                                        | %C    | %H    | H/C                       | %N  | %S                       | M.W |
| 9.5                                                                                         | 83.24 | 10.55 | 1.52                      | 0.6 | 4.06                     | 681 |
| PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS                                                         |       |       |                           |     |                          |     |
| Matriz original                                                                             |       |       | Arena + arcilla           |     |                          |     |
|                                                                                             |       |       | Tipo de arena             |     | Tipo de arcilla          |     |
| Núcleo no consolidado (150 $\mu$ ). Presencia de un 20% de arcilla en la matriz (55 $\mu$ ) |       |       | Arena Ottawa (mesh 20-30) |     | Principalmente caolinita |     |

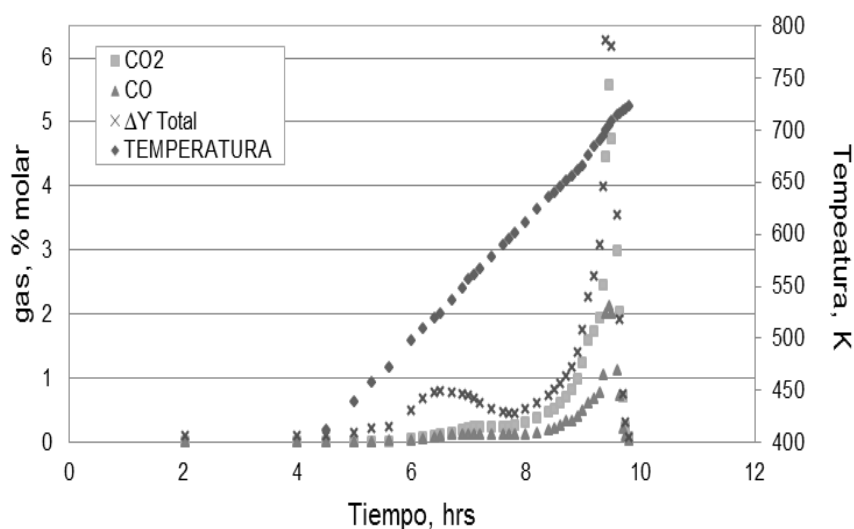
**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Tabla 7.** Análisis de tamiz para el empaquetamiento de arena (Fassihi, 1981)

| Análisis de tamiz | Porcentaje por peso retenido |
|-------------------|------------------------------|
| 20                | 0.4                          |
| 24                | 41.4                         |
| 28                | 57.7                         |
| 32                | 0.43                         |
| 60                | 0.05                         |
| Pan               | 0.02                         |

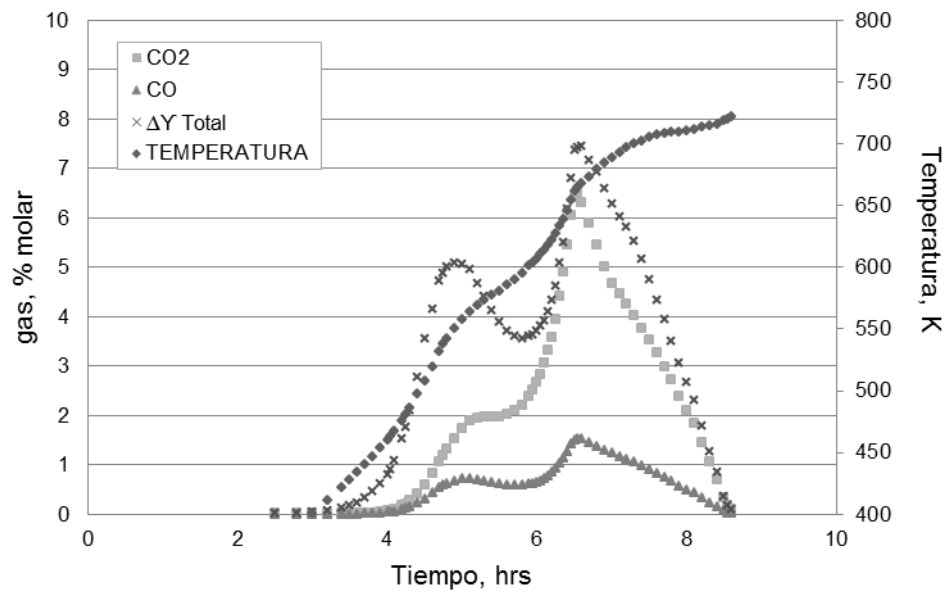
**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 13.** Resultados de celda cinética usando mezcla de arena + arcilla (Fassihi, 1981)



**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 14.** Resultados de celda cinética usando matriz original (Fassihi, 1981)

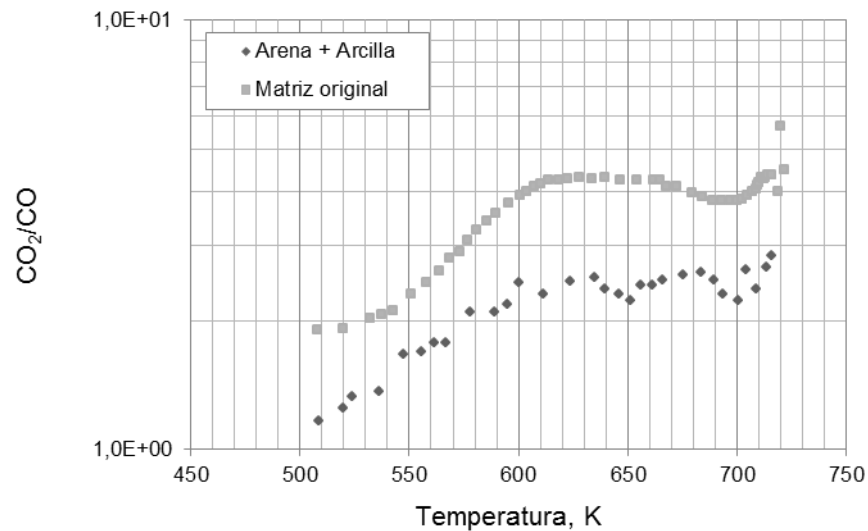


**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

La Figura 15 muestra una relación  $\text{CO}_2/\text{CO}$  más alta para la corrida con matriz original que la misma corrida usando la mezcla de arena y arcilla. En la Figura 16 y Tabla 8, se observa que la energía de activación para la reacción de combustión en la matriz original fue mucho más baja que en la mezcla de arena y arcilla. Según los autores, el análisis granulométrico para estas matrices confirmó que los granos de arena eran mucho más finos en la mezcla de arena y arcilla. Hubo incluso algunos limos en los núcleos.

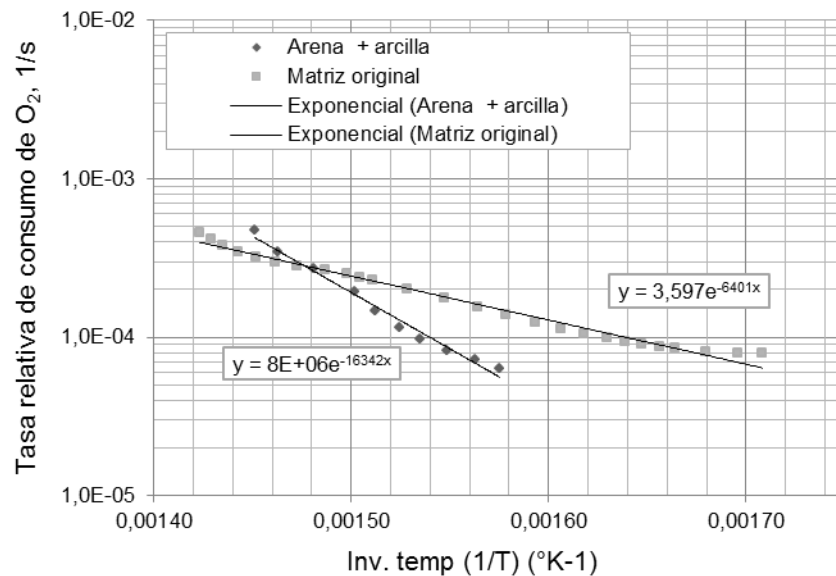


**Figura 15.** Relación molar  $\text{CO}_2/\text{CO}$  para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981)



**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 16.** Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981)



**Fuente:** Tomada y editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Tabla 8.** Energía de activación para el crudo del campo Jobo utilizando empaquetamiento de arena + arcilla y matriz original (Fassihi, 1981)

| <b>Empaquetamiento</b> | <b>Ea (kJ/mol)</b> |
|------------------------|--------------------|
| Arena + arcilla        | 135.87             |
| Matriz original        | 53.22              |

- Para estudiar el efecto de la arcilla, Fassihi (1981)<sup>8</sup> realizó corridas cinéticas adicionando un 5% de arcilla a la arena utilizando el crudo del campo San Ardo en California. Las propiedades del crudo se muestran en la Tabla 9. El pico de baja temperatura resultó ser más alto en la corrida donde solo se utilizó arena (Figura 17 y Figura 18). Según los autores, esto implica que en la presencia de arcilla, se encuentra disponible más combustible para las reacciones de oxidación, debido posiblemente a la adsorción de los hidrocarburos en la superficie de la arcilla, y por consiguiente, bajas destilación y pirolisis en el medio poroso. Por otro lado, la energía de activación para la reacción de combustión resultó ser más baja en la corrida en la cual se adicionó la arcilla (Figura 19 y Tabla 10).

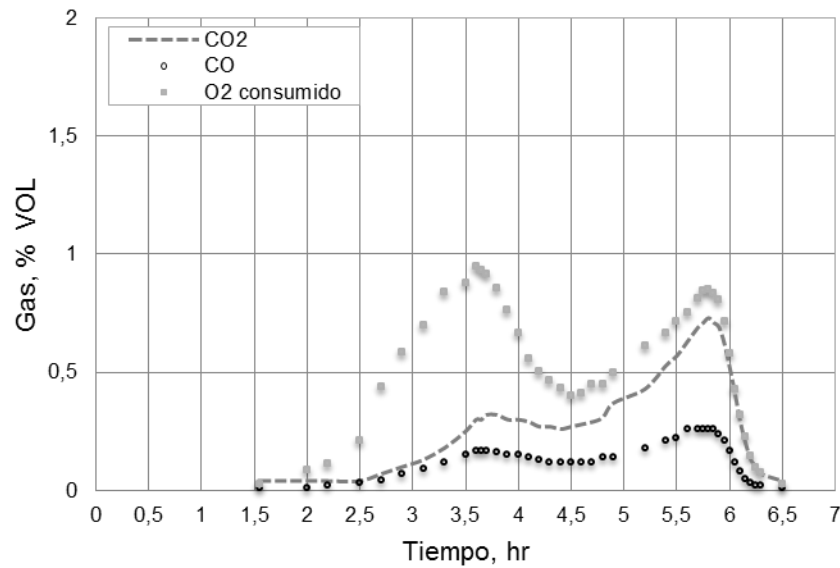
**Tabla 9.** Propiedades del crudo del campo San Ardo (Fassihi, 1981)

| <b>PROPIEDADES DEL CRUDO</b> |           |           |                             |           |           |            |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|
| <b>°API</b>                  | <b>%C</b> | <b>%H</b> | <b>Relación atómica H/C</b> | <b>%N</b> | <b>%S</b> | <b>M.W</b> |
| 11.2                         | 84.94     | 10.86     | 1.53                        | 0.96      | 4.74      | 593        |

**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

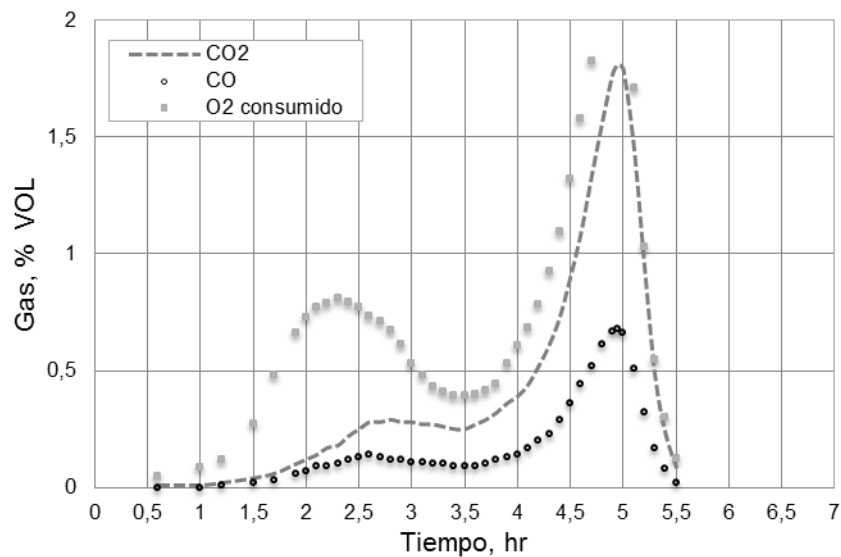
<sup>8</sup> FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 178-179

**Figura 17.** Composición del gas vs tiempo para el crudo san Ardo (arena + arcilla). Presión promedio = 550 kPa (Fassihi, 1981)



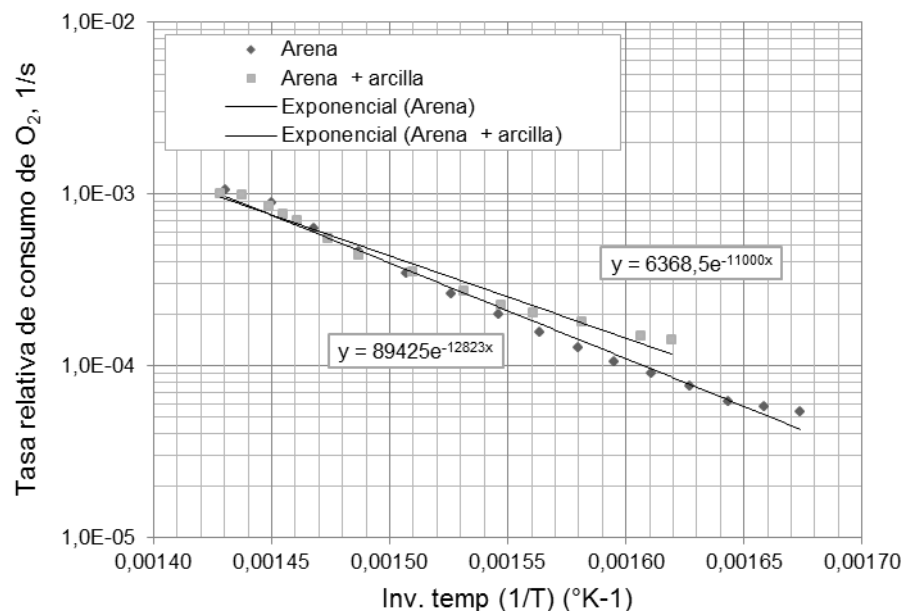
**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 18.** Composición del gas vs tiempo para el crudo san Ardo (arena). Presión promedio = 690 kPa (Fassihi, 1981)



**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 19.** Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo del campo San Ardo utilizando empaquetamiento de arena y matriz original (Fassihi, 1981)



**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Tabla 10.** Energía de activación para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Fassihi, 1981)

| Empaquetamiento | Ea (kJ/mol) |
|-----------------|-------------|
| Arena           | 106.6       |
| Arena + arcilla | 91.5        |

- Bardon y Gadelle (1977)<sup>9</sup> investigaron los efectos de la matriz en las reacciones de oxidación en un crudo francés. Utilizaron dos tipos de matriz: mezcla de arena de tamaño de grano variable y matriz original. Las principales propiedades del fluido y el empaquetamiento de arena se muestran en la Tabla 11. El análisis de tamiz para los diferentes empaquetamientos se muestra en la Tabla 12. Los resultados mostraron una energía de activación más alta en la

<sup>9</sup> BARDON, C., GADELLE, C. Essai de laboratoire pour l'étude de la combustion in-situ, Citado por: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 164.

prueba con la mezcla de arena que la misma prueba utilizando la matriz original (Figura 20 y Tabla 13). Esto fue atribuido a la presencia de un 5% de caolinita en la matriz.

**Tabla 11.** Principales propiedades del crudo francés, empaquetamiento de arena y condiciones de operación de la prueba (Bardon y Gadelle, 1977)

| PROPIEDADES DEL CRUDO                    |                 |                             |                |                                      |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------------|
| °API                                     | Viscosidad (cp) | Naturaleza química          |                |                                      |
| 27                                       | 80-100          | Hidrocarburos saturados (%) | Aromáticos (%) | Componentes pesados (%)              |
|                                          |                 | 51                          | 32             | 17 (16.5% resinas y 0.5% asfaltenos) |
| PROPIEDADES DEL EMPAQUETAMIENTO DE ARENA |                 |                             |                |                                      |
| Contenido de aceite (%)                  |                 |                             | Tipo de arena  |                                      |
| 3.5 (4.75 para la prueba 2)              |                 |                             | Ottawa         |                                      |
| CONDICIONES DE OPERACION                 |                 |                             |                |                                      |
| Air flux m³/m²-hr                        |                 | Presión kPa                 |                | Tasa de calentamiento °C/hr          |
| 40                                       |                 | 550                         |                | 100                                  |

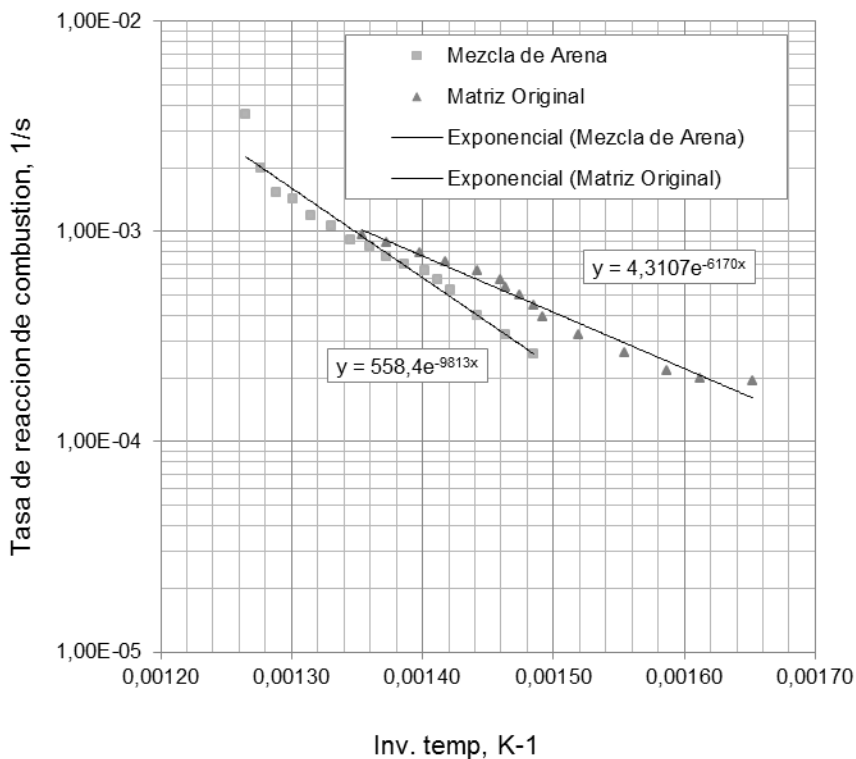
**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Tabla 12.** Análisis de tamiz para los diferentes empaquetamientos (Bardon y Gadelle, 1977)

| Distribución del tamaño de grano, $\mu$ | Mezcla de arena | Matriz original |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|
| < 125                                   | 0.7             | 1.6             |
| 125 – 160                               | 10.1            | 13.8            |
| 160 – 200                               | 21.6            | 12.9            |
| 200 – 250                               | 33              | 20.1            |
| 250 – 315                               | 23.9            | 15.8            |
| 315 – 400                               | 8.9             | 29.9            |
| > 400                                   | 1.8             | 5.9             |
| Caolinita                               |                 | 4 – 5 %         |

**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Figura 20.** Gráfica de Arrhenius para la reacción de combustión para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Bardon y Gadelle, 1977)



**Fuente:** Editada de: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981.

**Tabla 13.** Energía de activación para el crudo francés utilizando empaquetamiento de mezcla de arena y matriz original (Bardon y Gadelle, 1977)

| Empaquetamiento | Ea (kJ/mol) |
|-----------------|-------------|
| Mezcla de arena | 81.6        |
| Matriz original | 51.3        |

- Burger y Sahuquet (1972)<sup>10</sup> realizaron pruebas cinéticas utilizando una arena limpia y matriz natural usando el mismo crudo. Las principales propiedades del crudo y empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas se muestran en la Tabla 14.

