

**APLICACIÓN DE UN MODELO TERMODINÁMICO PARA LA PRECIPITACIÓN  
DE LAS PARAFINAS EN UN CRUDO DE CAMPO COLORADO.**

**DEISSY JOHANNA BALLESTEROS RODRIGUEZ  
JOHANA PATRICIA QUIROGA VARGAS**

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

**2014**

**APLICACIÓN DE UN MODELO TERMODINÁMICO PARA LA PRECIPITACIÓN  
DE LAS PARAFINAS EN UN CRUDO DE CAMPO COLORADO.**

**DEISSY JOHANNA BALLESTEROS RODRÍGUEZ  
JOHANA PATRICIA QUIROGA VARGAS**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos**

**Director:**

**Cristian Camilo Jiménez Leiva**

**Ingeniero Electrónico, Electrónica y Telecomunicaciones. MSc**

**Codirector:**

**FELIX ARENAS RUEDA**

**Ingeniero de Petróleos**

**JESÚS RAMÍREZ MONTAÑEZ**

**Ingeniero Químico**

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

**2014**

## DEDICATORIA

YO SOY la presencia en mi camino.

Quiero agradecer desde lo más profundo de mi corazón a mis padres Elsa y Nepomuceno, por enseñarme el valor de la tenacidad y del amor, quienes desde el cielo iluminan y acompañan mi camino; a mis hermanos Nelly y William por su amor y apoyo en todas las etapas de mi vida, por enseñarme con su ejemplo diario que el camino correcto es el del esfuerzo, el trabajo duro, la dedicación el amor y la honestidad.

A mis amigos por brindarme su apoyo, gracias a ellos la vida y el trabajo lejos de casa fue más simple.

**Deissy Johanna Ballesteros R**

## DEDICATORIA

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su apoyo y compañía en las diferentes etapas de la vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A Dios por darme la vida y fortaleza para cumplir mis metas y sueños

A mis padres Horacio Quiroga y Lilia Vargas, por brindarme todo su amor y cariño durante cada día de mi vida, por sus valiosos consejos que me han ayudado siempre a ser una mejor persona, por su apoyo incondicional y creer siempre en mí. Espero que sea el principio de muchas alegrías que quiero regalarles.

A mi hermanito Diego Mauricio, por ser siempre la alegría de mi vida y de la familia; a mi tía Mary mil palabras no bastarían para agradecer su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles. A mis familiares en general, espero que en mi triunfo les pueda servir en algún momento de sus vidas.

**Johana Patricia Quiroga Vargas.**

## **AGRADECIMIENTOS**

El trabajo de grado es la unión de esfuerzos de muchas personas, es el trabajo en equipo y el reflejo de valores como el respeto y la tolerancia que traen un resultado que no es fácil y no sería posible sin esas personas que creyeron en nosotros y permitieron trabajar junto a ellos. Los autores del presente trabajo se permiten expresar sus agradecimientos a las siguientes personas:

El **MSc CRISTIAN CAMILO JIMENEZ LEIVA**, director de este programa, quien nos guio, recomendó y sugirió lo mejor para la realización de este proyecto.

Nuestros codirectores **FELIX ARENAS RUEDA y JESUS RAMIREZ** por ser el promotor del proyecto, por su valiosa colaboración, sugerencias y recomendaciones.

Al doctor **GERMAN GONZALEZ**, Ingeniero de Petróleos, Calificador del proyecto de grado, por sus correcciones y enseñanzas.

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, por ofrecernos la oportunidad de ser ingenieros.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS PARAFINAS.	20
1.1 CONCEPTOS GENERALES	20
1.1.1 Definición de las parafinas	20
1.1.2 Tipos de las parafinas	20
1.2 PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS	21
1.2.1 Predicción de las parafinas.	22
1.2.2 Caracterización de las parafinas.	23
1.2.3 Técnicas de caracterización.	24
1.3 SELECCIÓN DE LOS POZOS PARA EL ANÁLISIS.	25
2. MODELOS TERMODINÁMICOS DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS	27
2.1 ESTUDIO DE MODELOS TERMODINÁMICOS	28
2.2 DIFERENTES MODELOS TERMODINAMICOS DE PRECIPITACION DE PARAFINAS	29
2.2.1 Descripción termodinámica de las parafina	29
2.3 PRINCIPIO DEL MODELO PARA EL CÁLCULO	30
2.3.1 Base termodinámica	31
2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	37
3. HERRAMIENTA APLICADA EN EL MODELO ANALÍTICO PARA LA PREDICCIÓN DE PARAFINAS EN CRUDO DE CAMPO COLORADO.	39
3.1 DATOS DE ENTRADA PARA DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA	39