<sup>10</sup>BURGER, J y SAHUQUET, B. Chemical aspects of in-situ combustion-heat of combustion kinetics. SPE 3599. 1972. pp 415-416.

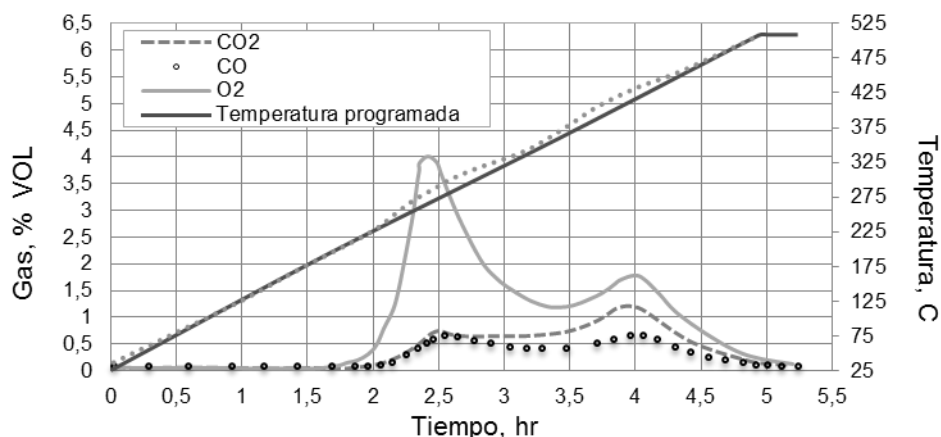
**Tabla 14.** Principales propiedades del crudo, empaquetamientos y condiciones de operación de las pruebas (Burger y Sahuquet, 1972).

| PROPIEDADES DEL CRUDO                                | PROPIEDADES DE LOS EMPAQUETAMIENTOS |                                           |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| °API                                                 | Tipo de arena                       | Tipo de núcleo                            |
| 27                                                   | Sílica limpia                       | Sílica (0.125 a 0.4 mm) con 2% de arcilla |
| CONDICIONES DE OPERACION                             |                                     |                                           |
| Flujo de aire<br>m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> hr) | Presión<br>atm                      | Tasa de calentamiento<br>°C/hr            |
| 40                                                   | 5.5                                 | 50 – 150 °C/hr                            |

**Fuente:** Editada de: BURGER, J y SAHUQUET, B. Chemical aspects of in-situ combustion-heat of combustion kinetics. SPE 3599

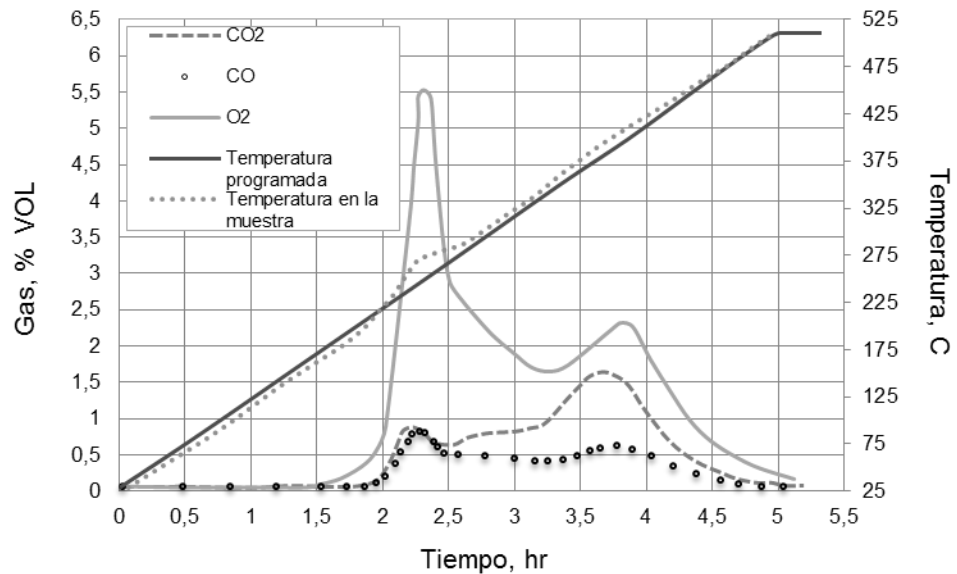
La Figura 21 presenta los resultados utilizando la arena limpia y la Figura 22 utilizando matriz natural. Para la prueba con matriz natural las reacciones de oxidación fueron observables a baja temperatura. Esto se explica por un incremento en la tasa de oxidación cuando un catalizador está presente (baja energía de activación). Por otro lado, el área del segundo pico fue más grande en la prueba con matriz original resultado de la formación de una cantidad más importante de coque, por lo tanto, la disponibilidad de combustible y el requerimiento de aire debió incrementar.

**Figura 21.** Resultados de celda cinética usando arena limpia (Burger y Sahuquet, 1972)



**Fuente:** Editada de: BURGER, J y SAHUQUET, B. Chemical aspects of in-situ combustion-heat of combustion kinetics. SPE 3599

**Figura 22.** Resultados de celda cinética usando matriz natural (Burger y Sahuquet, 1972)



**Fuente:** Editada de: BURGER, J y SAHUQUET, B. Chemical aspects of in-situ combustion-heat of combustion kinetics. SPE 3599

- Bossaid y Ramey (1968)<sup>11</sup> también estudiaron el efecto catalítico de la arcilla en la reacción de combustión. Ellos reportaron una reducción del 10% en la energía de activación cuando se adicionaba 20% de arcilla a la arena.

De los resultados y análisis de los diferentes autores, se concluye lo siguiente:

- Las arcillas actúan como catalizadores en el proceso de inyección de aire llevando a una disminución en la energía de activación de las reacciones de combustión.
- Datos experimentales sugieren que las reacciones de adición de oxígeno en la región de baja temperatura son significativamente afectadas por el área

<sup>11</sup> BOUSAID, I., RAMEY, H. Oxidation of crude oil in porous media, Citado por: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 178.



superficial. El incremento en el área superficial incrementa el área de contacto del oxígeno, resultando en un incremento en la tasa de reacción.

- Parámetros como el tipo de roca, área superficial y mineralogía juegan un papel importante en el desempeño del proceso de inyección de aire. Por lo tanto, cuando se realiza screening de yacimientos candidatos a la implementación de este proceso, el crudo debe ser considerado junto con el medio poroso. El sistema roca/fluido no es separable.

## **1.2 CONTRIBUCIONES**

Los aportes a la Empresa Colombiana del Petróleo y a la comunidad científica son los siguientes:

- Procedimiento para la generación de modelos cinéticos a partir de pruebas de celda cinética realizadas con los equipos del Instituto Colombiano del Petróleo.
- Estudio de la viabilidad técnica y metodología para realizar las pruebas de laboratorio para el estudio del proceso de inyección de aire con empaquetamientos diferentes a la matriz original del yacimiento.

## 2. INYECCIÓN DE AIRE

La inyección de aire es básicamente el proceso en el cual se inyecta en el yacimiento de manera continua un gas oxidante (oxígeno, aire, aire enriquecido), el cual reacciona con una pequeña porción del crudo presente en la formación para generar presión y calor. La mayoría del aceite es desplazado hacia los pozos productores por la combinación de empujes de gas, agua, vapor y el frente de combustión producto del proceso.

La Figura 23<sup>12</sup> es una sección transversal de un yacimiento en algún momento después de que la inyección de aire ha iniciado. Similar a la inyección de vapor, todos los gases en el proceso tienden a ir hacia la parte de arriba del yacimiento. Esto se debe a la diferencia de densidades entre el aire y los fluidos del yacimiento. A medida que el frente de combustión se propaga dentro del yacimiento se forman diferentes zonas. Estas zonas difieren entre ellas por sus temperaturas y saturaciones de fluidos.

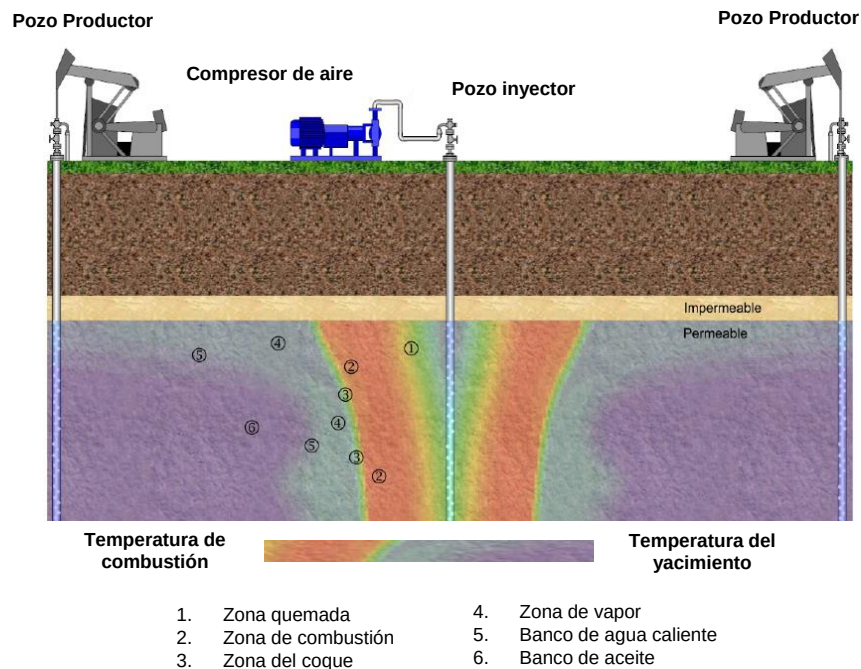
- ✚ La primera zona muestra la zona quemada. Esta es la zona barrida por la combustión y está saturada con aire. La temperatura es alta en esta región.
- ✚ Cerca de la zona quemada está la zona de combustión. Esta es la zona donde las reacciones se llevan a cabo. En esta zona, el coque se quema para generar la energía que sostiene la combustión. Productos de la combustión, como el CO<sub>2</sub>, CO y agua, se originan en esta región.

---

<sup>12</sup> CINAR, Murat. Kinetics of crude-oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 2011. p. 13-14.

- ✚ Justo después de la zona de combustión, empieza la zona del coque. Las reacciones exotérmicas en la zona de combustión llevan a altas temperaturas. Como la temperatura es transferida delante de la zona de combustión, existen condiciones ideales para la formación del coque. Aquí, el aceite es destilado y el craqueo térmico forma hidrocarburos livianos dejando detrás un residuo conocido como coque. El coque es de hecho el combustible para la combustión. Los livianos son transportados por los gases de combustión donde se mezclan para mejorar el crudo original.
- ✚ Una zona de vapor se forma cerca de la zona de coque. Dependiendo de la presión, la temperatura de esta zona cambia.
- ✚ La zona de vapor es seguida por un banco de agua caliente a medida que la disminución de la temperatura lleva a la condensación del vapor.
- ✚ El banco de agua caliente es sucedido por un banco de aceite donde el aceite movilizado se acumula. La temperatura a través del banco de aceite disminuye hasta la zona donde se encuentra el aceite virgen.

**Figura 23.** Proceso de inyección de aire



**Fuente:** Editada de: CINAR, Murat. Kinetics Of Crude-Oil Combustion In Porous Media Interpreted Using Isoconversional Methods. 2011

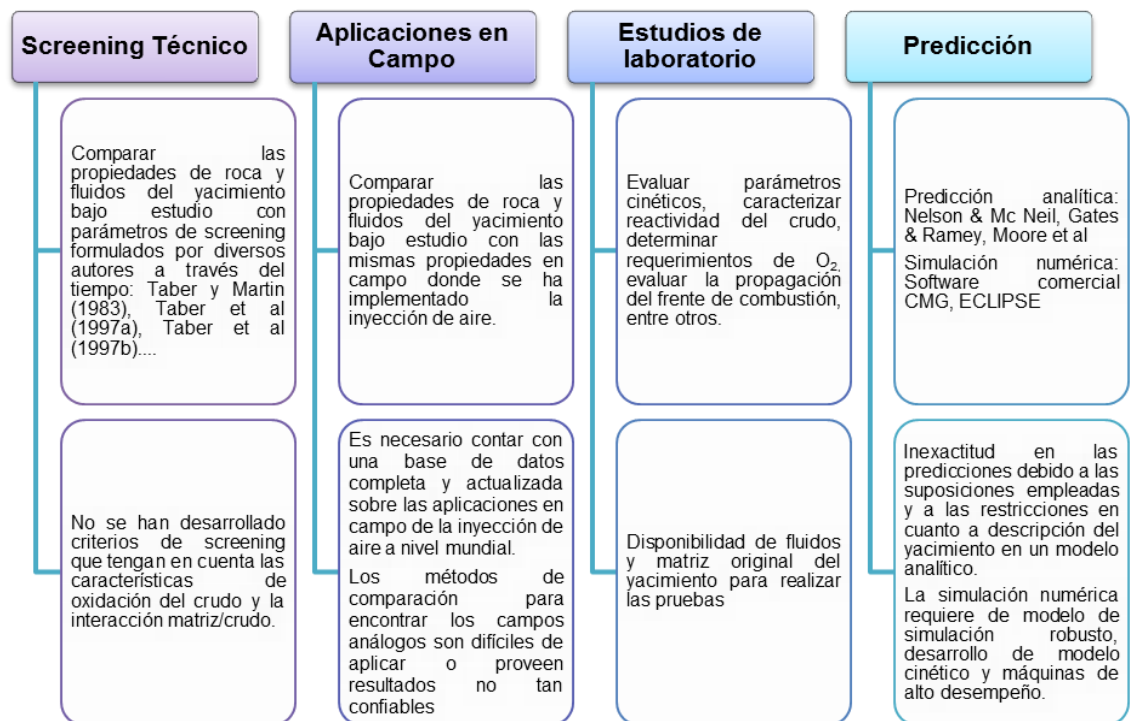
## 2.1 SCREENING PARA LA SELECCIÓN DE YACIMIENTOS CANDIDATOS A IMPLEMENTACIÓN DE INYECCIÓN DE AIRE

Antes de diseñar cualquier operación de inyección de aire en campo es mandatorio evaluar el potencial del yacimiento para garantizar el éxito técnico y económico del proceso. Este éxito depende principalmente de la composición del aceite y las características de la roca, los cuales determinan la cantidad y la reactividad del combustible depositado<sup>13</sup>. Algunas de las herramientas disponibles en la actualidad para realizar dicha evaluación son: screening técnico, analogías, estudios de laboratorio, predicción analítica y simulación numérica. Excepto las pruebas de laboratorio, ninguna de estas herramientas proporciona un screening

<sup>13</sup>CINAR, M, *et al.* Predictability of crude oil in-situ combustion by the isoconversional kinetic approach. *En: SPE Journal*. Septiembre, 2011.pp 537.

de yacimientos candidatos a inyección de aire en términos de su reactividad. En la siguiente figura se presenta una breve explicación de cada herramienta y algunas de sus desventajas.

**Figura 24.** Herramientas para la evaluación del potencial de un yacimiento para la implementación de inyección de aire



## 2.2 ESTUDIOS DE LABORATORIO

Los mecanismos de la inyección de aire son directamente función de la composición del aceite y la mineralogía de la roca, por lo tanto, la extensión y naturaleza química de las reacciones químicas que ocurren entre el gas oxidante inyectado y el crudo del yacimiento, así como, el calor generado dependen del sistema roca-matriz<sup>14</sup>. Lo anterior, lleva a la conclusión de que las pruebas de

<sup>14</sup>BRIGHAM, W y CASTANIER, L. Chapter 16. (Reservoir Engineering Section). Insitu Combustion. p. 5.

laboratorio son un paso necesario dentro del proceso de estudio de la aplicación de la inyección de aire en un campo determinado.

### **2.2.1 Las reacciones**

Las reacciones químicas asociadas al proceso de inyección de aire son complejas y numerosas y ocurren en un amplio rango de temperaturas<sup>15</sup>. La mayoría de los investigadores las agrupan en tres clases: craqueo térmico, reacciones de oxidación a baja temperatura y reacciones de oxidación a alta temperatura. El craqueo térmico del crudo produce un residuo sólido en la superficie de los granos de arena del yacimiento. Este residuo sólido, o también llamado coque, es consumido como combustible para la combustión. Las reacciones de oxidación a baja temperatura, las cuales son típicamente reacciones heterogéneas entre el gas y las fases condensadas, involucran la formación de hidrocarburos oxigenados. Las reacciones de oxidación a alta temperatura son reacciones heterogéneas que consumen el coque depositado por el craqueo térmico para producir CO<sub>2</sub> y agua<sup>16</sup>.

### **2.2.2 Cinética**

La cinética de la combustión puede ser definida como que tan rápido ocurren las reacciones químicas y cuánto aceite es afectado por el proceso<sup>17</sup>. Los estudios cinéticos son importantes por varias razones:

- Caracterización de la reactividad del crudo.
- Determinación de las condiciones de ignición.

---

<sup>15</sup>Ibíd., p. 5.

<sup>16</sup> REN, Y., et al. A Simple Kinetic Model for Coke Combustion During an In Situ Combustion (ISC) Process. Presented at the Petroleum Society's 6th Canadian International Petroleum Conference (56th Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, June 7 – 9, 2005. Paper 2005-110.

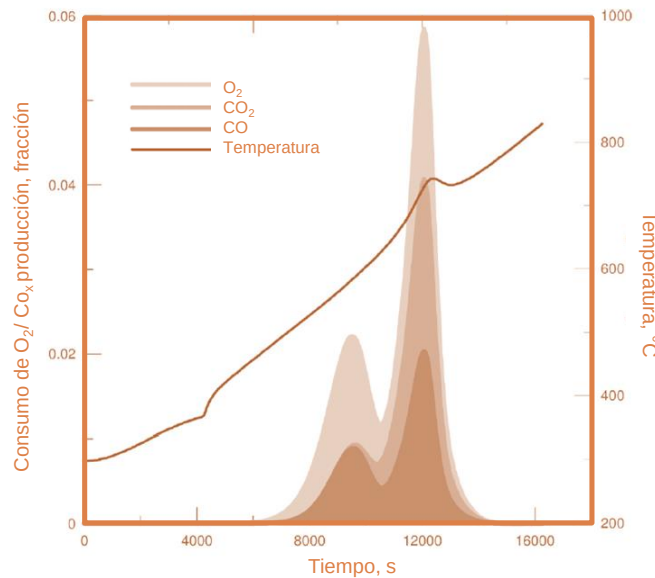
<sup>17</sup>BRIGHAM. Op. Cit., p. 7

- Determinación de la naturaleza del combustible y sus características de combustión.
- Cálculo de parámetros cinéticos que posteriormente son usados para la simulación numérica del proceso.

### 2.2.3 Celda cinética

La prueba de celda cinética es un método cuantitativo que ayuda a determinar la cinética de las reacciones. Básicamente consiste en calentar una muestra de roca y fluido del yacimiento, mientras al mismo tiempo se hace fluir un gas oxidante a través de la misma. El estudio cinético se realiza a partir del análisis de los gases producidos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) y de la muestra quemada. La Figura 25 se muestra un perfil típico de producción de gases y consumo de oxígeno para una prueba de celda cinética.

**Figura 25.** Perfil típico de producción de gases y consumo de oxígeno para una prueba de celda cinética



**Fuente:** Editada de: Cinar, M. et al. Combustion kinetics of heavy oils in porous media. Energy & Fuels. 2011

#### 2.2.4 Descripción del equipo<sup>18</sup>

La unidad de celda cinética posee un reactor unidimensional con el cual se captura el comportamiento global de oxidación de un aceite bajo flujo de aire a cierto nivel de presión, siguiendo un programa de calentamiento predefinido.

En las Figuras 26 y 27 se muestra la unidad diseñada y construida para el laboratorio de inyección de aire del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). El sistema se diseñó para operar y adquirir datos automáticamente durante una prueba sin la acción de algún usuario y está equipado con mecanismos de seguridad (Interlocks) que limitan las variables de operación y entrada de gases en caso de alguna falla del controlador de temperatura y presión, o un elevado flujo de gases de alimentación (aire, nitrógeno, helio) provenientes de un sistema de compresión de alta presión. Adicionalmente, posee una válvula de seguridad en caso de una sobre presión en el reactor o una falla en la válvula de control de presión (Back pressure).

**Figura 26.** Celda cinética Instituto Colombiano del Petróleo

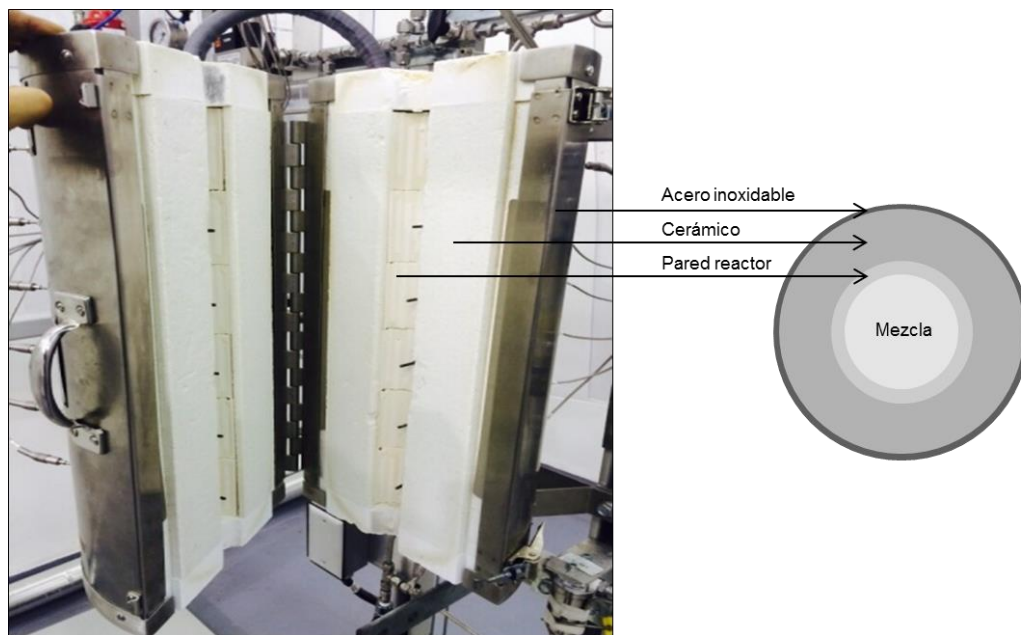


**Fuente:** Reporte: Estudio de las características de oxidación con rampa de temperatura - RTO para el campo Chichimene. Instituto Colombiano del Petróleo. 2013

<sup>18</sup>Reporte: Estudio de las características de oxidación con rampa de temperatura - RTO para el campo Chichimene. Instituto Colombiano del Petróleo. 2013.

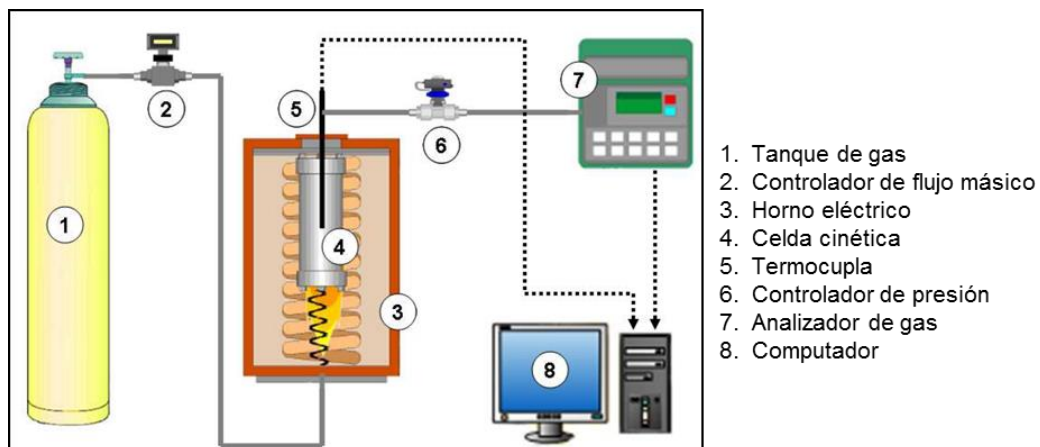


**Figura 27.** Detalle de la celda cinética Instituto Colombiano del Petróleo



El reactor es tubular (R-300) de una (1) pulgada diámetro nominal y cedula 160, construido en Hastelloy (C-276) con un diámetro externo de 1.315 (OD) pulgada. Está equipado con seis (6) termocuplas externas, igualmente espaciadas a lo largo de su longitud para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. La unidad posee un horno (FRN-300) con seis (6) secciones de calentamiento cada uno con control independiente de temperatura que suministra la energía térmica al reactor. Adicionalmente el reactor cuenta con un regulador de presión (Back pressure PIC-401) en la línea de salida de productos para mantener la presión durante la prueba. Los gases de salida se miden con un analizador de gases SERVOMEX 4100 y su volumen total se mide por medio de un gasómetro marca RITTER Type: TG 1 Mod. 1-4. Un esquema general del equipo se muestra en la Figura 28.

**Figura 28.** Esquema general del equipo de celda cinética



**Fuente:** CHEN, B. Investigation of in-situ combustion kinetics using the isoconversional principle.  
Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 2012.

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El crudo utilizado para realizar las pruebas corresponde a crudo del pozo CH-44 de la formación T2, el cual fue muestreado en cabeza de pozo. El crudo fue deshidratado en una unidad de destilación hasta llegar a un contenido de agua de 0.8%. Las principales características se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Principales propiedades del crudo de ChichimeneT2 utilizado para realizar las pruebas de celda cinética

| <b>Chichimene 44 (Acacias, Meta)</b> |                                            |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Sitio de muestreo</b>             | <b>Cabeza de pozo, línea de producción</b> |
| API                                  | 8,3                                        |
| Densidad @15°C [Kg/m3]               | 1011,5                                     |
| % Azufre % m                         | 3,270                                      |
| Punto Fluidez °C                     | 30                                         |
| Viscosidad 80°C                      | 2084                                       |
| Viscosidad 100°C                     | 580,8                                      |
| Número de ácido mg KOH/g             | 0,101                                      |
| Vanadio ppm                          | 35,8                                       |
| Níquel ppm                           | 16,4                                       |

Las muestras de matriz utilizadas son: núcleo, afloramiento, ripios y arena sintética. Para la selección de la muestra de afloramiento se realizó un análisis petrofísico y mineralógico para determinar si es una muestra representativa de la formación T2 del campo Chichimene. Los resultados se compararon con los mismos análisis realizados a la muestra de núcleo, comprobando la similaridad entre ambas muestras. En las Figuras 29 a 32 se muestran los resultados del estudio mineralógico y en la Tabla 16 los resultados del estudio petrofísico.

Figura 29. Análisis mineralógico para la muestra de núcleo

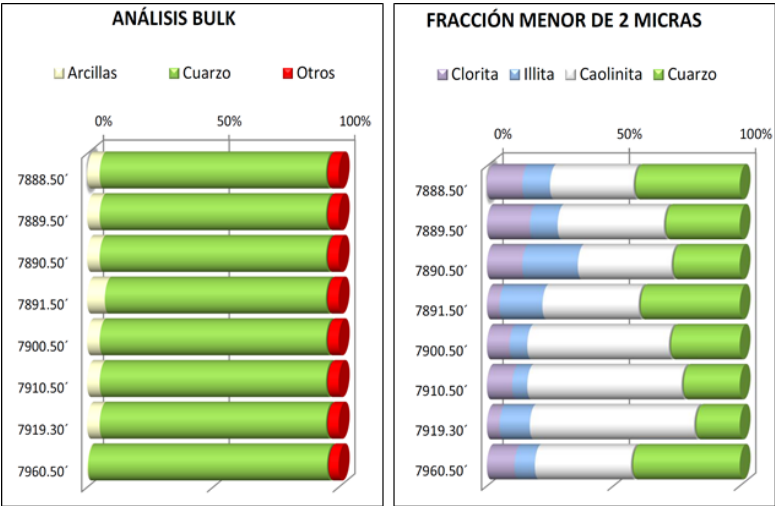
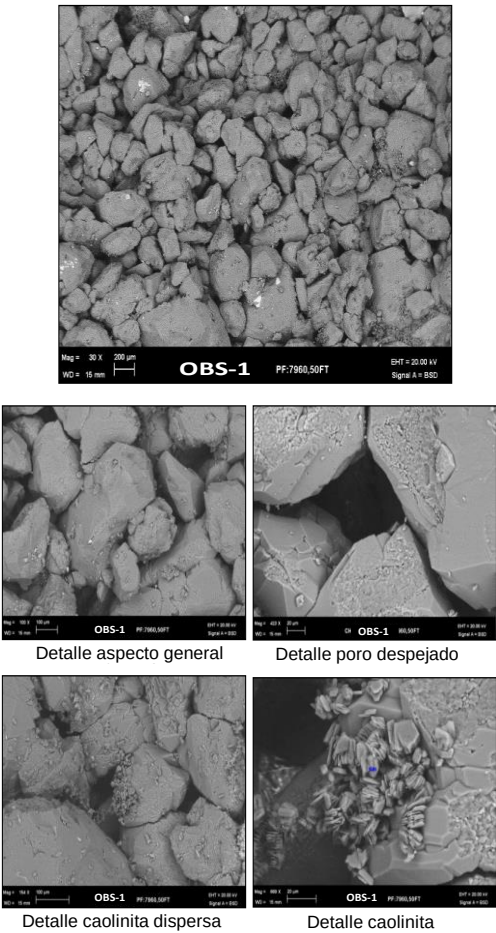
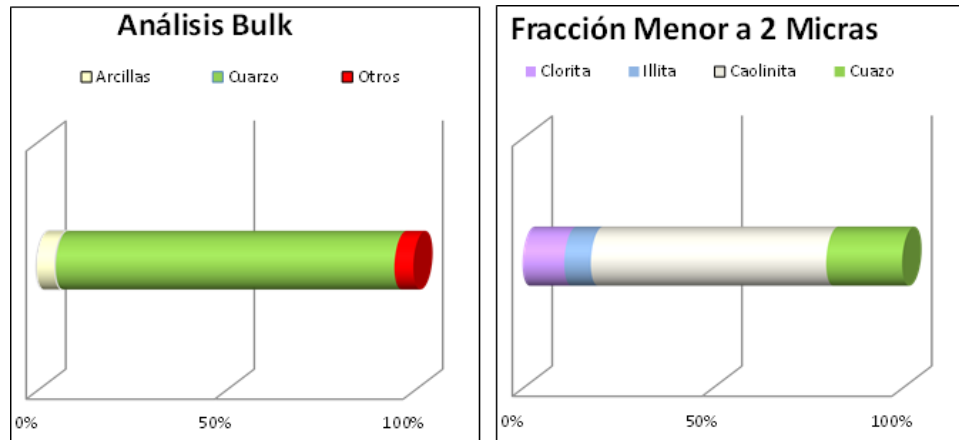


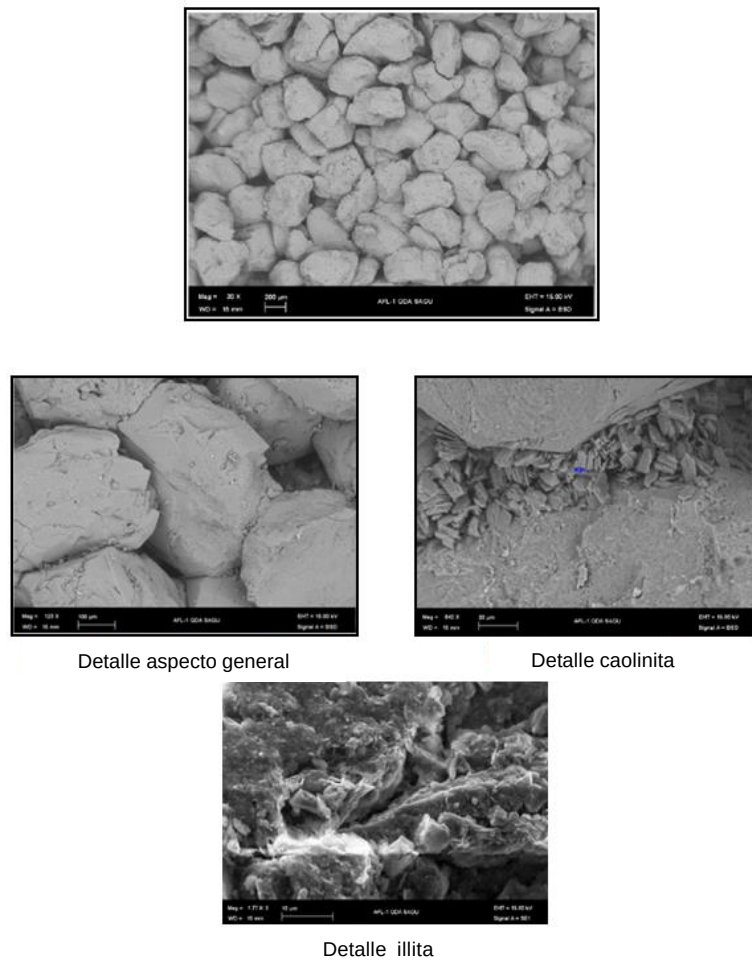
Figura 30. Aspecto y composición de la muestra de núcleo



**Figura 31.** Análisis mineralógico para la muestra de afloramiento



**Figura 32.** Aspecto y composición de la muestra de afloramiento



**Tabla 16.** Análisis petrofísico para las muestras de núcleo y afloramiento

|                           |                      | Núcleo |        | Afloramiento |        |
|---------------------------|----------------------|--------|--------|--------------|--------|
| Profundidad               | (ft)                 | 7960.5 | 7960.5 | 0            | 0      |
| Presión de Confinamiento  | (psi)                | 800    | 2700   | 800          | 3000   |
| Longitud                  | (cm)                 | 4.981  | 4.981  | 5.010        | 5.010  |
| Diámetro                  | (cm)                 | 3.845  | 3.845  | 3.780        | 3.780  |
| Vol. Total                | (cm <sup>3</sup> )   | 57.830 | 57.830 | 56.230       | 56.230 |
| Vol. Poroso               | (cm <sup>3</sup> )   | 11.391 | 11.133 | 10.969       | 10.291 |
| Vol. de Granos            | (cm <sup>3</sup> )   | 45.960 | 45.960 | 43.690       | 43.690 |
| Densidad de Granos        | (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.643  | 2.643  | 2.642        | 2.642  |
| Porosidad                 | (%)                  | 19.9   | 19.5   | 20.1         | 19.1   |
| Permeabilidad Klinkenberg | (md)                 | 5608   | 5008   | 5214         | 4667   |
| Permeabilidad al Aire     | (md)                 | 5932   | 5681   | 5264         | 4713   |

Como conclusión de los dos estudios, la muestra de afloramiento presenta la misma naturaleza composicional de la formación T2 del Campo Chichimene y que sus características petrofísicas son correspondientes con los análisis petrofísicos realizados a la muestra de núcleo.

Todas las muestras deben pasar por un proceso de preparación con el objetivo de remover los residuos como sedimentos, fluidos e impurezas que puedan influir en los resultados. En la Tabla 17 se presenta el procedimiento de limpieza realizado para las muestras de núcleo, afloramiento y ripios.

**Tabla 17.** Procedimiento de limpieza realizado para las muestras de núcleo, afloramiento y ripios.

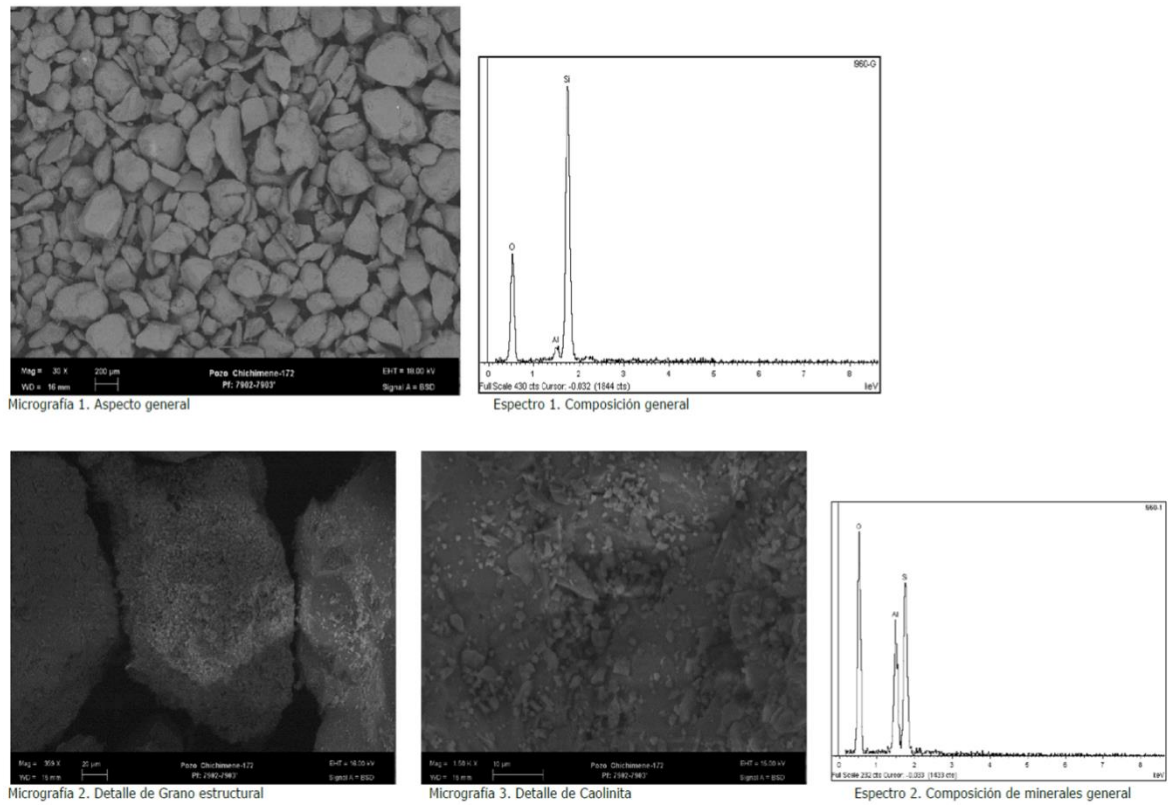
| Muestra      | PASO 1: Solvente                                                                                         | PASO 2: Horno   | PASO 3: Celda cinética                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Afloramiento | SOXHLET (2 semanas)                                                                                      | 2 días a 180 °C | Se calentó la muestra en la celda cinética a P = 350 psi, tasa de calentamiento = 10°C/min, flujo de aire = 30 L/min y T <sub>máx</sub> = 450 °C, hasta que no se reportara producción de óxidos de carbono en el medidor de gases.        |
| Ripios       | Remojo en frío durante 3 días en tolueno-acetona (50-50). SOXHLET por 15 días en tolueno-metanol (50-50) | 2 días a 60 °C  | Se calentó la muestra en la celda cinética a P = 350 psi, tasa de calentamiento = 10°C/min, flujo de aire = 30 L/min y T <sub>máx</sub> = 450 °C, hasta que no se reportara producción de óxidos de carbono en el medidor de gases.        |
| Núcleo       | Remojo en frío durante 3 días en tolueno-acetona (50-50). SOXHLET por 15 días en tolueno-metanol (50-50) | 2 días a 60 °C  | Se calentó la muestra en la celda cinética a P = 350-420 psi, tasa de calentamiento = 10°C/min, flujo de aire = 30-45 L/min y T <sub>máx</sub> = 450 °C, hasta que no se reportara producción de óxidos de carbono en el medidor de gases. |

A las diferentes matrices utilizadas se les realizó análisis SEM-DEX y se determinó su distribución granulométrica. A continuación se presentan los resultados de los análisis para cada tipo de matriz:

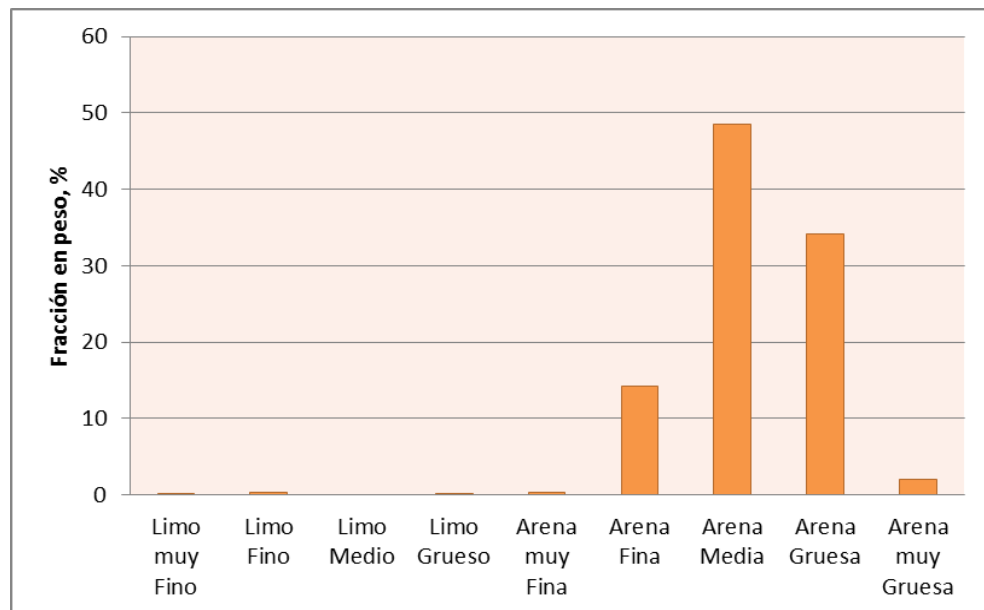
**- Muestra de núcleo**

Sólido de material particulado constituido por sílice y en menor proporción aluminio. De manera visual, se infiere que es un sólido mayoritariamente cuarzoso constituido por granos de diversos tamaños, que van desde medio a fino con algunos granos gruesos (Figura 33), sin embargo, en la Figura 34, se muestra la clasificación de tamaño de grano, con la cual se concluye que corresponde a una arena uniforme. Los granos se observan fragmentados y algunos con bordes pseudoredondeados. Se presentan también algunos granos estructurales (micrgf. 2) y sobre granos se aprecia material particulado de composición cuarzosa mayoritariamente. Eventualmente se observa caolinita en fragmentos (micrgf. 3).