3.2 ALGORITMO DE CÁLCULO.	43
3.3 MÉTODO DE PROGRAMACIÓN DE LA HERRAMIENTA.	46
3.4 APLICACIÓN DEL MODELO TERMODINÁMICO EN EL PROGRAMA DE CÁLCULO	46
3.4.1 Presentación de la herramienta programada.	47
3.4.2 Aplicación de la herramienta en crudo de Campo Colorado 25.	51
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1 DETERMINACIÓN DE ENTALPIA DE PRECIPITACIÓN DE SÓLIDOS PARA CADA COMPONENTE.	60
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS	62
4.3 ANÁLISIS CUALITATIVO DEL MODELO DE WON MODIFICADO POR CONOCO PARA LA PREDICCIÓN DE PARAFINAS	63
5. CONCLUSIONES	65
6. RECOMENDACIONES	67
CITAS BIBLIOGRAFICAS	68
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	74

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquematzación de ceras parafínicas.	21
Figura 2. Desarrollo de la metodología	27
Figura 3. Termogramas de enfriamiento y calentamiento.	38
Figura 4. Secuencia de cálculo para determinar la cantidad de sólido precipitado	45
Figura 5. Construcción de la interfaz	46
Figura 6. Acceso al contenido de la herramienta.	47
Figura 7. Variables de entrada para la simulación de la herramienta.	48
Figura 8. Identificación de la prueba.	48
Figura 9. Ingreso de datos de composición del crudo.	49
Figura 10. Cálculo de Entalpia de Fusión y Temperatura de Fusión.	50
Figura 11. Salida de datos	51
Figura 12. Ingreso de datos primarios.	52
Figura 13. Ingreso de datos de compuestos C3-C8.	53
Figura 14. Ingreso de datos compuestos C9-C16.	53
Figura 15. Ingreso de datos compuestos C17-C24.	54
Figura 16. Ingreso de datos parte C25-Tolueno.	54
Figura 17. Ingreso de datos.	55
Figura 18. Etapas de precipitación de sólidos para cada componente generada por la herramienta de cálculo	56
Figura 19. Grafica generada por la herramienta de cálculo Col 25.	57
Figura 20. Entalpias de precipitación de sólidos para cada componente y temperatura	57
Figura 21. Grafica de Entalpias liberadas Vs Temperatura Col 25.	58
Figura 22. Sólido obtenido en el crudo colorado por ecuación	60

Figura 23. Entalpias de precipitación de solidos del crudo Col 25	61
Figura 24. Entalpias de precipitación de solidos del crudo Col 64	61
Figura 25. Termograma de la muestra del crudo Col 25	62

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades de los pozos seleccionados:	26
Tabla 2. Características de los crudos de Campo Colorado analizados en el proyecto	39
Tabla 3. Composición Crudos Colorado.	40
Tabla 4. Porcentaje de error de Temperatura de Fusión para Compuestos C18-C30	42
Tabla 5. Porcentaje de error de Entalpia de Fusión para Compuestos C18-C30	42
Tabla 6. Comparación de resultados del crudo Colorado 25	62
Tabla 7. Reporte de entalpías liberadas y su WAT correspondiente	63
Tabla 8. Escala descriptiva	63
Tabla 9. Análisis cualitativo del modelo de Won modificado por Conoco	64

## NOMENCLATURA

$U$  = Potencial Químico.

$T$  = Temperatura del sistema.

$A$  = Actividad.

$\Delta H_i^f$  = Entalpia de fusión.

$\Delta G^f$  = Variación de la energía libre de Gibbs.

$T_i^f$  = Temperatura del punto de fusión.

$\Delta S_i^f$  = Variación de entropía.

$\Psi_i$  = Relación de fugacidades.

$H$  = Entalpia.

$f_i^{os}$  = Fugacidad del solido puro a la misma temperatura y presión atmosférica.

$f_i^{ol}$  = Fugacidad del líquido puro a la misma temperatura y presión atmosférica.

$f_i^l$  = Fugacidad del componente  $i$  en la fase líquida.

$f_i^s$  = Fugacidad del componente  $i$  en la fase sólida.

$x_i^l$  = Composición del componente  $i$  en la fase líquida.

$x_i^s$  = Composición del componente  $i$  en la fase sólida.

$y_i^s$  = Coeficientes de actividad del componente  $i$  en la fase sólida.

$y_i^l$  = Coeficientes de actividad del componente  $i$  en la fase líquida.

$U_i^{ol}$  = Potencial químico de una sustancia pura del componente  $i$  de la fase I.

$U_i^{oII}$  = Potencial químico de una sustancia pura del componente  $i$  de la fase II.

$U_i^s$  = Potencial químico de una sustancia pura del componente  $i$  de la fase sólida.

$U_i^l$  = Potencial químico de una sustancia pura del componente  $i$  de la fase líquida.

$R$  = Constante de los gases ideales.

## RESUMEN

**TITULO:** APLICACIÓN DE UN MODELO TERMODINÁMICO PARA LA PRECIPITACIÓN DE LAS PARAFINAS EN UN CRUDO DE CAMPO COLORADO\*.