**Figura 33.** Aspecto y composición de la muestra de núcleo



**Figura 34.** Clasificación de tamaño de grano para la muestra de núcleo

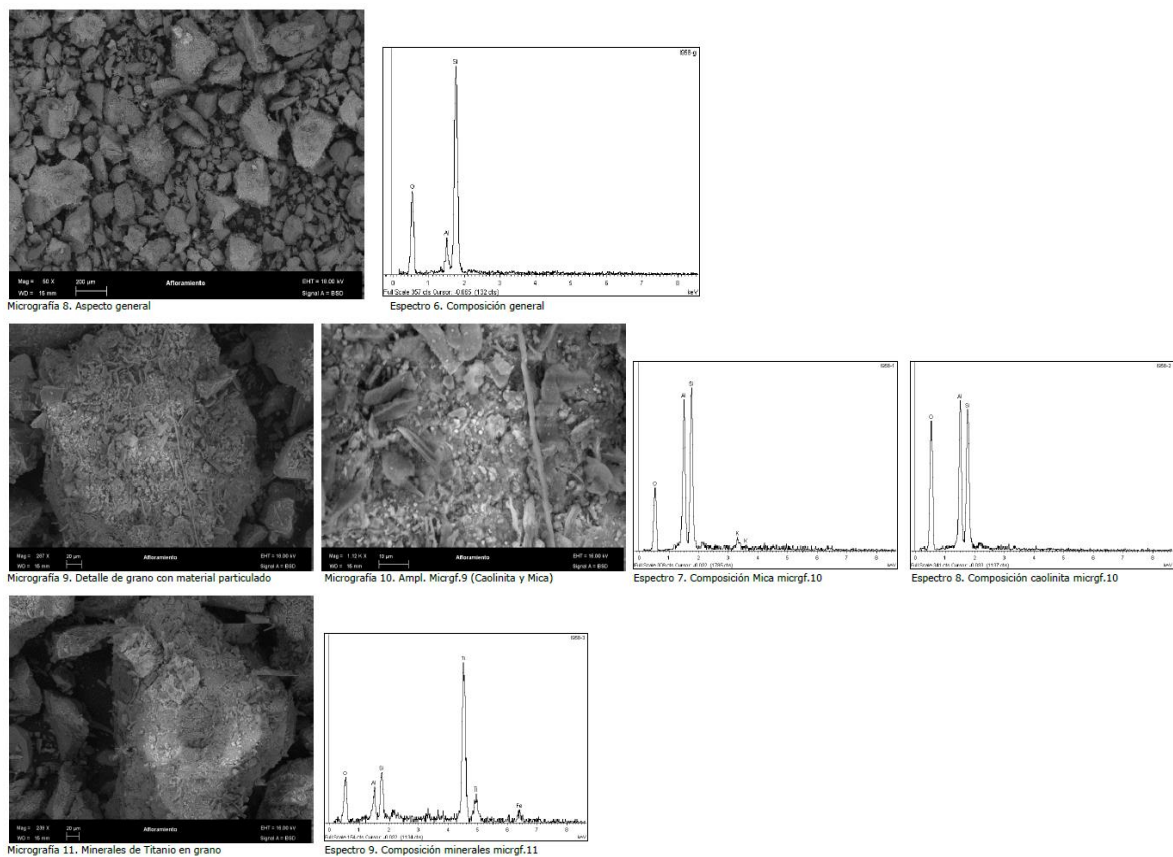




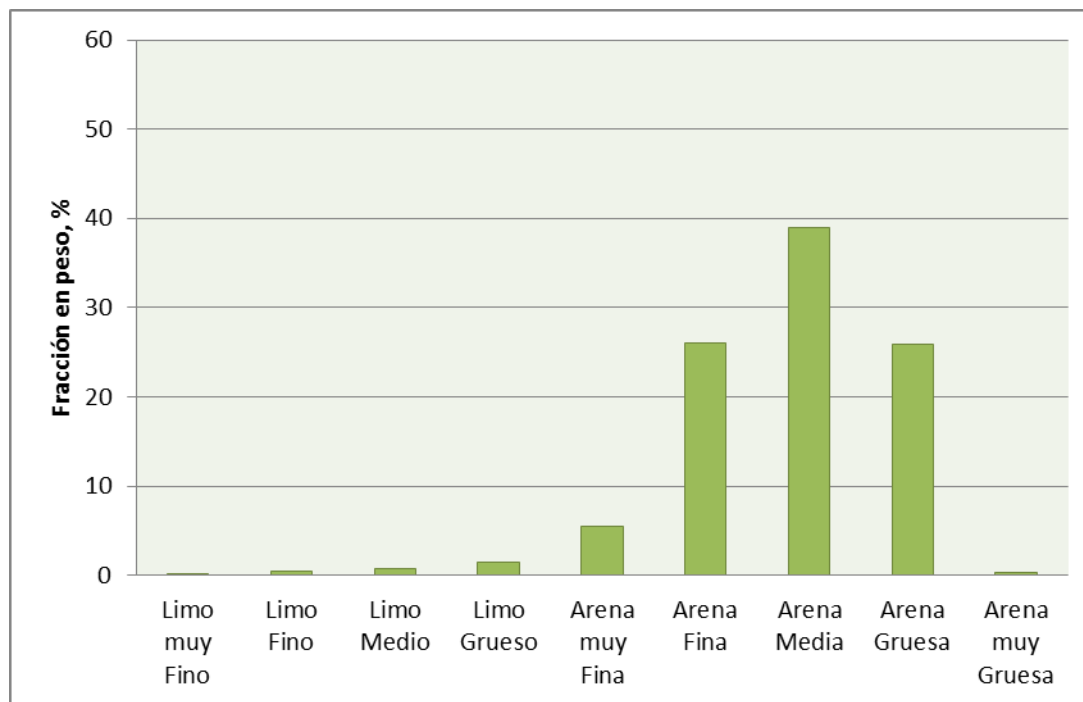
## - Muestra de afloramiento

Sólido de material particulado constituido por sílice y en menor proporción aluminio. De manera visual, se infiere que es un sólido mayoritariamente cuarzoso con algo de aluminosilicatos y granos de cuarzo de diversos tamaños que van desde fino a medio (Figura 35), sin embargo, en la Figura 36, se muestra la clasificación de tamaño de grano, con la cual se concluye que corresponde a una arena uniforme. Los granos se observan todos fracturados y muy escasos se observan con bordes angulosos. Sobre los granos se observa material particulado fino los cuales constituyen láminas de caolinita y micas (microgf. 10). De forma puntual se observó minerales pesados incrustados en granos (microgf. 11).

**Figura 35.** Aspecto y composición de la muestra de afloramiento



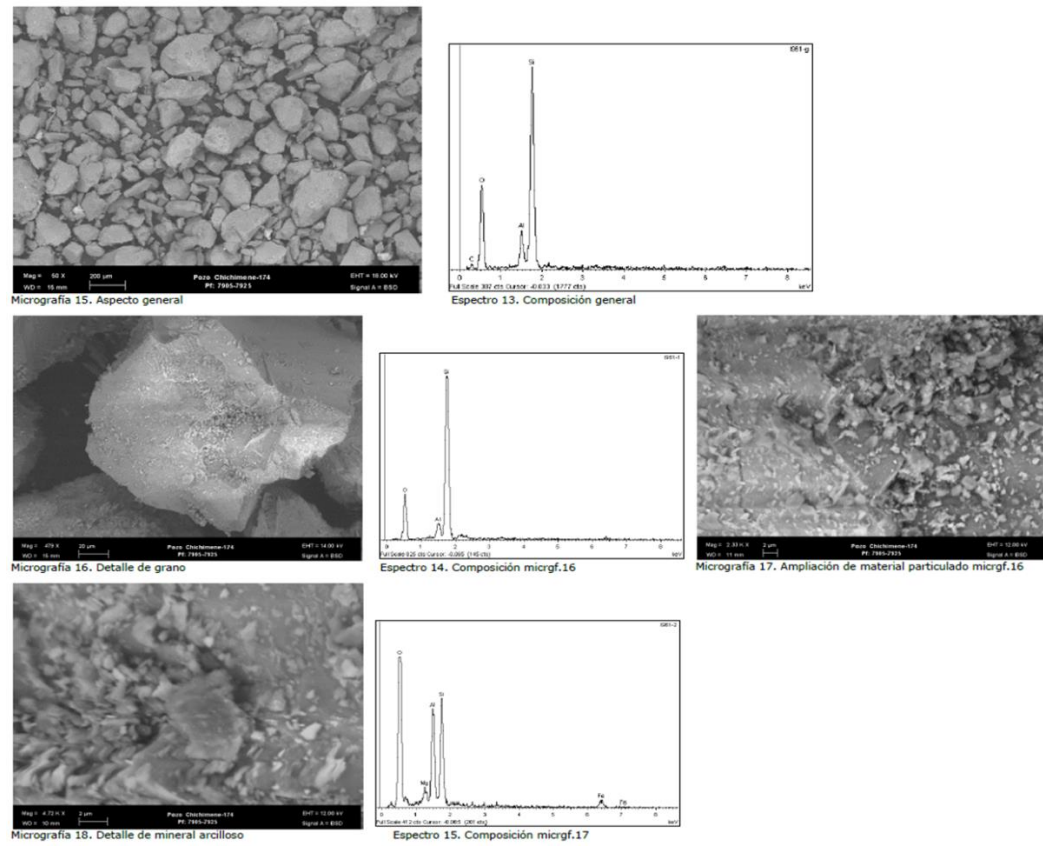
**Figura 36.** Clasificación de tamaño de grano para la muestra de afloramiento



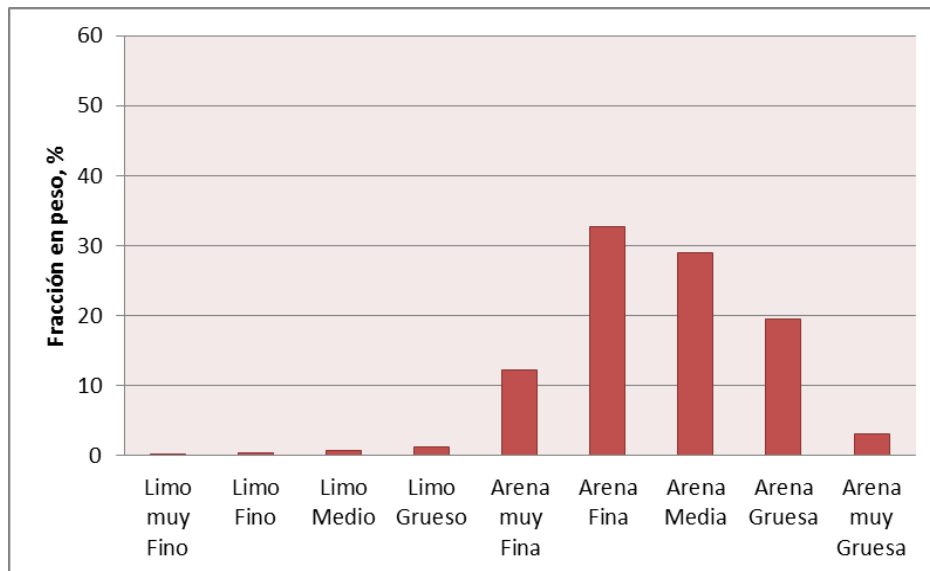
**- Muestra de ripios**

Sólido de material particulado constituido por sílice y en menor proporción aluminio y carbono. De manera visual, se infiere que es un sólido mayoritariamente cuarzoso con algo de aluminosilicatos. Los granos de cuarzo presentan diversos tamaños que van desde medio a fino (Figura 37), sin embargo, en la Figura 38, se muestra la clasificación de tamaño de grano, con la cual se concluye que corresponde a una arena no uniforme. Los granos se observan fracturados y pseudoredondeados. Sobre los granos se observa abundante material particulado fino los cuales constituyen láminas de minerales arcillosos (micrgf. 18) con composición de oxígeno, aluminio, silicio magnesio y hierro.

**Figura 37.** Aspecto y composición de la muestra de rípios



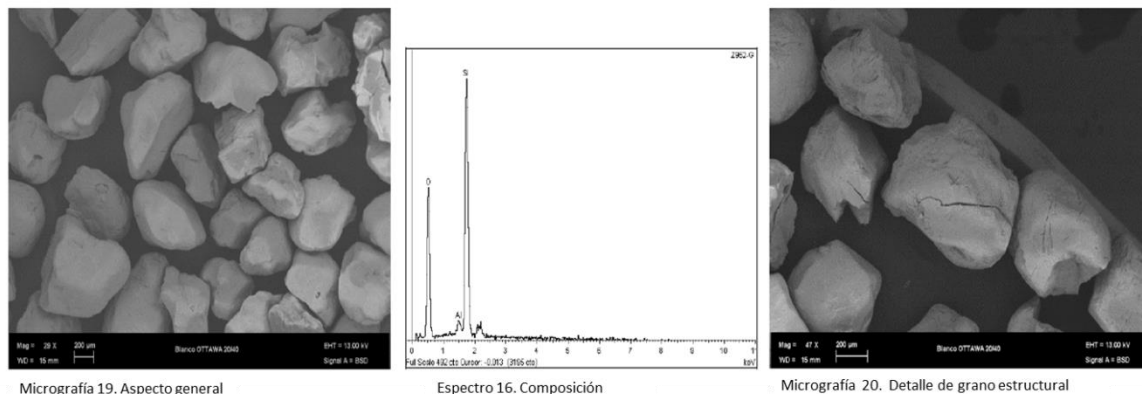
**Figura 38.** Clasificación de tamaño de grano para la muestra de rípios



### - Muestras de arena sintética

Sólido de material particulado el cual se encuentra constituido por sílice y en menor proporción aluminio, estos elementos infieren que es un sólido mayoritariamente cuarzoso, constituido por granos de diversos tamaños de borde pseudoredondeados y que van desde [460 -741]  $\mu\text{m}$  con algunos granos gruesos. A su vez se observan que algunos granos de forma muy puntual se encuentran fracturados (micrgf. 20). En esta arena no se observa minerales arcillosos.

**Figura 39.** Aspecto y composición de la muestra de arena sintética



Con los diferentes tipos de matriz se realizaron 6 pruebas de celda cinética para analizar la influencia que esta tiene en la cinética de las reacciones. Las pruebas realizadas se listan a continuación:

- Prueba 1 – Afloramiento Chichimene + Crudo Chichimene
- Prueba 2 – Afloramiento Chichimene
- Prueba 3 – Núcleo Chichimene + Crudo Chichimene
- Prueba 4 – Arena sintética1 (Mesh 20/40) + Crudo Chichimene
- Prueba 5 – Arena sintética2 (Tamaño de grano similar al núcleo) + Crudo Chichimene
- Prueba 6 – Ripios Chichimene + Crudo Chichimene

Las cantidades de roca y fluidos utilizadas en cada una de las pruebas se presentan en la Tabla 18 y las condiciones de operación para todas las pruebas en la Tabla 19.

**Tabla 18.** Cantidades de roca y fluidos utilizadas para preparación de las mezclas

|                                | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 | Prueba 4 | Prueba 5 | Prueba 6 |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Afloramiento [g]               | 100,001  | 100      | ----     | ----     | ----     | ----     |
| Core [g]                       | ----     | ----     | 100,03   | ----     | ----     | ----     |
| Arena Ottawa[g]                | ----     | ----     | ----     | 100,03   | 100,1    | ----     |
| Ripios [g]                     | ----     | ----     | ----     | ----     | ----     | 100,03   |
| Aceite [g]                     | 1,546    | 0        | 1,501    | 1,540    | 1,4998   | 1,501    |
| Pérdidas durante la mezcla [g] | 0,10     | ----     | 0,10     | 0,10     | 0,10     | 0,10     |
| Mezcla cargada al reactor[g]   | 101,45   | 100      | 101,43   | 101,47   | 101,41   | 101,43   |

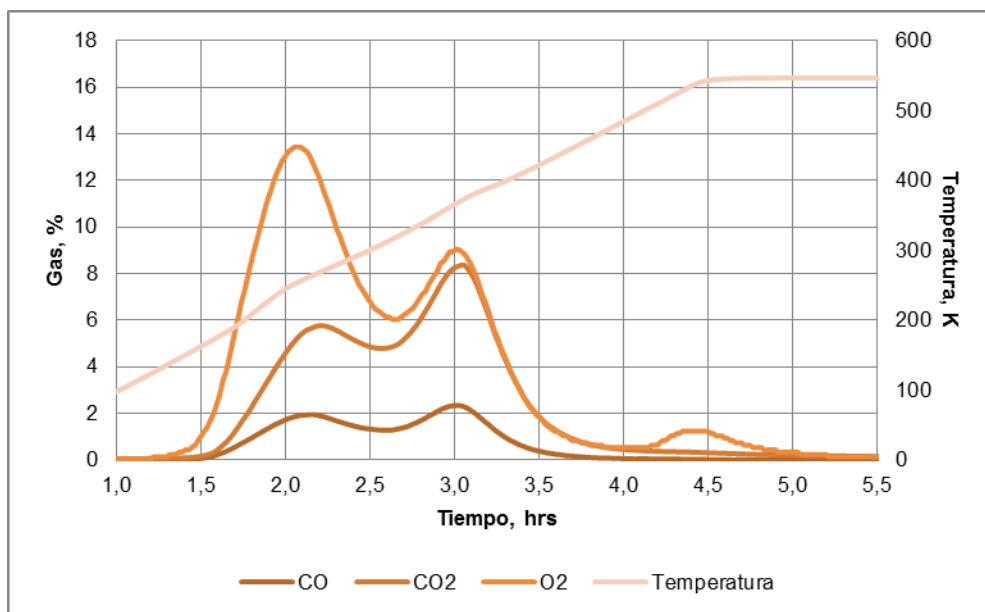
**Tabla 19.** Condiciones de operación establecidas para las pruebas de celda cinética

| Condición de Operación         | Valor  |
|--------------------------------|--------|
| Gas inyectado                  | Aire   |
| Tasa de flujo de aire [L/Hora] | 15     |
| Tasa de calentamiento [°C/min] | 2      |
| Set point de Temperatura [°C]  | 550    |
| Presión de Operación [Psig]    | 1200   |
| Tiempo de la prueba [h]        | 5,1    |
| Concentración de Oxígeno       | 20,94% |

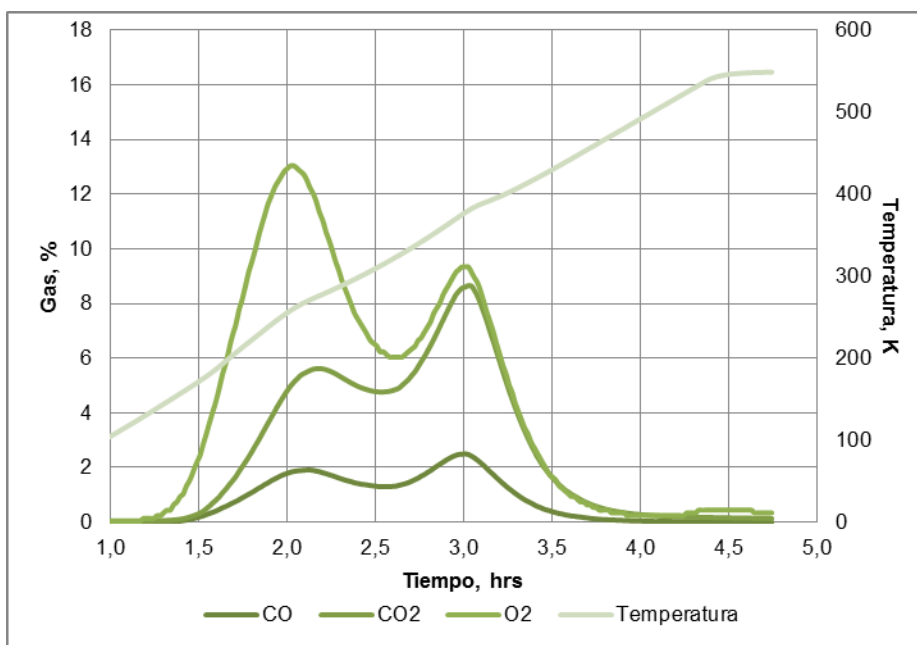
### 3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CELDA CINETICA

En las Figuras 40 a 44 se presentan el consumo de O<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub> producidos y temperatura de la muestra para cada una de las pruebas de celda cinética realizadas con crudo del campo Chichimene y los diferentes tipos de matriz.

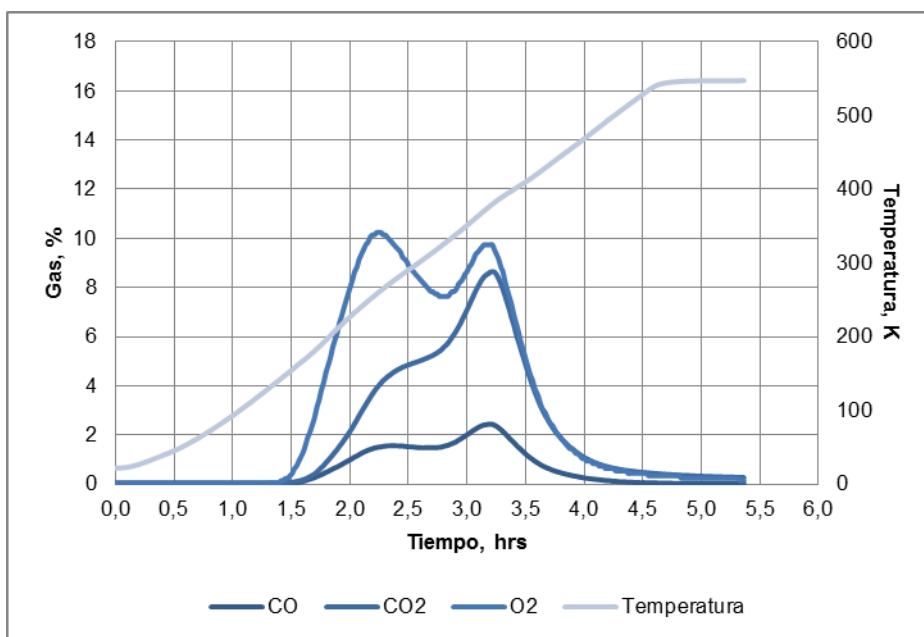
**Figura 40.** Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con núcleo



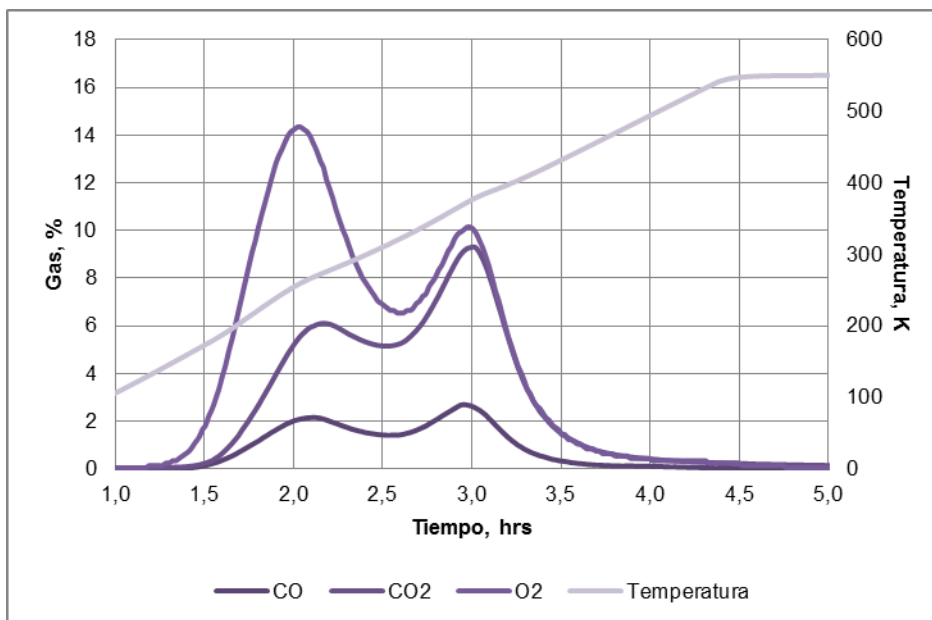
**Figura 41.** Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con afloramiento



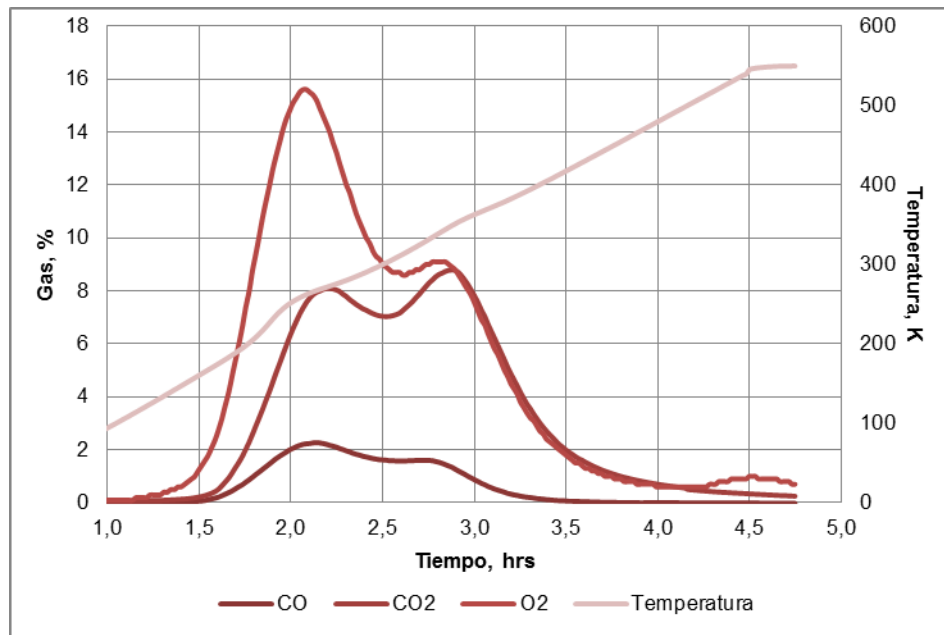
**Figura 42.** Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con arena sintética 1



**Figura 43.** Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con arena sintética 2



**Figura 44.** Oxígeno consumido y gases producidos en la prueba de celda cinética con rípidos



### 3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los parámetros de la combustión calculados a partir de la composición de los gases producidos, son útiles al momento de evaluar el estado de un proceso de inyección de aire. Dichos parámetros reflejan la estabilidad del proceso de combustión bajo las condiciones investigadas y permiten indagar acerca del tipo de reacciones que están ocurriendo. En este estudio se evaluarán:

- Oxígeno consumido
- Relación aparente hidrógeno-carbono

A continuación se presentan las definiciones, ecuaciones, rangos y tendencias para estos parámetros, así como el cálculo de los mismos y su respectivo análisis.



### 3.2.1 Oxígeno consumido

El oxígeno consumido se refiere a la cantidad del oxígeno inyectado que reacciona con el hidrocarburo ya sea en las reacciones de baja temperatura o en las reacciones de combustión.

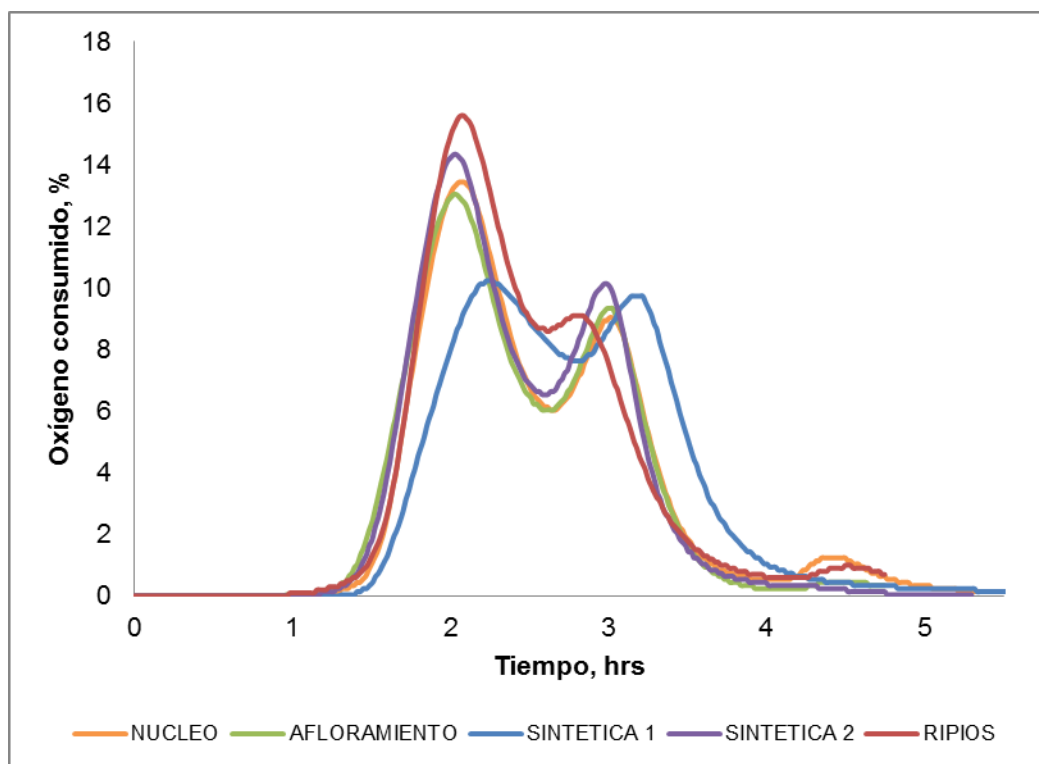
El oxígeno consumido se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$O_{2\text{consumido}} = \frac{[O_{2\text{entrada}} (1 - CO_{2\text{formado}} - CO_{\text{formado}}) - O_{2\text{producido}}]}{(1 - CO_{2\text{formado}} - CO_{\text{formado}} - O_{2\text{producido}})}$$

#### Análisis de resultados:

- ✓ En las cinco pruebas existen dos picos significativos a diferentes temperaturas en la producción de óxidos de carbono. Este resultado confirma la existencia de por lo menos dos reacciones. A temperaturas altas (648-656 K) la cantidad de oxígeno consumido es aproximadamente comparable con la cantidad de óxidos de carbono producidos ( $CO_2 + \frac{1}{2} CO$ ). Sin embargo, a temperaturas bajas la cantidad de oxígeno consumido es mucho más grande que los óxidos de carbono producidos. Esto indica que cierta cantidad de oxígeno se consume en reacciones de adición, mientras que la otra cantidad reacciona para generar óxidos de carbono. Por último, a temperaturas mucho más bajas, cierta cantidad de oxígeno es consumida sin generación de óxidos de carbono.
- ✓ En las pruebas realizadas con núcleo, afloramiento y ripios se está presentando un tercer pico de consumo de oxígeno a una temperatura aproximada de 820 K (Figura 45).

**Figura 45.** Consumo de oxígeno para las pruebas de celda cinética realizadas con núcleo, afloramiento, arena sintética y ripios.



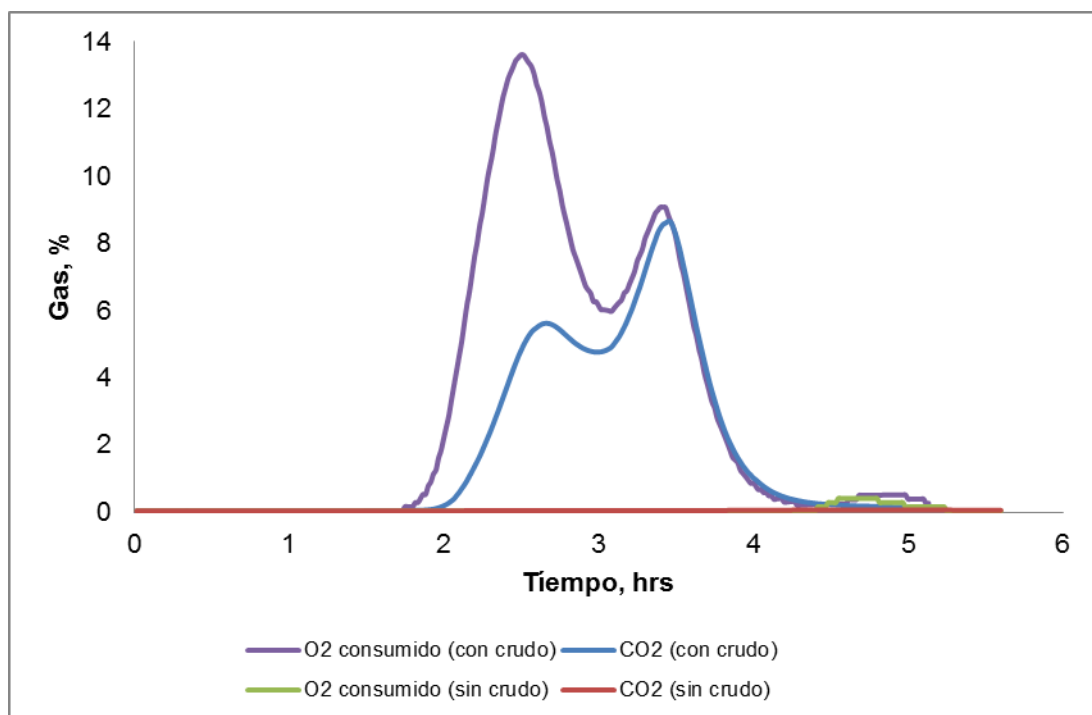
Existen 3 causas que podrían explicar la presencia de este tercer pico:

1. Presencia de materia orgánica (kerógeno) en la matriz, en cuyo caso, se deberían producir óxidos de carbono.
2. Reacción a altas temperaturas de algunos constituyentes de la matriz con el oxígeno. Para analizar este caso es importante la realización de un estudio mineralógico antes y después de realizar la prueba.
3. Material proveniente del equipo de celda cinética (grasa quemada, material de relleno, etc).

En la prueba realizada con arena sintética y el crudo de Chichimene, existen solamente dos picos correspondientes a LTO (Low Temperatura Oxidation) y HTO (High Temperature Oxidation). Lo anterior significa que el tercer pico que se

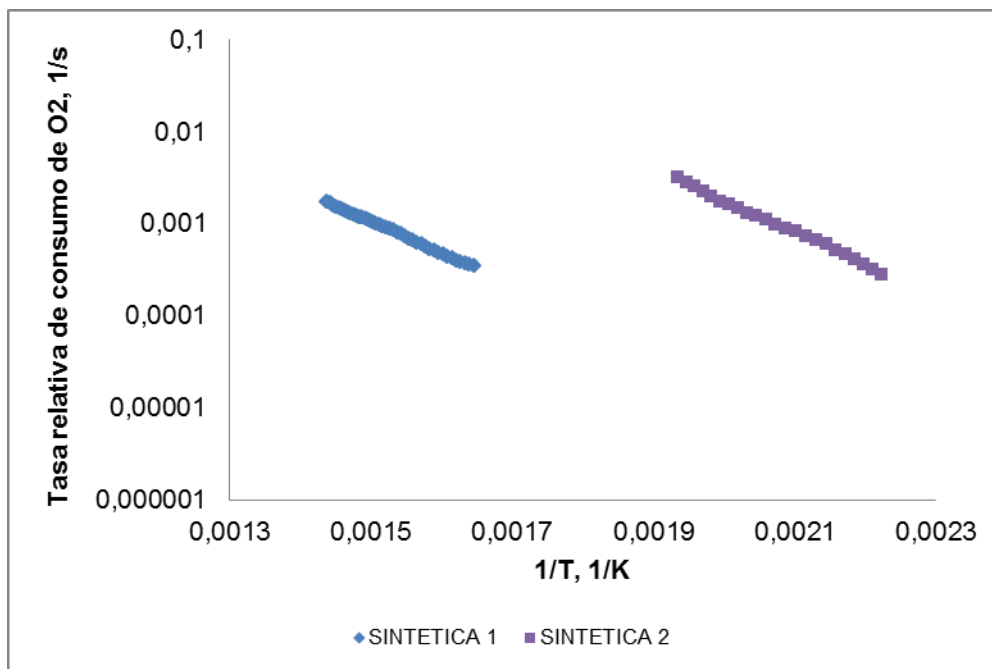
observa en las otras tres pruebas no está relacionado con el crudo de Chichimene ni con el equipo utilizado para la realización de las pruebas, ya que las cuatro pruebas se realizaron con el mismo equipo y el mismo crudo. Adicionalmente, en este tercer pico solo se presenta consumo de oxígeno sin formación adicional de óxidos de carbono, por lo que probablemente tampoco está relacionado con la presencia de kerógeno en la matriz. Por lo tanto, una posibilidad para explicar este consumo de oxígeno (tercer pico) es la reacción de algunos constituyentes de la matriz a altas temperaturas con el oxígeno. Para evaluar este caso particular, se realizó una nueva prueba con la matriz de afloramiento con las mismas condiciones de la prueba inicial, pero sin crudo. Los resultados mostraron nuevamente la presencia del tercer pico de consumo de oxígeno sin la presencia de óxidos de carbono, lo que lleva a la conclusión de que este tercer pico se debe a la reacción de algunos minerales de la matriz a altas temperaturas. Los resultados se muestran en la Figura 46:

**Figura 46.** Oxígeno consumido y gases producidos en las pruebas de celda cinética realizadas con matriz afloramiento



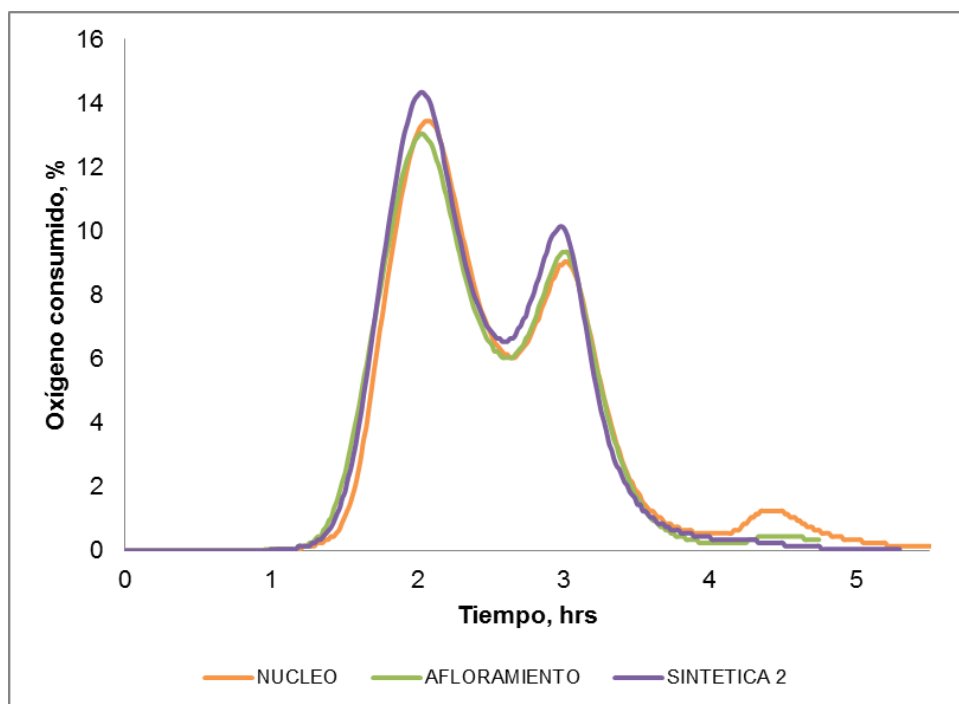
- ✓ En las cinco pruebas el pico de consumo de oxígeno de baja temperatura es más alto que el pico de alta temperatura lo que indica una buena reactividad del crudo y mayor probabilidad de alcanzar la ignición de manera espontánea. Esto ha sido confirmado por pruebas de celda isotérmica previamente desarrolladas para el fluido de la formación T2 del campo Chichimene.
- ✓ El consumo de oxígeno en la región de baja temperatura es más grande para la prueba realizada con ripios comparada con las pruebas realizadas con núcleo y afloramiento, las cuales presentan un comportamiento muy similar. El caso contrario ocurre con la prueba realizada con la arena sintética mesh 20/40, la cual presenta el consumo de oxígeno más bajo de todas las pruebas en esta región. El mayor consumo de oxígeno para la prueba realizada con ripios se atribuye a la presencia de arcilla, las cuales realizan un efecto catalítico y el menor consumo en la prueba realizada con arena sintética se atribuye a la combinación de dos efectos: la ausencia de arcillas y un mayor tamaño de grano que le otorga una menor área superficial.
- ✓ Se realizaron dos pruebas con arena sintética variando únicamente el tamaño de grano con el objetivo de reproducir el comportamiento de la prueba realizada con núcleo. La primera prueba (Sintética 1) se realizó con arena sintética con tamaño de grano mesh20/40 y la segunda (Sintética 2) con una distribución de grano similar a la muestra de núcleo llevando a que está presente una mayor área superficial pues presenta un tamaño de grano promedio menor. Los resultados de las dos pruebas variaron significativamente confirmando la influencia del tamaño de grano en la cinética de las reacciones. El consumo de oxígeno y por lo tanto, la velocidad de reacción (Figura 47), principalmente en la región de baja temperatura, son mayores en la prueba sintética 2 debido a que existe una mayor área superficial que permite que el aceite esté más disperso en la matriz, favoreciendo su contacto con el oxígeno y de esta manera disminuyendo la influencia del control difusional sobre la reacción.

**Figura 47.** Tasa relativa de consumo de oxígeno en la región de baja temperatura para las pruebas Sintética 1 y sintética 2



- ✓ En las pruebas de afloramiento y sintética 2, se logró reproducir en un alto grado el comportamiento de consumo de oxígeno y producción de óxidos de carbono, presentado en la prueba realizada con núcleo (Figura 48). Con la prueba de arena sintética 2, este comportamiento se logró, debido a que se conserva la misma mineralogía y distribución de grano similar entre las dos pruebas. En el caso de la prueba de afloramiento, se comprobó por medio de estudios petrológicos, DRX y SEM, que se trata de una muestra representativa de la matriz original del yacimiento.

**Figura 48.** Oxígeno consumido y gases producidos en las pruebas de celda cinética realizadas con matriz núcleo, afloramiento y arena sintética 2



### 3.2.2 Relación aparente hidrógeno-carbono (H/C), n

Para la combustión completa de un hidrocarburo, H/C es la relación de átomos de hidrógeno a átomos de carbono en el hidrocarburo que está siendo quemado. Para el proceso de inyección de aire, se usa el término H/C aparente debido a que el consumo de hidrógeno se basa en el balance de oxígeno, por lo tanto, las reacciones de baja temperatura o exceso de generación de CO<sub>2</sub> debido al quemado de un combustible previamente oxidado o las reacciones de descomposición mineral o la participación del agua en la reacción de combustión, impactan el cálculo<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> ALAMATSAZ, A., et al. Experimental investigation of in situ combustion at low air fluxes. SPE 144517. 2011. p.p. 5-6

La relación H/C se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$n = \frac{H}{C} = 4 \left[ \frac{O_{2\text{consumido}} - CO_{2\text{formado}} - \frac{CO_{\text{formado}}}{2}}{CO_{2\text{formado}} + CO_{\text{formado}}} \right]$$

### Rangos y tendencias:

- Una relación aparente H/C alta indica que una cantidad significativa de oxígeno fue consumida por reacciones de oxidación de baja temperatura<sup>20</sup>.
- Relaciones H/C menores que 2 indican que las temperaturas de oxidación están en el rango normalmente asociado con la combustión a alta temperatura<sup>21</sup>.
- La relación atómica aparente H/C del combustible disminuye a medida que la temperatura incrementa. Esta reducción se debe a la disminución en la concentración de hidrógeno en el coque, mientras que la concentración de carbono permanece constante<sup>22,23</sup>
- La relación atómica aparente H/C disminuye con el incremento del contenido de arcilla en la mezcla de arena utilizada en las pruebas<sup>24</sup>.

### Resultados de las pruebas:

En la Figura 49 se muestra el cálculo de H/C para las cuatro pruebas de celda cinética realizadas para el campo Chichimene con los diferentes tipos de matriz.

<sup>20</sup>BYL, M, G. MOORE, R y URSENBACH, M. Field observations of in situ combustion in a waterflooded reservoir in the Kinsella field. JCPT 01-03. 1993. p.p. 39.

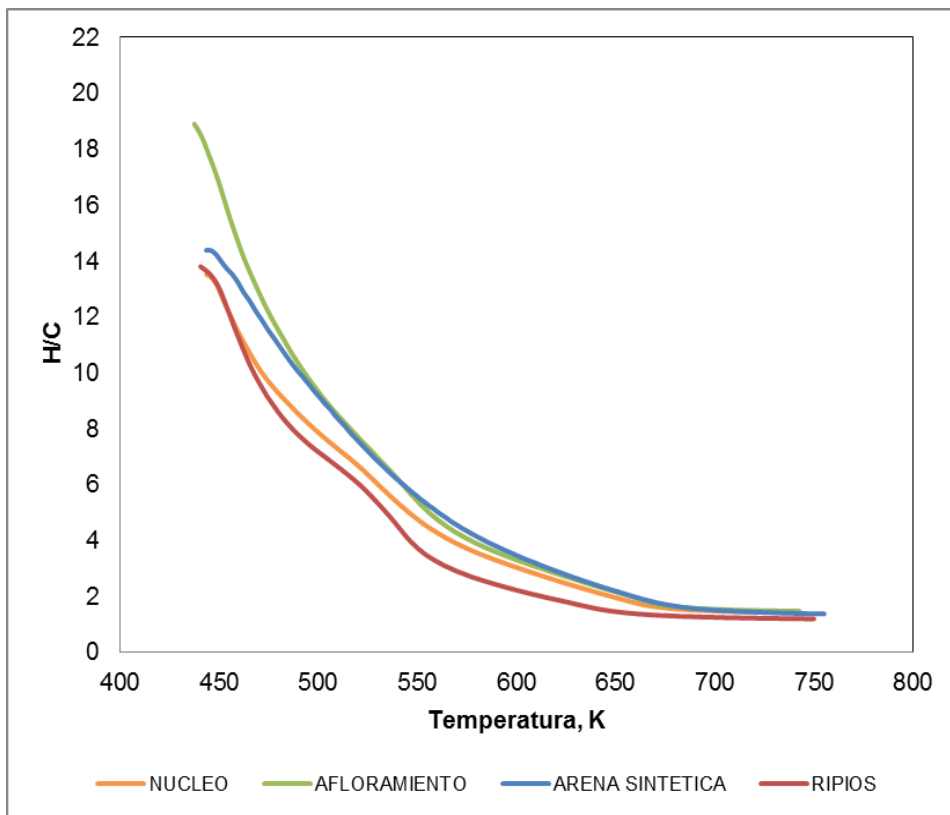
<sup>21</sup> MOORE, G., et al. Ramped temperature oxidation analysis of Athabasca oil sands bitumen. JCPT 95-23. 1999. p.p. 8.

<sup>22</sup>VOSSOUGH, S., et al. Automation of an in-situ combustion tube and study of the effect of clay on the in-situ combustion process. SPE 10320. 1981. p.p. 498.

<sup>23</sup> FASSIHI, M, BRINGHAM, W y RAMEY, H. Reaction kinetics of in-situ combustion: Part 1 – Observations. Society of petroleum Engineers Journal. Agosto 1984.p.p. 406.

<sup>24</sup>VOSSOUGH, S., et al.Op. cit., p. 498.

**Figura 49.** Relación aparente H/C para las pruebas de celda cinética realizadas con núcleo, afloramiento, arena sintética y ripios.



#### Análisis de resultados:

- ✓ Según Moore et al, una relación H/C menor de 2 indica que las temperaturas de oxidación están en el rango normalmente asociado con la combustión a alta temperatura. Para la prueba realizada con ripios, este rango inicia a partir de los 610 K, en las pruebas realizadas con arena sintética 1 y afloramiento a 658 y K y en la prueba con núcleo a partir de los 648 K. La reacción de alta temperatura inicia a una temperatura más baja para la prueba realizada con ripios, debido a la presencia de arcilla que realizan un efecto catalítico.
- ✓ A temperaturas bajas los valores de H/C son altos lo cual indica que una cantidad significativa de oxígeno fue consumida por reacciones de oxidación de



baja temperatura. Las pruebas realizadas con afloramiento y ripios presentan los valores más altos de H/C en esta región comparada con las pruebas realizadas con núcleo y arena sintética, lo cual se debe a la presencia de materiales arcillosos que realizan un efecto catalítico que lleva a un mayor consumo de oxígeno en esta región.

### **3.3 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE MUESTRAS DE ARENA SINTÉTICA Y AFLORAMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CELDA CINÉTICA**

Los resultados de las pruebas de celda cinética realizadas con muestras de afloramiento y arena sintética 2, mostraron que es posible reproducir el comportamiento de la prueba realizada con núcleo, utilizando este tipo de matrices. El análisis de estos resultados, presentado en la sección anterior, muestra que esta similitud en los resultados se debe a dos factores principales: la mineralogía y el tamaño de grano. Por lo anterior, la metodología para realizar las pruebas de celda cinética con estos tipos de muestra, logrando así sustituir el uso de muestras de núcleo, consiste básicamente en reproducir estos dos factores.

Para realizar las pruebas de celda cinética con muestra de afloramientos, se requiere:

1. Análisis petrográfico para la muestra de núcleo
2. Pruebas SEM y DRX para la muestra de núcleo
3. Reconocimiento en campo de secciones aflorantes de la formación coetánea a la muestra de núcleo (misma formación, mismo tiempo).
4. Levantamiento de columnas estratigráficas en campo y toma de registro gamma ray.

5. Correlación de columnas estratigráficas en campo con pozos de la misma formación de interés (idealmente corazonados), basados en datos bioestratigráficos que permiten la datación de los diferentes intervalos.
6. Toma de muestras de los niveles identificados.
7. Análisis petrográfico para la muestra de afloramiento.
8. Pruebas SEM y DRX para la muestra de afloramiento.
9. Comparación de los resultados de laboratorio sobre la similaridad de las características composicionales, texturales (tamaño de grano y selección)

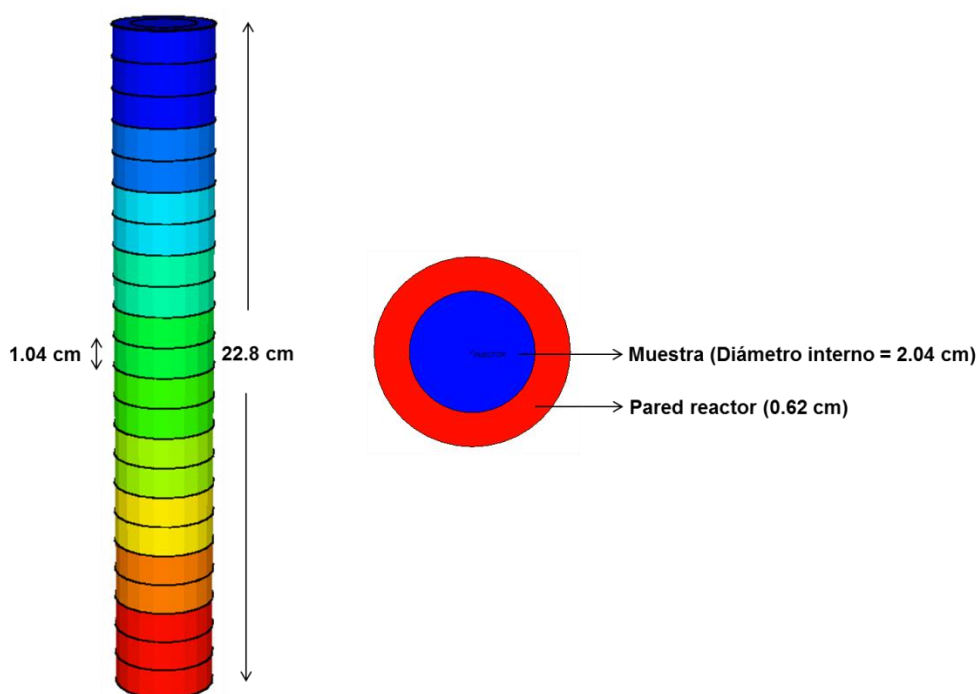
Para realizar las pruebas de celda cinética con muestra de arena sintética, se requiere:

1. Análisis petrográfico para la muestra de núcleo
2. Pruebas CEM y DRX para la muestra de núcleo
3. Comparación de los resultados de laboratorio sobre la similaridad de las características composicionales.
4. Reproducción con la arena sintética, de la distribución de tamaño de grano de la muestra de núcleo, incluyendo los minerales arcillosos, en caso de estar presentes en la muestra de núcleo.

#### 4. AJUSTE NUMERICO DE LAS PRUEBAS DE CELDA CINETICA

El procedimiento se presentará por medio del ajuste de la prueba realizada con núcleo del yacimiento. Las simulaciones se realizaron con el software comercial STARS. Se construyó un modelo radial con 22 celdas en la dirección  $z$  y 2 celdas en la dirección  $r$ . La primera celda en la dirección  $r$  representa la muestra y la segunda representa la pared del reactor (Hastelloy C 276) (Ver Figura 27). En la Figura 50 se presentan los detalles del modelo radial utilizado.

**Figura 50.** Dimensiones de las celdas en el modelo radial



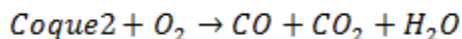
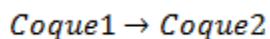
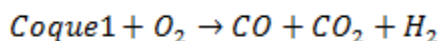
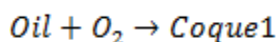
Los calentadores fueron ubicados en la pared del reactor y se impuso la tasa lineal de calentamiento asignando la temperatura programada en los calentadores a cada paso de tiempo. En la siguiente tabla se presentan otras propiedades del modelo de simulación:

**Tabla 20.** Propiedades del modelo de simulación

| Propiedad               | Valor                                                                                          |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Porosidad, %            | 40 (zona de la muestra)<br>0 ( pared del reactor)                                              |
| Permeabilidad i,j,k, mD | 30000                                                                                          |
| Saturación de aceite, % | 4.6                                                                                            |
| Saturación de gas, %    | 95.4<br>Fracción molar de O <sub>2</sub> = 0.2094<br>Fracción molar de N <sub>2</sub> = 0.7906 |
| Masa de aceite, g       | 1.5                                                                                            |
| Temperatura inicial, °F | 75                                                                                             |
| Presión inicial, psi    | 1200                                                                                           |

Las propiedades térmicas de la mezcla y el reactor, el modelo de fluidos y las curvas de permeabilidad relativa utilizadas en el modelo de simulación, se muestran en el APENDICE 1.

Para realizar el ajuste numérico de las pruebas de celda cinética se empleó un esquema de 4 reacciones propuesto por Cinar<sup>25</sup>. Cinar plantea la ocurrencia de una reacción de adición y una de combustión en el régimen de baja temperatura, una reacción de craqueo y una reacción de combustión en el régimen de alta temperatura. El esquema de reacciones utilizado, se presenta a continuación:



Los parámetros cinéticos iniciales (energía de activación y factor de frecuencia) se calcularon con base en la metodología propuesta por Fassihi<sup>26</sup>, quien propone un esquema de 3 reacciones: depositación de combustible, combustión del combustible y oxidación a baja temperatura. Los parámetros calculados para la

<sup>25</sup> CINAR, M. Kinetics of crude-oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. Tesis de doctorado. Agosto 2011.

<sup>26</sup>FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 130-139.

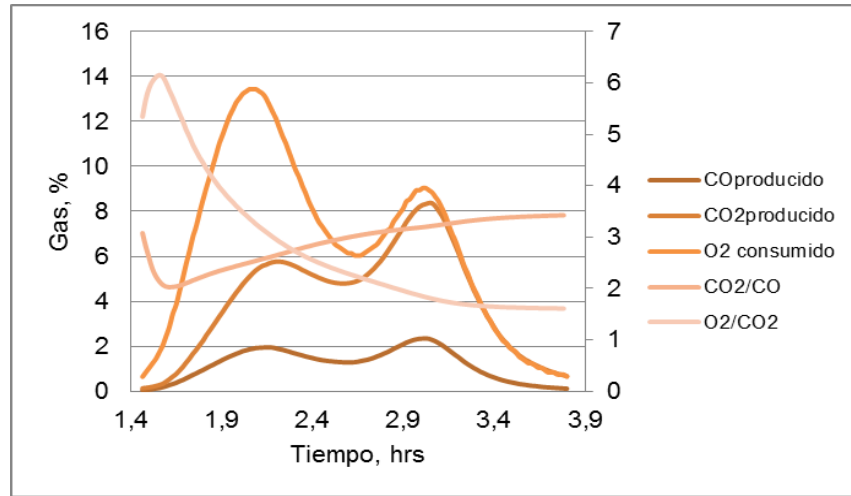
reacción de oxidación a baja temperatura de la metodología Fassihi, se asignaron a la reacción 1 del esquema propuesto por Cinar. De igual modo, los parámetros calculados para la reacción de depositación de combustible en la metodología de Fassihi, se asignaron a la reacción 3 y los calculados para la reacción de combustión de combustible se asignaron a las reacciones 2 y 4. En el APENDICE 2 se presenta el cálculo de los parámetros cinéticos. Para estimar la entalpía de cada reacción se consideró que el calor liberado por el oxígeno consumido en cada reacción fue de 100 calorías por mol. Todas las reacciones se asumen ser de primer orden con respecto a las concentraciones de oxígeno y combustible. En la siguiente tabla se muestran los parámetros cinéticos iniciales para la prueba de celda cinética realizada con núcleo:

**Tabla 21.** Parámetros cinéticos para la prueba de celda cinética realizada con núcleo

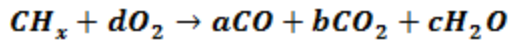
|                               | Reacción 1 | Reacción 2 | Reacción 3 | Reacción 4 |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ea (BTU/lbmol)</b>         | 26385,15   | 26385,15   | 28494,52   | 30468,05   |
| <b>Frecuencia [1/día*psi]</b> | 1,84E+06   | 1,84E+06   | 1,09E+06   | 1,74E+05   |
| <b>Entalpía [BTU/lbmol]</b>   | 2,46E+05   |            | 7,75E+03   | 4,83E+05   |
| <b>Orden de reacción</b>      | 1          | 1          | 1          | 1          |

Después de estimar los parámetros cinéticos se procede a estimar los coeficientes estequiométricos para las 4 reacciones. Los coeficientes para las reacciones 2 y 4 se calculan a partir de las relaciones CO/CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> promedio en las regiones baja y alta temperatura. De los resultados experimentales (Figura 51), la relación CO/CO<sub>2</sub> promedio es aproximadamente 2.54 en la región de baja temperatura y 3.27 en la región de alta temperatura. La relación O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> es 3.73 en la región de baja temperatura y 1.79 en la región de alta temperatura.