**AUTORAS:** DEISSY JOHANNA BALLESTEROS RODRIGUEZ  
JOHANA PATRICIA QUIROGA VARGAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** ceras parafínicas, precipitación, equilibrio termodinámico, punto de nube, modelos de parafinas, Campo Escuela Colorado.

### DESCRIPCIÓN:

Uno de los principales temas de preocupación en la industria del petróleo es la precipitación de parafinas. Los cambios en las condiciones de presión y temperatura a las que el crudo es sometido durante su extracción en los yacimientos provocan serios problemas en etapas posteriores, como el transporte, producción y refinación.

El presente proyecto está centrado en la determinación de los datos esenciales para predecir el comportamiento de un crudo ante unas condiciones determinadas: la temperatura de aparición de la primera cera (Punto de nube), indica la temperatura a la que empiezan a precipitar las parafinas y la curva de precipitación de parafinas (WPC) que proporciona información sobre la cantidad de sólido precipitado a las condiciones de operación. Con la determinación de la envolvente de precipitación de parafinas, se facilita la comprensión y análisis de las condiciones físicas y el estado termodinámico en que ocurre la precipitación y depositación de parafinas en el Campo Colorado, lo cual permitirá el estudio e implementación efectiva de métodos de prevención y remediación.

Se realiza un estudio de modelos termodinámicos para la precipitación de parafinas en función de la temperatura en un crudo de Campo Escuela Colorado, mediante la caracterización del crudo "cromatografía" para la determinación del punto nube y la curva de precipitación WPC. Los resultados obtenidos se comparan con datos disponibles de trabajos previos, adquiridos mediante la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). En los resultados obtenidos, se puede comprobar que la composición del crudo Col 25 proporciona resultados reproducibles a través de la programación de una herramienta llamada "Simulador de precipitación de parafinas 1.0", resultando una herramienta de cálculo aplicable para la determinación del punto de nube.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Cristian Camilo Jiménez Leiva, Codirectores Félix Arenas Rueda y Jesús Ramírez Montañez

## ABSTRACT

**TITLE:** APPLICATION OF A THERMODYNAMIC MODEL FOR THE PRECIPITATION OF PARAFFIN OIL FIELD IN COLORADO.\*

**AUTHORS:** DEISSY JOHANNA BALLESTEROS RODRIGUEZ  
JOHANA PATRICIA QUIROGA VARGAS\*\*

**KEY WORDS:** paraffin waxes, precipitation, thermodynamic equilibrium, cloud point, paraffin models, Colorado School Field.

### DESCRIPTION:

One of the main topics of concern in the oil industry is the wax precipitation. The changes in the conditions of pressure and temperature at which the oil is subjected during its extraction from the deposits cause serious problems in later stages, such as transportation, production and refining.

This project is focused on the determination of the essential data to predict the behavior of oil to certain conditions: the appearance temperature of the first wax (cloud point) which indicates the temperature at which paraffins begin to precipitate and the wax precipitation curve (WPC) which provides information on the amount of solid precipitated to the operating conditions. With the determination of dependence of paraffin precipitation, it facilitates the understanding and analysis of the physical conditions and the thermodynamic state of the precipitation and deposition of paraffins in the Colorado Field, allowing the study and effective implementation of prevention and remediation methods.

It is performed a study of thermodynamic models for paraffin precipitation regarding temperature on oil of Colorado School Field, with the characterization of oil " chromatography " for determining the cloud point and precipitation curve WPC . The results obtained are compared with available data from previous studies, acquired by Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique. With the results obtained, it can be seen that the composition of oil Col 25 provides reproducible results through programming a tool called " Simulator of paraffins precipitation 1.0 " , resulting in a calculation tool applicable for determining the cloud point.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering, School of Petroleum Engineering. Director: Cristian Camilo Jiménez Leiva, Codirectores Félix Arenas Rueda y Jesús Ramírez Montañez

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales temas de preocupación en la industria del petróleo es la precipitación de parafinas. Los cambios en las condiciones de presión y temperatura a las que el crudo es sometido durante su extracción en los yacimientos provocan serios problemas en etapas posteriores, como el transporte, producción y refinación. Estas complicaciones surgen por la deposición de compuestos orgánicos denominados parafinas, que provocan taponamientos en tuberías y oleoductos, pérdidas de capacidad en tanques, caídas de presión, mayores costos de bombeo y dificultades operacionales en general. El presente proyecto está centrado en la determinación de los datos esenciales para predecir el comportamiento de un crudo ante unas condiciones determinadas: la temperatura de aparición de la primera cera (WAT), indica la temperatura a la que empiezan a precipitar las parafinas y la curva de precipitación de parafinas (WPC) que proporciona información sobre la cantidad de sólido precipitado a las condiciones de operación.