**Figura 51.** Gases de combustión y relación CO/CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> para la prueba de celda cinética realizada con núcleo



Los coeficientes estequiométricos se calcularon por medio de las siguientes expresiones:



$$Z = 2mn - 1 - 2m$$

$$X = 2Z/(1 + m)$$

$$a = 1/(1 + m)$$

$$b = m/(1 + m)$$

$$c = (2mn - 1 - 2m)/(1 + m)$$

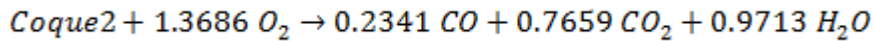
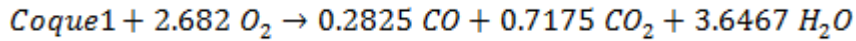
$$d = mn/(1 + m)$$

$$m = CO/CO_2$$

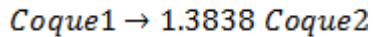
$$n = O_2/CO_2$$

Por simplicidad, se asumió que el coque está formado de átomos de carbono e hidrógeno, es decir, se desprecia la presencia de oxígeno. El peso molecular del coque 1 y coque 2 se calcula por medio del balance de masa de las reacciones. A

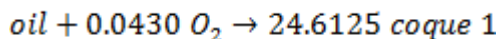
continuación se presentan el balance de las reacciones de combustión para las regiones de baja y alta temperatura:



Los coeficientes para la reacción 3 se calcularon con un balance de masa simple teniendo en cuenta que los pesos moleculares del coque 1 y coque 2 se calcularon durante el balance de las reacciones de combustión.



Finalmente, la estequiometria de la primera reacción se calcula por medio de balance de masa. Se requiere conocer: masa de aceite en el reactor y su peso molecular y la masa de oxígeno consumida en la región de baja temperatura. Adicionalmente, se asume que la totalidad del aceite reacciona con el oxígeno para formar el Coque1. La masa de oxígeno que reaccionó en la región de baja temperatura se calculó a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de Fassihi.



El ajuste de la prueba en el simulador inicia con la optimización de los parámetros cinéticos. Se variaron el factor pre-exponencial y los órdenes de reacción, principalmente. No se variaron la energía de activación y la entalpía ya que estas son calculadas directamente mediante la metodología de Fassihi y a partir de la cantidad de oxígeno consumido por cada una de las reacciones, respectivamente. En la etapa de optimización de los parámetros cinéticos se logró reproducir el tiempo de ocurrencia de los picos de consumo de oxígeno y la producción óxidos

de carbono en las regiones de baja y alta temperatura; sin embargo, no se logra reproducir totalmente la cantidad de gases producidos. Por lo tanto, para lograr un mejor ajuste, se realizaron modificaciones en los coeficientes estequiométricos de las reacciones de combustión en las regiones de baja y alta temperatura, tratando de conservar siempre las relaciones  $\text{CO}/\text{CO}_2$  y  $\text{CO}/\text{O}_2$  calculadas a partir de los datos experimentales. Por último, después de obtener un buen ajuste de manera manual, se procedió a utilizar un software de optimización en el cual se varió solamente el factor pre-exponencial en un rango muy cercano al obtenido en el primer ajuste y de esta manera lograr un ajuste más cercano a los datos experimentales.

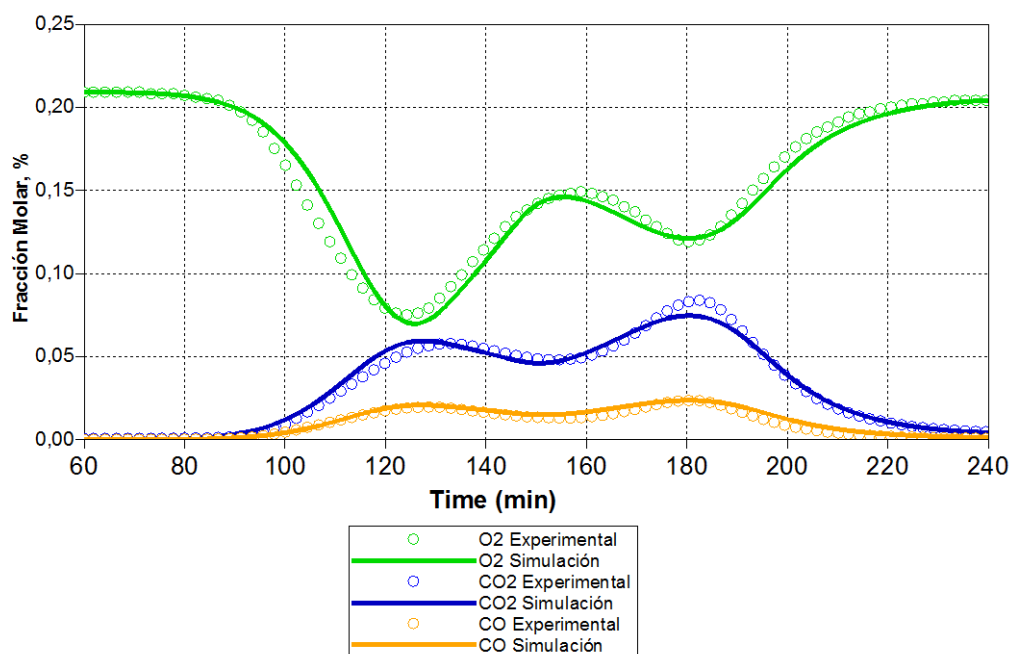
En la Tabla 22 se presentan los balances estequiométricos y parámetros cinéticos finales obtenidos del ajuste de la prueba de núcleo los cuales aplicarían para las pruebas de afloramiento y sintética 2; y en las Figuras 52 a 54 se muestran los ajustes obtenidos para el consumo de oxígeno y óxidos de carbono producidos en cada prueba.



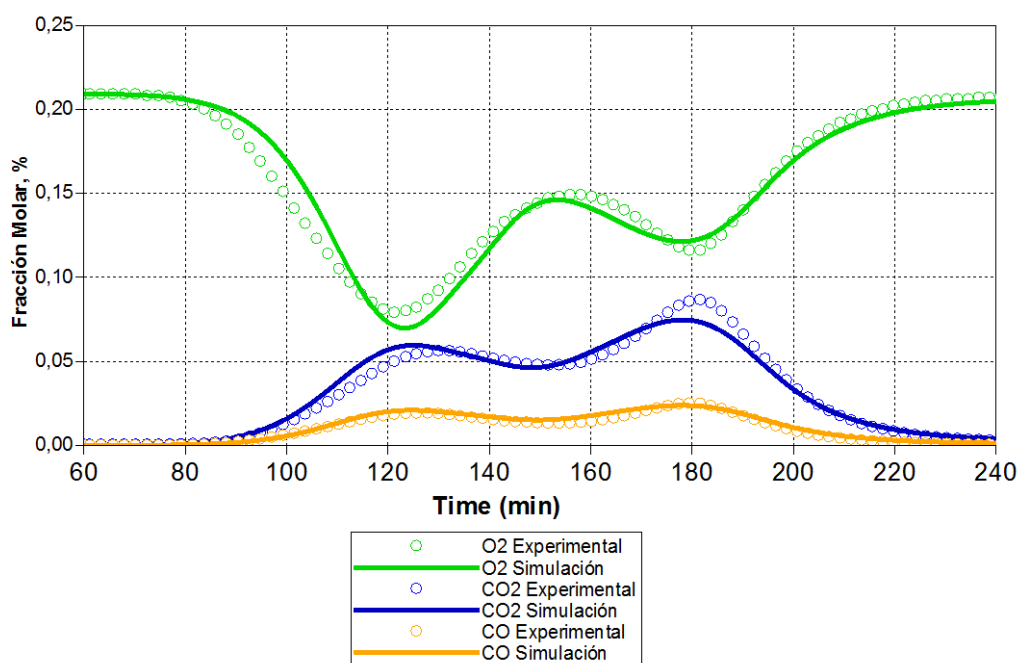
**Tabla 22.** Balances estequiométricos y parámetros cinéticos finales obtenidos del ajuste de la prueba de celda cinética realizada con núcleo

|                                                                                                                                                                                      |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Reacción de Craqueo:</b><br><i>Coque1</i> → 1.3812 <i>Coque2</i>                                                                                                                  |              |
| <b>Parámetro</b>                                                                                                                                                                     | <b>Valor</b> |
| A [1/psi]                                                                                                                                                                            | 2.1E+08      |
| Ea [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 28494        |
| ΔH [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | -9.00E+04    |
| Orden de reacción combustible                                                                                                                                                        | 1            |
| <b>Reacción de Adición:</b><br><i>Oil</i> + 0.1274 <i>O</i> <sub>2</sub> → 24.782024 <i>Coque1</i>                                                                                   |              |
| A [1/psi*día]                                                                                                                                                                        | 1.27E+07     |
| Ea [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 26385        |
| ΔH [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 7.72E+04     |
| Orden de reacción oxígeno                                                                                                                                                            | 1            |
| <b>Reacción de Combustión baja temperatura:</b><br><i>Coque1</i> + 3.00 <i>O</i> <sub>2</sub> → 0.39 <i>CO</i> + 1.10 <i>CO</i> <sub>2</sub> + 3.1055 <i>H</i> <sub>2</sub> <i>O</i> |              |
| A [1/psi*día]                                                                                                                                                                        | 1.39E+06     |
| Ea [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 30468        |
| ΔH [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 5.40E+05     |
| Orden de reacción oxígeno                                                                                                                                                            | 1            |
| <b>Reacción de Combustión alta temperatura:</b><br><i>Coque2</i> + 0.65 <i>O</i> <sub>2</sub> → 0.19 <i>CO</i> + 0.60 <i>CO</i> <sub>2</sub> + 0.165 <i>H</i> <sub>2</sub> <i>O</i>  |              |
| A [1/psi*día]                                                                                                                                                                        | 1.5E+05      |
| Ea [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 30468        |
| ΔH [BTU/lbmol]                                                                                                                                                                       | 1.17E+05     |
| Orden de reacción oxígeno                                                                                                                                                            | 1            |

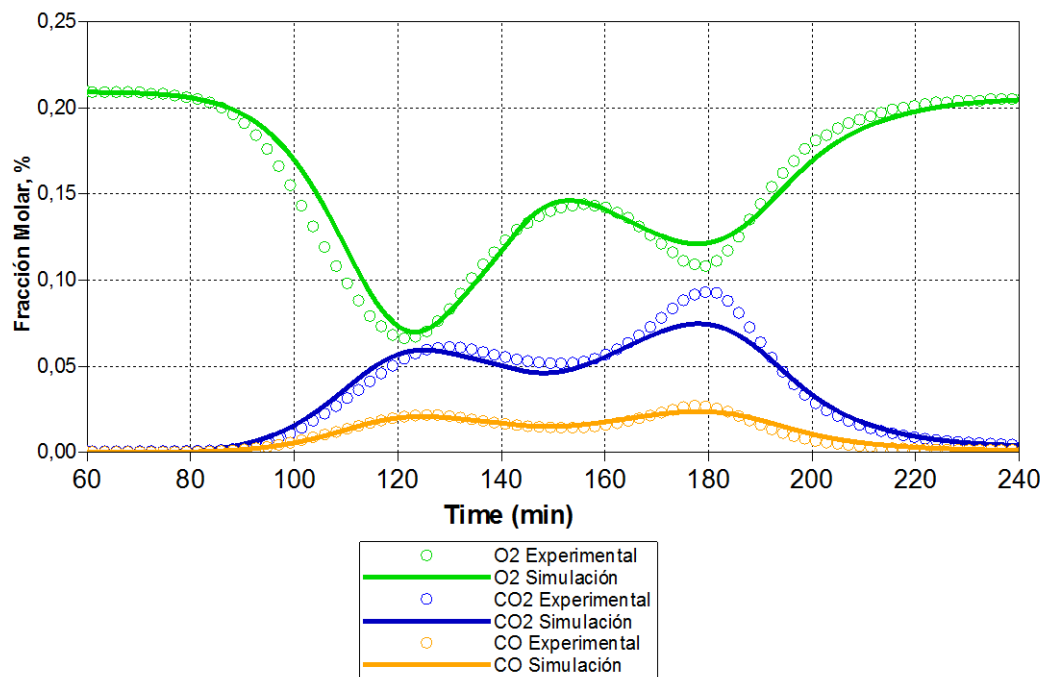
**Figura 52.** Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con núcleo



**Figura 53.** Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con afloramiento



**Figura 54.** Ajuste del oxígeno consumido y óxidos de carbono producidos durante la prueba de celda cinética realizada con arena sintética 2



## 5. CONCLUSIONES

- De acuerdo los resultados de la prueba de celda cinética, los ripios mostraron un comportamiento totalmente diferente a la prueba realizada con núcleo, lo que lleva a la conclusión de que no es un material adecuado para reemplazar el núcleo del yacimiento. Esto se debe a que los ripios pueden contener minerales (principalmente arcillas asociadas al lodo de perforación), los cuales durante el proceso de limpieza de la muestra, existe la posibilidad de no ser removidos totalmente. Adicionalmente, siempre existirá incertidumbre en la profundidad ya que se utilizan intervalos de muestreo y la posibilidad de contaminación de intervalos estratigráficos superiores provocada por derrumbes.
- Los resultados de las pruebas de celda cinética realizadas con afloramiento y arena sintética 2, mostraron que es posible reproducir el comportamiento de la prueba realizada con núcleo. En el caso de la arena sintética se debe controlar el tamaño de grano y el contenido de arcilla de la misma; y en el caso de la muestra de afloramiento es indispensable un estudio detallado de su composición mineralógica y características texturales.
- Es posible realizar estudios confiables de laboratorio para el proceso de inyección de aire, utilizando empaquetamientos alternativos al núcleo del yacimiento. Esta posibilidad se traduce en ahorros significativos para un estudio de factibilidad técnica de la implementación del proceso de inyección de aire, ya que no es necesario disponer de cantidades elevadas de núcleo para realizar principalmente las pruebas de tubo de combustión. De igual modo, se abre la posibilidad de realizar estudios de laboratorio en campos donde no existen pozos corazonados o se han agotado las muestras de núcleo o estas están destinadas a otros estudios.

- Con el modelo de cuatro reacciones de Cinar, el cual comprende dos reacciones de combustión (baja y alta temperatura), una reacción de adición y una de caqueo; se logró representar la cinética de las pruebas realizadas con afloramiento, núcleo y arena sintética. El principal parámetro de ajuste en el simulador fue el factor de frecuencia y en menor nivel la estequiometría.

## 7. RECOMENDACIONES

- Debido a que se observó una influencia significativa del control difusional sobre la cinética de las diferentes pruebas, se recomienda realizarlas con cantidades de aceite y matriz menores a las utilizadas en este trabajo y en proporciones que garanticen un mayor esparcimiento del aceite en la matriz.
- Se recomienda realizar pruebas de celda cinética variando solamente el contenido de arcilla de la matriz y de esta manera cuantificar el efecto de este mineral en la cinética de la combustión. Lo anterior permitiría generar una correlación que permita relacionar los cambios que se presentan en los parámetros cinéticos dependiendo del contenido de arcilla en la matriz, para un crudo determinado.

## BIBLIOGRAFIA

ADAGULU, G y AKKUTLU, I. Combustion front behavior in porous media with catalytic agents. SPE 99635.

ALAMATSAZ, A, .et al. Experimental investigation of in situ combustion at low air fluxes. SPE 144517.

ALVARADO, D y BANZER, C. Recuperación térmica de petróleo. Re-editado y corregido por: Dr. Adafel C. Rincón. Caracas 2002.

AWOLEKE, Olurotimi. An experimental investigation of in-situ combustion in heterogeneous media. Tesis de maestría. Universidad de Stanford. 2007. 76 p.

BAGSI, A, .et al. Combustion reaction kinetics in limestone containing heavy oils. SPE 15737. 12 p.

BARDON, C., GADELLE, C. Essai de laboratoire pour l'étude de la combustion in-situ, Citado por: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. 288 p.

BOUSAID, I., RAMEY, H. Oxidation of crude oil in porous media, Citado por: FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. 288 p.

BRIGHAM, W y CASTANIER, L. Chapter 16. (Reservoir Engineering Section). Insitu Combustion.

BURGER, J y SAHUQUET, B. Chemical aspects of in-situ combustion-heat of combustion kinetics. SPE 3599. 1972. 13 p.

BYL, M, G. MOORE, R y URSENBACH, M. Field observations of in situ combustion in a waterflooded reservoir in the Kinsella field. JCPT 01-03. 1993.

CHEN, B. Investigation of in-situ combustion kinetics using the isoconversional principle. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 2012.

Cinar, M. et al. Combustion kinetics of heavy oils in porous media. Energy & Fuels. 2011.

CINAR, Murat. Kinetics of crude-oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 2011.

CINAR, M, *et al.* Predictability of crude oil in-situ combustion by the isoconversional kinetic approach. En: SPE Journal. Septiembre, 2011. p. 537-547.

FADAEI, H, et al. Experimental and numerical analysis of in-situ combustion in fractured core. En: SPE Journal. Junio, 2011. pp 358-373.

FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. 288 p.

FASSIHI, M, BRINGHAM, W y RAMEY, H. Reaction kinetics of in-situ combustion: Part 1 – Observations. Society of petroleum Engineers Journal. Agosto 1984.



MAMORA, D. New findings in low-temperature oxidation of crude oil. SPE 29324. 1995. 15 p.

MOORE, G., et al. Ramped temperature oxidation analysis of Athabasca oil sands bitumen. JCPT 95-23. 1999.

REN, Y., et al. A Simple Kinetic Model for Coke Combustion During an In Situ Combustion (ISC) Process. Presented at the Petroleum Society's 6th Canadian International Petroleum Conference (56th Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, June 7 – 9, 2005.

Reporte: Estudio de las características de oxidación con rampa de temperatura - RTO para el campo Chichimene. Instituto Colombiano del Petróleo. 2013.

VOSSOUGH, S., et al. Automation of an in-situ combustion tube and study of the effect of clay on the in-situ combustion process. SPE 10320. 1981.

## ANEXOS

### ANEXO A. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MEZCLA Y EL REACTOR, MODELO DE FLUIDOS Y CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA UTILIZADAS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN

#### PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas fueron calculadas por medio de correlaciones y datos disponibles en la literatura.

##### 1. Conductividad térmica de la mezcla

###### - Conductividad térmica del aceite<sup>27</sup>

La conductividad térmica del aceite se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$K_o = \frac{0.0677[1.0 - 0.0003(T - 32)]}{\sqrt{\gamma_o}}$$

Dónde:

$K_o$ =Conductividad térmica, BTU/(h\*pie\*F)

$T$  = Temperatura, F

$\gamma_o$ =Gravedad específica del petróleo

---

<sup>27</sup> ALVARADO, D y BANZER, C. Recuperación térmica de petróleo. Re-editado y corregido por: Dr. Adafel C. Rincón. Caracas 2002. pp 51.

- **Conductividad térmica de la roca<sup>28</sup>**

La conductividad térmica de la roca se calculó por medio de la siguiente expresión, la cual considera el efecto combinado de la porosidad de la roca, saturación de líquido y temperatura:

$$K_r = \frac{6.36e^{0.6[2.65(1-\emptyset)+S_l]}}{(0.556T + 255.3)^{0.55}}$$

Dónde:

$K_r$ =Conductividad térmica de la roca, BTU/(h\*pie\*F)

$T$  = Temperatura, K

$\emptyset$ =Porosidad, fracción

$S_l$ =Saturación total de líquido, fracción

- **Conductividad térmica del agua, gas y coque<sup>29</sup>**

La conductividad térmica del agua, gas y coque se calculó con base en las siguientes expresiones:

$$K_w = 0.3414 \times 0.0011 \times T - 4 \times 10^{-6} \times T^2 + 10^{-9} \times T^3$$

$$K_g = 0.0142 + 5 \times 10^{-5}T - 2 \times 10^{-8}T^2 + 3 \times 10^{-12}T^3$$

$$K_{coque} = 1.1006 + 0.0015T - 6 \times 10^{-7}T^2$$

Dónde:

$K_w, K_g$  y  $K_{coque}$  = Conductividades térmicas del agua, gas y coque, J/(cm\*min\*C)

$T$  = Temperatura, C

A continuación se presentan los valores calculados para las simulaciones realizadas en este trabajo:

<sup>2828</sup> ALVARADO, D y BANZER, C. Recuperación térmica de petróleo. Re-editado y corregido por: Dr. Adafel C. Rincón. Caracas 2002. pp 54.