Este proyecto forma parte de la línea de investigación desarrollada por la Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingeniería de Petróleos - Campo Escuela Colorado, Escuela de Ingeniería Eléctrica y grupo GISEL. Fue realizado un estudio de modelos termodinámicos para la precipitación de parafinas en función de la temperatura en un crudo de campo escuela colorada, mediante la caracterización del crudo “cromatografía” para la determinación del WAT y la curva de precipitación WPC. Los resultados obtenidos se comparan con datos disponibles de trabajos previos, adquiridos mediante técnicas tales como Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). A la vista de los resultados obtenidos, se puede comprobar que la composición de crudos campo colorado proporciona

resultados reproducibles a través de la programación de una herramienta, resultando una técnica aplicable, para la determinación del WAT.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Aplicar un modelo termodinámico para la precipitación de las parafinas en el crudo de Campo Escuela Colorado, que se ajuste a las condiciones operacionales y de las características del fluido.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Revisar el estado del arte en la comunidad científica los Modelos Termodinámicos de Precipitación de Parafinas.
2. Seleccionar el Modelo Termodinámico de Precipitación de Parafinas que se ajuste a las características que presenta el crudo de Campo Escuela Colorado
3. Programar el modelo Termodinámico de Precipitación de Parafinas mediante un algoritmo expresado por medio de un diagrama de flujo ejecutado en un ordenador.
4. Obtener resultados a partir del modelo con información del Campo Colorado y comparar con prueba de laboratorio.

# 1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LAS PARAFINAS.

## 1.1 CONCEPTOS GENERALES

**1.1.1 Definición de las parafinas** Se conoce como parafinas a los productos cerosos derivados del petróleo, estos son de color claro, fluidos y de baja densidad, que forman una familia de hidrocarburos también conocidos como alcanos o parafínicos. Se identifican por tener cadenas lineales (n-alcanos) o ramificados (iso-alcanos), compuestas por carbonos saturados, representados por la fórmula general  $C_nH_{2n+2}$ .

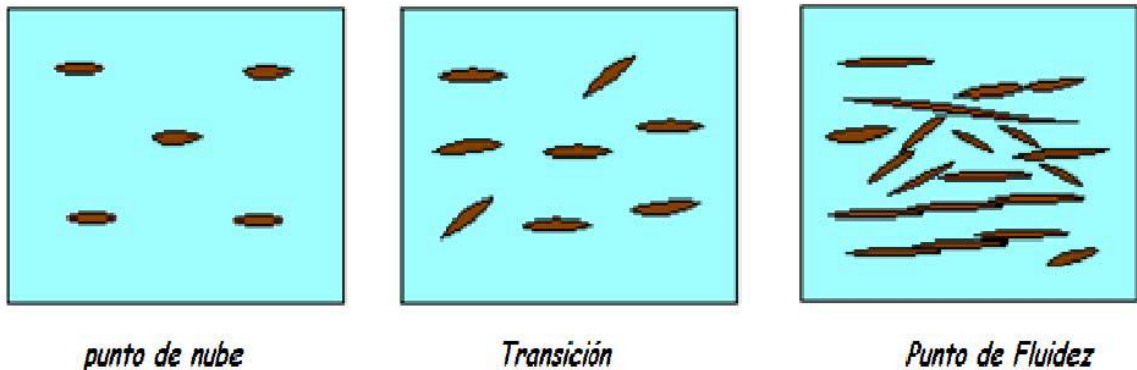
**1.1.2 Tipos de las parafinas** Los dos tipos de parafinas de ceras, según su configuración de estructura molecular y el número de carbonos que contengan, están normalmente presentes en los crudos, las cuales presentan un mecanismo de daño diferente, si se llegara a depositar en la formación debido al tamaño de los cristales (Dobbs, 1999) [1], los cuales son:

- **Ceras parafínicas o macrocristalinas**, con un 40-90 % de n-parafinas, se encuentran comprendidas por parafinas que contienen entre 18 a 30 carbonos en cadena lineal. La distribución molecular que se forma se conoce como macro-cristales, los cuales tienen forma de agujas que al adherirse constituyen grandes depósitos de cera que ocasionan numerosos problemas en las líneas de producción de pozos petroleros y en la formación.
- **Ceras microcristalinas**, (designadas como amorfas) tienen mayor contenido de naftenos, cuyas ramificaciones parafínicas cristalizan conjuntamente con las n-parafinas en cristales de pequeñas dimensiones e irregulares, lo que hace

que no tiendan a aglomerarse, permaneciendo dispersos y sin formar depósitos.

Los tres pasos que llevan a cabo desde que empieza a precipitar el primer cristal de parafina (Punto de nube), hasta el momento en que el crudo deja de fluir (Punto de Fluidez) debido a la aglomeración de los cristales (ver fig. 1)

**Figura 1. Esquematzación de ceras parafínicas.**



**Fuente:** RODRÍGUEZ, L. y CASTAÑEDA, M. Estudio de los fenómenos de cristalización de parafinas en el comportamiento fluido dinámico de crudos parafínicos-fase1. En: Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol.2 Num.2 (dic.2001).p.65-78.

## 1.2 PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS

El proceso de producción, de los hidrocarburos cuando experimentan una serie de fenómenos fisicoquímicos y termodinámicos, los cuales ocasionan pérdidas de la solubilidad de las parafinas en el crudo (Ferworn y Hammami, 1997) [2]. El punto de depositación en un sistema de producción se determina por lo cerca que se encuentre al crudo a su punto de saturación de solubilidad y la cantidad de parafina en el crudo.

El principal origen de la depositación de parafinas es el descenso de la temperatura porque la solubilidad del crudo disminuye a medida que la temperatura desciende, ocurriendo el enfriamiento del crudo en:

- La cara del pozo.
- Facilidades de producción.
- Transporte del crudo por oleoductos.

Si la temperatura de la formación está por debajo del punto de cristalización, la parafina precipitará y es probable que se deposite en los poros de la formación, puenteando o bloqueando los canales causando restricción al flujo (Kosta y Leontaritis, 1999) [3].

Uno de los principales problemas que genera la precipitación de parafinas es el taponamiento de las líneas el cual causa pérdidas en la producción, por lo que se requiere realizar limpieza permanente de pozos y de tuberías en superficie, generando altos costos de operación. Por las razones expuestas anteriormente, algunos investigadores han puesto su atención en realizar un estudio y comprensión del fenómeno de precipitación para plantear modelos que sean capaces de predecir las curvas de precipitación de los crudos, permitiendo conocer las condiciones y causas de depositación para hacer predicciones a partir de datos experimentales en laboratorio, a fin de evaluar y cuantificar la depositación, para desarrollar e implementar métodos de prevención o control de este fenómeno.

**1.2.1 Predicción de las parafinas.** Los problemas de parafinas son evidentes con facilidad cuando ellos ocurren. Sin embargo, hay programas, herramientas y métodos de predicción de los problemas de depositación. Estos son especialmente útiles en la planificación de nuevas instalaciones. La instalación de equipos es normalmente más económica si es planeada por adelantado e instalado en la construcción inicial. Se han estudiado métodos de predicción de la

depositación de parafina en crudos, estos describen y analizan los problemas a ser esperados. Existen también modelos matemáticos comerciales que están disponibles en el mercado, estos modelos predicen cuándo, dónde y cuánto depósito ocurrirá.

**1.2.2 Caracterización de las parafinas.** Para relacionar la formación de los cristales de parafina, se han reconocido un conjunto de propiedades físicas y químicas tales como la viscosidad, API, punto de nube, punto de fluidez y peso molecular que dan lugar a diferentes formas y velocidades de cristalización.

Con base en el peso molecular las parafinas son los componentes más pesados del petróleo (sin incluir los asfaltenos) y desde el punto de vista de su comportamiento de solubilidad se encuentran disueltas en éste. Según Prausnitz, (1969) [4], en un sistema molecular, todas las moléculas están disueltas o mezcladas caóticamente hasta que un pequeño número comienza a precipitar reversiblemente la solución, debido a la saturación del estado termodinámico prevaleciente.

La temperatura es la mayor fuerza que altera el equilibrio de las fases sólido-liquido de las parafinas y la constante separación de las fases. Los tres parámetros más importantes que afectan la solubilidad de las parafinas en el crudo son la temperatura, la presión y la composición del crudo. Según Barrer y Newberry (1989) [5], cuando se perturba el equilibrio termodinámico los cambios de presión no influyen en la capacidad del crudo para diluir la parafina, pero la inestabilidad en la composición del crudo es debido a la volatilización de los carbonos más livianos como el metano, etano, propano y butano, estos disminuyen principalmente la solubilidad de la parafina en el crudo. El factor que mayor influencia tiene en la precipitación de las parafinas es la caída de la temperatura por debajo de la temperatura del punto de nube, siendo esta la temperatura a la cual el crudo muerto (crudo sin gas en solución) precipita el

primer cristal a presión atmosférica. Éste parámetro se puede medir mediante un análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

**1.2.3 Técnicas de caracterización.** El orden que usualmente se maneja en las de pruebas de caracterización es: Punto de Nube (ASTM D2500-66), Perfil de viscosidad-temperatura (García, 2001) [6], Punto de fluidez (ASTM D97- 57), Contenido de parafina (método UOP 46-85), distribución del número de carbono de la parafina (Cromatografía de gases).