<sup>29</sup> CINAR, M. Kinetics of crude-oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. Tesis de doctorado. Agosto 2011. pp 218-219.

**Tabla 23.** Conductividades térmicas para los componentes de la mezcla

| Temperatura<br>F | Conductividad Térmica |                     |                    |                     |                      |
|------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
|                  | Aceite<br>BTU/d-pie-F | Roca<br>BTU/d-pie-F | Gas<br>BTU/d-pie-F | Agua<br>BTU/d-pie-F | Coque<br>BTU/d-pie-F |
| 59               | 1,60622               | 14,78261            | 0,34541            | 8,25091             | 25,95349             |
| 104              | 1,58436               | 14,51748            | 0,37367            | 8,76076             | 26,80110             |
| 149              | 1,56250               | 14,26533            | 0,40136            | 9,15853             | 27,63139             |
| 194              | 1,54064               | 14,02515            | 0,42849            | 9,44637             | 28,44434             |
| 239              | 1,51878               | 13,79602            | 0,45507            | 9,62645             | 29,23995             |
| 284              | 1,49691               | 13,57714            | 0,48110            | 9,70094             | 30,01823             |
| 329              | 1,47505               | 13,36777            | 0,50658            | 9,67201             | 30,77918             |
| 374              | 1,45319               | 13,16725            | 0,53153            | 9,54182             | 31,52280             |
| 419              | 1,43133               | 12,97498            | 0,55596            | 9,31254             | 32,24908             |
| 464              | 1,40947               | 12,79042            | 0,57986            | 8,98633             | 32,95803             |
| 509              | 1,38761               | 12,61308            | 0,60324            | 8,56537             | 33,64964             |
| 554              | 1,36575               | 12,44249            | 0,62612            | 8,05182             | 34,32392             |
| 599              | 1,34389               | 12,27825            | 0,64849            | 7,44784             | 34,98087             |
| 644              | 1,32203               | 12,11997            | 0,67037            | 6,75560             | 35,62048             |
| 689              | 1,30017               | 11,96732            | 0,69176            | 5,97728             | 36,24276             |
| 734              | 1,27830               | 11,81996            | 0,71267            | 5,11503             | 36,84770             |
| 779              | 1,25644               | 11,67760            | 0,73310            | 4,17102             | 37,43531             |
| 824              | 1,23458               | 11,53997            | 0,75306            | 3,14743             | 38,00559             |
| 869              | 1,21272               | 11,40682            | 0,77255            | 2,04641             | 38,55854             |
| 914              | 1,19086               | 11,27791            | 0,79159            | 0,87013             | 39,09415             |
| 959              | 1,16900               | 11,15302            | 0,81018            | 0,00000             | 39,61242             |
| 1004             | 1,14714               | 11,03195            | 0,82833            | 0,00000             | 40,11337             |
| 1049             | 1,12528               | 10,91451            | 0,84604            | 0,00000             | 40,59698             |
| 1094             | 1,10342               | 10,80053            | 0,86331            | 0,00000             | 41,06325             |
| 1139             | 1,08155               | 10,68984            | 0,88017            | 0,00000             | 41,51220             |

## 2. Conductividad térmica de la pared del reactor<sup>30</sup>

La pared del reactor está construida de Hastelloy C 276. Hastelloy C276 es una superaleación de níquel-molibdeno-cromo con adición de tungsteno diseñado para tener una excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos. Los valores de conductividad térmica para este material a cada una de las diferentes temperaturas se determinaron a partir de valores disponibles en la web.

<sup>30</sup><http://elginfasteners.com/resources/raw-material-technical-data-specifications/hastelloy-c-276-material-property-data-sheet/>

**Tabla 24.** Conductividad térmica de la pared del reactor

| Temperatura<br>°F | Conductividad Térmica<br>BTU/día-ft-°F |
|-------------------|----------------------------------------|
| 100,4             | 0,24583                                |
| 199,4             | 0,26736                                |
| 399,2             | 0,31319                                |
| 600,8             | 0,36111                                |
| 800,6             | 0,40625                                |
| 1000,4            | 0,45833                                |

### 3. Capacidad calorífica volumétrica

#### - Capacidad calorífica volumétrica de la pared del reactor

Capacidad calorífica: 0.102 BTU/lb-F a RT

Densidad = 0.321 lb/in<sup>3</sup> = 554.69 lb/ft<sup>3</sup>

Capacidad calorífica volumétrica = 0.102 BTU/lb-F \*554.69 lb/ft<sup>3</sup>  
= 56.508 BTU/ft<sup>3</sup>-F

### MODELO DE FLUIDOS

El modelo de fluidos se construyó con base en las propiedades del crudo muerto del pozo CH-44 en la formación T2, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 25.** Propiedades aceite muerto, muestra CH-44

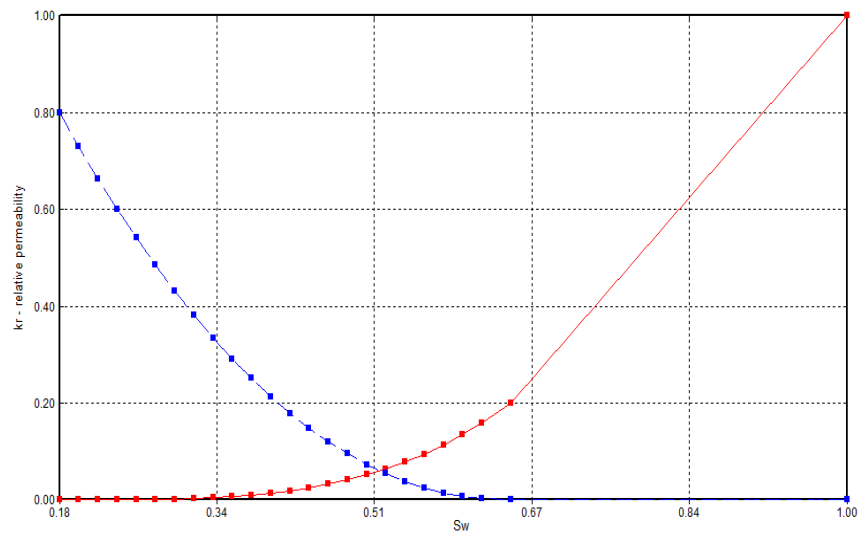
| Propiedad                          | Valor  |
|------------------------------------|--------|
| API                                | 8.8    |
| Densidad @ 15°C, kg/m <sup>3</sup> | 1011.5 |
| % Azufre, %m                       | 3270   |
| Punto de Fluidez, °C               | 30     |
| Viscosidad @ 80°C, cp              | 2084   |
| Viscosidad @ 100°C, cp             | 580.8  |
| Número ácido, mg KOH/g             | 0.101  |

El modelamiento se realizó en el software comercial WINPROP de CMG.

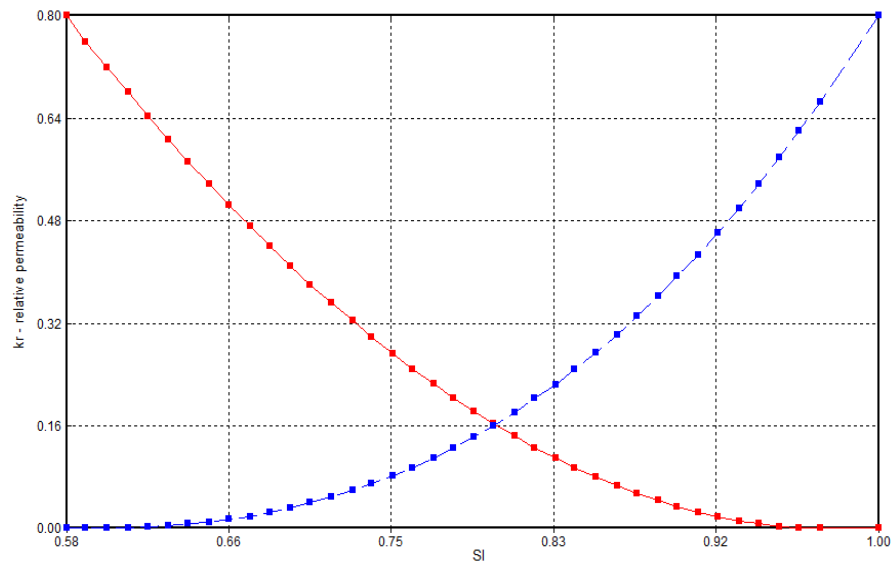
## CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA

Las curvas de permeabilidad relativa fueron tomadas del modelo de simulación completo del campo Chichimene.

**Figura 55.** Curvas de permeabilidad relativa sistema agua - aceite

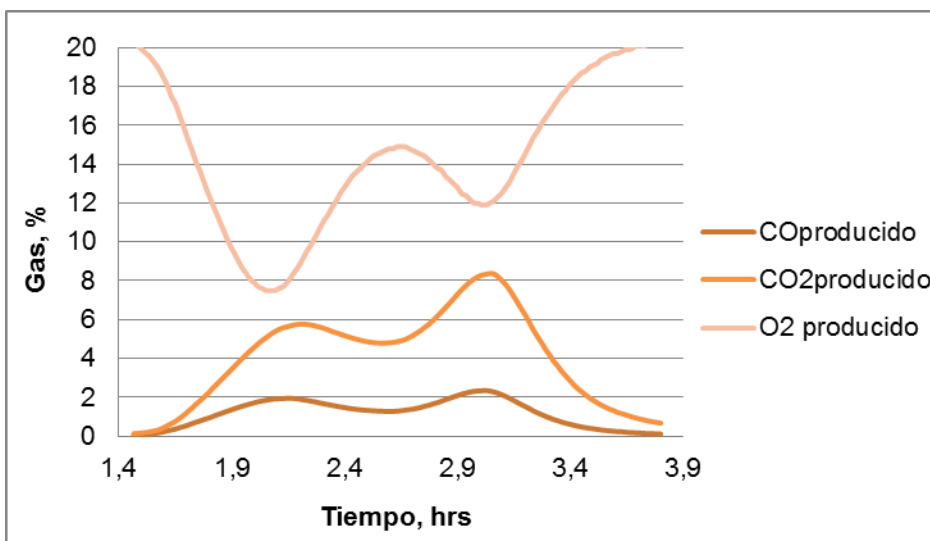


**Figura 56.** Curvas de permeabilidad relativa sistema gas - líquido



## ANEXO B. MODELAMIENTO DE LAS REACCIONES POR MEDIO DE LA METODLOGÍA FASSIHI

**Figura 57.** Gases producidos en la prueba de celda cinética realizada con núcleo

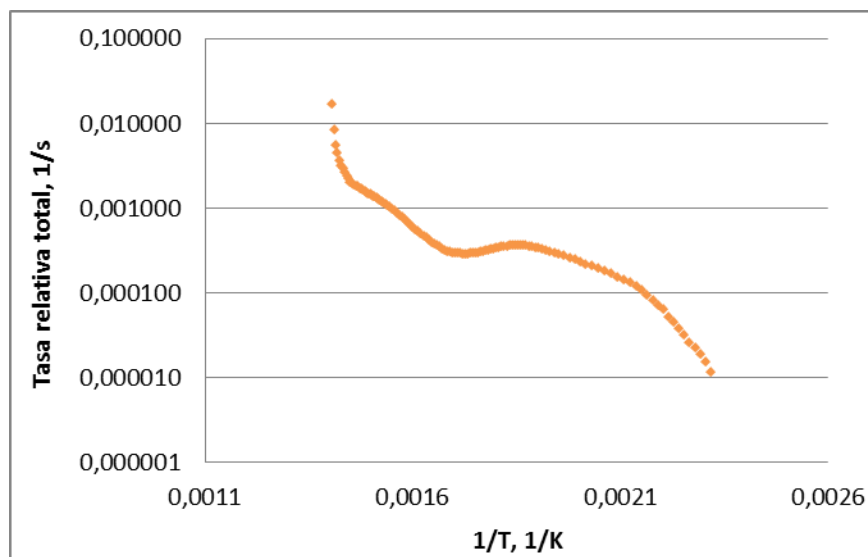


Fassihi desarrolló un modelo<sup>31</sup> basado en la ecuación cinética de Weijdemá, para realizar el modelamiento de las reacciones. A partir de los resultados de la prueba de celda cinética realizada con núcleo, se calcula la tasa de reacción relativa<sup>32</sup> y se grafica vs  $1/T$ .

<sup>31</sup>FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp 213-217.

<sup>32</sup>Ibid., pp 213-214.

**Figura 58.** Tasa relativa de consumo de oxígeno para la prueba de celda cinética realizada con núcleo



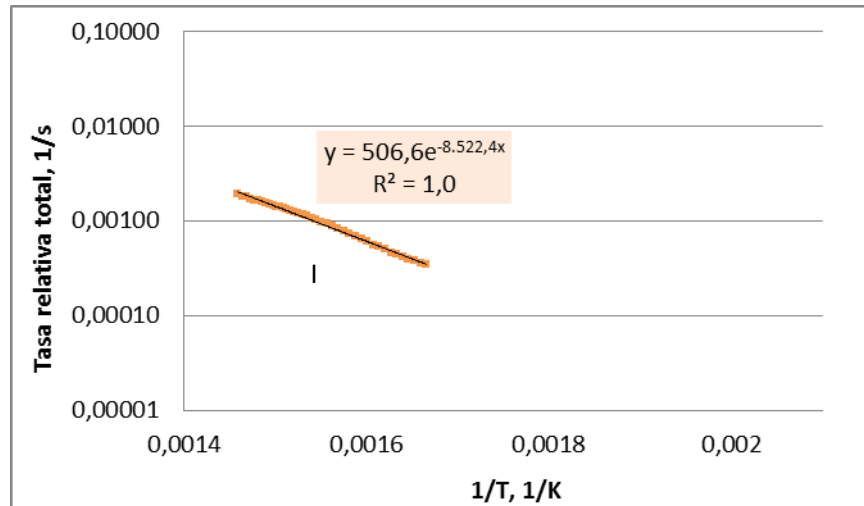
Los datos de en la región de alta temperatura caen en una línea recta tal y como lo predice el modelo de Weijdemá, pero a bajas temperaturas se observa una desviación de esta línea recta lo que indica que el modelo de una sola reacción de Weijdemá no describe adecuadamente la cinética de las reacciones observada.

A altas temperaturas, la cantidad de óxidos de carbono formados ajustan de manera muy cercana con la cantidad de oxígeno consumido, pero a temperaturas medias el oxígeno consumido es más grande que los óxidos de carbono formados. Finalmente a bajas temperaturas, el oxígeno es consumido sin la formación de óxidos de carbono. Este patrón, es la base del análisis de los datos para reacciones separadas, tal y como se describe a continuación:

Una línea recta se traza a través de los datos de alta temperatura. De la pendiente de la línea recta se obtiene  $E_a = 8522 \cdot 0,008314472 = 70.85 \text{ KJ/mol}$ .



**Figura 59.** Curva de Arrhenius para la tasa de reacción de combustión para la prueba de celda cinética realizada con núcleo

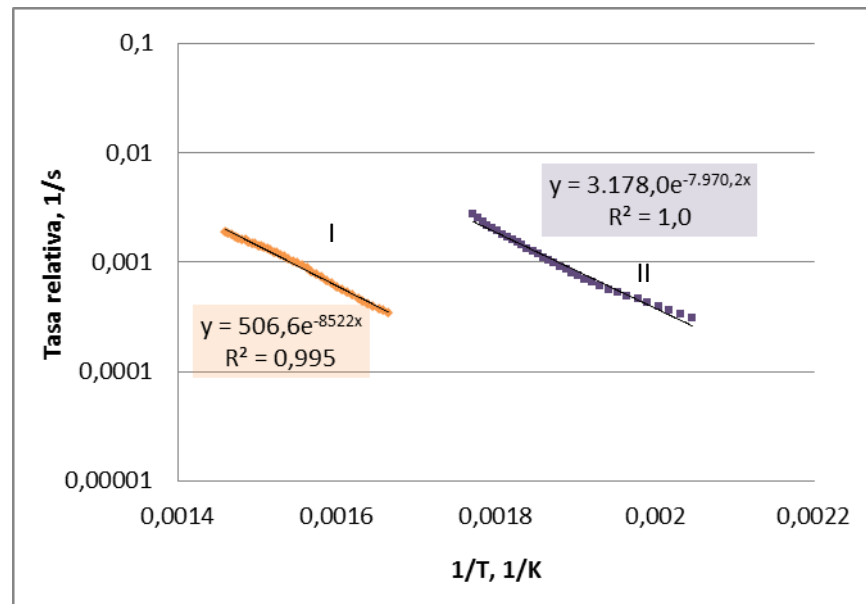


Se asume que esta reacción también ocurre a bajas temperaturas de acuerdo a la extrapolación de los datos de alta temperatura<sup>33</sup>. Posteriormente, se calcula el comportamiento de oxidación en el rango de media temperatura, restando el término  $\Delta C_{CO_2} = CO_2 + \frac{1}{2}CO$  a los datos de consumo de oxígeno en alta temperatura. De la pendiente de la línea recta en la gráfica de tasa relativa de consumo de oxígeno para la Curva II (Figura 60), se calcula la energía de activación para el régimen de media temperatura,  $E_a = 7970 * 0,008314472 = 66.26$  KJ/mol. De la Figura 60, se asume que la curva de consumo de oxígeno en el rango de media temperatura sigue la misma pendiente que la curva de los óxidos de carbono. Usando esta suposición, se calcula el consumo de oxígeno (Curva IV) y se resta de la curva III (Oxígeno consumido total – Curva I) y el resto es representado en la curva V (Figura 61). Al calcular la tasa relativa de reacción para la curva V y graficarla vs  $1/T$  (Figura 62), se obtiene una línea recta (curva V), la cual representa la reacción de oxidación a baja temperatura. La energía de

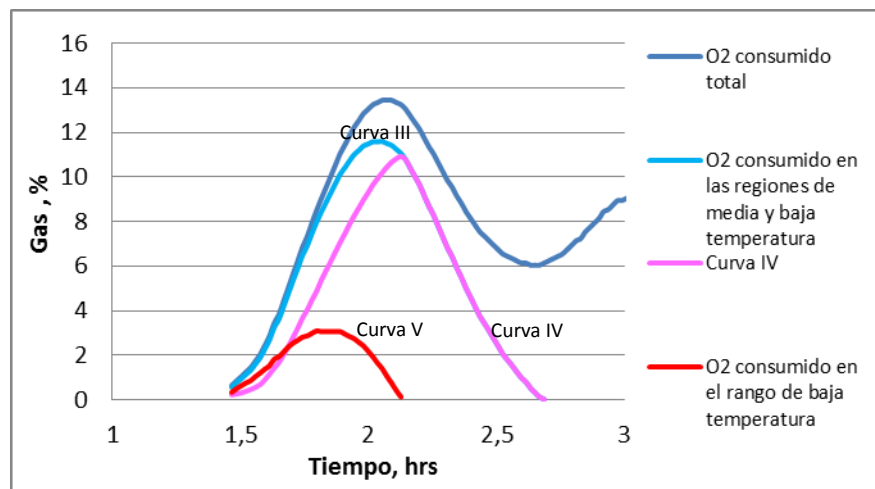
<sup>33</sup>FASSIHI, Mohammad. Analysis of fuel oxidation in in-situ combustion oil recovery. Tesis de doctorado. Universidad de Stanford. 1981. pp218-219.

activación se calcula de la pendiente de esta línea,  $E_a = 7381 \cdot 0,008314472 = 61.36 \text{ KJ/mol}$ .

**Figura 60.** Curva de Arrhenius para las tasas de reacción de combustión y depositación de combustible para la prueba de celda cinética realizada con núcleo



**Figura 61.** Oxígeno consumido en la reacción de baja temperatura



**Figura 62.** Curva de Arrhenius para la prueba de celda cinética realizada con núcleo