- **Punto de Nube (ASTM D2500-66).** En este método la muestra es enfriada a una tasa determinada y examinada periódicamente. La temperatura a la cual una nube es primero observada en el fondo de la jarra de prueba es reconocida como punto de nube (Newberry, 1985) [7].
- **Perfil de Viscosidad / Temperatura:** Este método utiliza un perfil de viscosidad versus temperatura del crudo para encontrar un punto de inflexión sobre la curva de enfriamiento, el cual será el punto de nube. La norma ASTM 445 está basada en este método. Esta norma comprende la determinación de la viscosidad cinemática del crudo, sean éstos transparentes u opacos. Dicha viscosidad se determina midiendo el tiempo necesario para que un volumen de crudo fluya bajo gravedad a través del capilar de vidrio de un viscosímetro calibrado. Se determina la viscosidad del crudo a diferentes temperaturas, se grafica la viscosidad en función de la temperatura y se observa el punto donde ocurre un cambio drástico en la pendiente (Cristancho, 2008) [8].
- **Punto de fluidez:** Esta prueba según la norma (ASTM D97- 57), busca determinar la temperatura en la que el crudo deja de fluir. Para la realización de esta prueba se utiliza hielo seco, se sumerge una capsula de cobre que contenga una probeta con la muestra de crudo; se verifica la fluidez del este

periódicamente mientras desciende la temperatura hasta hallar el punto en el que aceite deja de fluir (Coto, 2010) [9].

- **Contenido de parafina** (Método UOP 46-85). Este método es útil para estimar el contenido de parafina de crudos y asfaltos. El contenido de parafina es un valor experimental que depende de las condiciones bajo las cuales la misma es separada del material original (Newberry, 1985).
- **Cromatografía de gases**. Es otra herramienta valiosa para la evaluación de los productos de parafina. Puede ser usada para caracterizar el aceite y la composición del depósito de parafina, lo que puede ayudar a definir el posible tipo y severidad del problema. El análisis cromatográfico indica la distribución del número de carbonos de parafina contenidos en el crudo o en el depósito de parafina, la variación en el tipo de parafina y la relativa cantidad que puede requerir tratamiento.

### **1.3 SELECCIÓN DE LOS POZOS PARA EL ANÁLISIS.**

Los pozos seleccionados para el desarrollo de la investigación, son Col-25 y Col-64, ya que estos presentan problemas de precipitación de parafinas en sus líneas de producción y además poseen la mejor recopilación de datos en comparación con otros pozos, pues estos detallan la cromatografía y análisis de PVT- “ICP, Análisis cromatográfico, Registros del Instituto Colombiano del Petróleo ICP (2008)” [10], necesarios para caracterizar y para poder llevar a cabalidad el análisis y simulación del modelo termodinámico. La tabla 1 presenta un análisis detallado de los pozos Col-25 y Col-64 con sus respectivas propiedades:

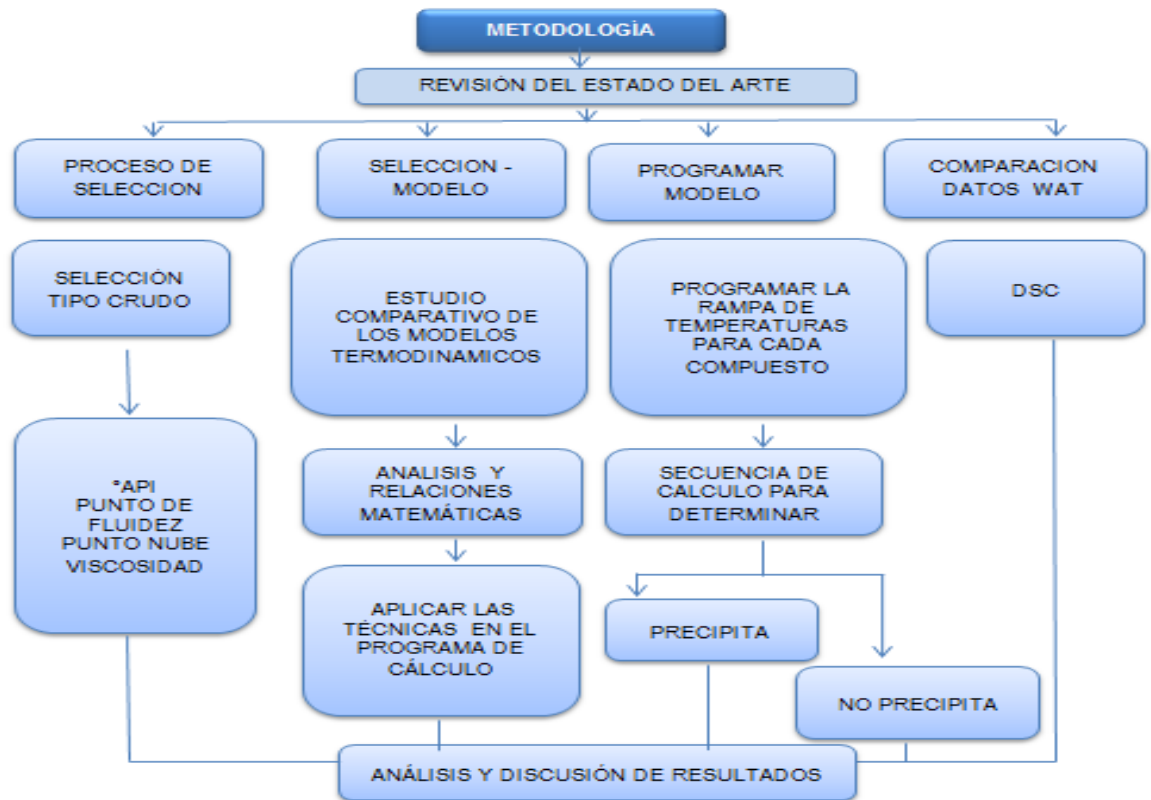
**Tabla 1. Propiedades de los pozos seleccionados:**

Pozo	Bloque	Prof (ft)	Intervalo Produc (ft)	Arenas Producto	°API	Estado Mecánico	Gor Promedio (SCFISTB)	Producción BOPD (Año)	Observación	Resultados
COL 25	I	2520	2120-2215	B	33.3	No tiene unidad ni varillas	2800 (1959)	6 (1959)	Fluye por periodos Buena vía	Seleccionado
COL 64	II	3688	2622-3438	B	35.7	Se retiró sarta en 1965 y 1967	2500 (1980)	2 (1986)	Fluye por periodos vía regular	Pre Seleccionado

## 2. MODELOS TERMODINÁMICOS DE PRECIPITACIÓN DE PARAFINAS

La metodología empleada para lograr el objetivo de la investigación, puede ser dividida en siete pasos, 1) Selección de pozo a muestreo, 2) Estudio comparativo de los modelos termodinámicos 3) Selección de modelo termodinámico de precipitación de parafinas, 4) Análisis y relaciones matemáticas del modelo seleccionado, 5) Programación de modelo, 6) Comparación de datos WAT con prueba de laboratorio 7) Análisis y discusión de resultados. La Figura 2, muestra en forma esquemática la metodología, proceso que se explica con detalle en las siguientes secciones:

**Figura 2. Desarrollo de la metodología**



## 2.1 ESTUDIO DE MODELOS TERMODINÁMICOS

Las ceras parafinas son unos sólidos ceroso difíciles de entender debido a que son mezclas complejas de hidrocarburos solidos que al bajar la temperatura alcanzan el punto de solidificación.

En la actualidad existe un gran interés por el estudio de los modelos termodinámicos que sean capaces de predecir la cantidad de parafina, la mayoría de estos modelos existentes se basan en el equilibrio solido-líquido y necesitan de datos experimentales de crudos para ser validados, como la composición de las fases, las propiedades físicas y térmicas de los componentes puros, además tienen en cuenta la no idealidad de las fases, estas propiedades son entre otras la temperatura de fusión, la entalpia de fusión, peso molecular, composición, coeficientes de actividad, fugacidad, Energía libre de Gibbs.

La determinación experimental y cuantificación en el proceso de precipitación es bastante complejo, el principal problema de estos modelos es que la mayoría de ellos están basados en correlaciones empíricas para ajustar los datos experimentales, con el fin de la validar el modelo termodinámico junto a pruebas de laboratorio medidos.

Los modelos termodinámicos de precipitación difieren en la descripción de la no idealidad de las fases; para sistemas a baja presión (crudos muertos) la fase líquida se puede considerar ideal, mientras que para sistemas a presión (crudos con gas en solución) la fase líquida se describe usando una ecuación de estado. La fase sólida utiliza una aproximación de multisólidos puros, esta aproximación asume que las ceras están compuestas de múltiples fases solidas siendo cada uno de ellos un compuesto puro (Lira-Galeana, 1996) [11], Coutinho (2005) [12], argumenta que se forma una solución sólida ideal y asume el modelo de energía libre para describir la no idealidad de la fase sólida. Con un modelo

termodinámico, se puede predecir bajo qué condiciones se produce la tasa depositación de las parafinas.

## **2.2 DIFERENTES MODELOS TERMODINAMICOS DE PRECIPITACION DE PARAFINAS**

A continuación se exponen brevemente algunos modelos termodinámicos que describen la precipitación de las parafinas para determinar la temperatura de aparición cera (WAT) y la curva de precipitación de la cera (WPC) para predecir los problemas potenciales de depositación de cera y su magnitud. Sin embargo, su aplicación es limitada debido a la escasez de datos de entrada.

**2.2.1 Descripción termodinámica de las parafina** Existen diferentes tipos de modelos evaluados para predecir la cantidad de parafina que precipita en el líquido. Won (1986) [13], presentó los primeros esfuerzos utilizando un modelo termodinámico para predecir los límites de la parafina, estudio el equilibrio sólido líquido.

Won (1989) [14], modifica el modelo mediante el uso de un enfoque que combina la solución periódica, modificando la ecuación de Flory Huggins para obtener el cálculo de los coeficientes de actividad en la fase líquida, fue validado para la temperatura del punto nube en aceites del Mar del Norte.

Algunos problemas en el estudio de los modelos propuestos limitan su capacidad y fiabilidad para predecir los límites de fase, conducen a la sobreestimación del límite de la fase de cera debido a la similitud de parámetros de solubilidad de la n-parafina.

Conoco (1993) [15], realizó algunas mejoras al modelo de Won como la diferenciación entre normales e iso-parafinas, el autor observó que se necesitaba una caracterización más precisa para ajustar el modelo termodinámico, mediante un análisis detallado de la composición.

Lira Galeana (1996) presentó un modelo termodinámico que supone que la cera precipitada consiste en varias fases sólidas, y cada fase sólida era un compuesto puro, un compuesto que no se mezcla con otras fases sólidas. Sin embargo, los estudios sobre la estructura cristalina de los últimos años revelan que la miscibilidad de n-parafinas en un estado sólido depende en gran medida de las diferencias en los tamaños moleculares (es decir número de carbonos), el modelo es cuestionable para los sistemas que componen de tamaños moleculares similares.

La mayoría de los investigadores han utilizado el equilibrio entre las fases sólida y líquida que relaciona la fase (aceite) como la fugacidad líquida y la fase (cera) como la fugacidad del sólido con propiedades termo-físicas, como base para el desarrollo de modelos matemáticos, y hacer uso de la ecuación de la fugacidad general para equilibrio sólidos -líquido. Las diferencias existen en las ecuaciones usadas para modelar las fases sólida y líquida y la elección de las relaciones termofísicas. Se utilizan los modelos resultantes para predecir los valores de la WAT y la cantidad de cera depositada a partir de mezclas de cera o de crudo.

### **2.3 PRINCIPIO DEL MODELO PARA EL CÁLCULO**

Existen diferentes tipos de modelos evaluados para predecir la cantidad de parafina que precipita en el líquido. Se propuso el modelo de Won modificado por Conoco, para la predicción y prevención de este problema antes de que tenga lugar. Los modelos termodinámicos se validan a través de datos experimentales.

**2.3.1 Base termodinámica** Considera un sistema cerrado en equilibrio de fases solido-liquido es decir el sistema no experimenta cambios en sus propiedades macroscópicas relacionadas directamente con el potencial químico. Además, se supone que el sistema está formado por dos compuestos totalmente miscibles muchos líquidos son completamente miscibles en todas sus proporciones, la disolución compuesta por el soluto como componente minoritario y el disolvente como el componente más abundante en la disolución.

En una disolución en equilibrio entre el solvente y el soluto; hay una desviación en el comportamiento ideal que se debe tener en cuenta en los sólidos y líquidos, como consecuencia de la interacción entre moléculas por esto se denominan soluciones reales, para denominar la concentración real de un componente  $i$  en una mezcla se definió la actividad como:

$$a = x_i \gamma_i \quad (1)$$

Dónde:

$a$  : Actividad

$x_i$ : Fracción molar del componente  $i$

$\gamma_i$ : Coeficientes de actividad del componente  $i$

Al considerar la ecuación (1) la actividad permite relacionar la concentración de cualquier compuesto en solución con su energía libre. En el caso de disoluciones reales; el coeficiente de actividad es utilizado para corregir las desviaciones del comportamiento de soluciones líquidas ideales respecto al real; además, la actividad equivale a uno para el caso de los sólidos puros.

A partir del equilibrio solido líquido se utiliza la diferencial exacta de la energía libre de Gibbs a temperatura y a presión constantes se obtiene:

$$U_i^s = U_i^{\text{disolución}} = U_i^l + RT \ln a_i \quad (2)$$

$$U_i^s - U_i^l = RT \ln a_i \quad (3)$$

Con la siguiente ecuación se relacionan la energía libre de Gibbs molar del sólido y del líquido en el punto de fusión:

$$\Delta G^f = U_i^s - U_i^l = RT \ln a_i \quad (4)$$

El cambio de energía libre de Gibbs, representa la variación de la entalpia y la variación de entropía, relacionada con la siguiente expresión:

$$\Delta G^f = \Delta H_i^f - T\Delta S_i^f \quad (5)$$

La ecuación 5 en forma diferencial puede ser expresada por:

$$\left[ \partial \left( \frac{G}{T} \right) \right]_p = \frac{-H}{T^2} \quad (6)$$

Integrando la ecuación 6, se llega:

$$\int_{x_i^l}^1 \left[ \frac{\partial \ln a_i}{\partial T} \right]_p = - \int_T^{T_f} \frac{\Delta H_i^f}{RT^2} \quad (7)$$

Asume que está diluida ( $x_i^l = a_i$ ) y que la entalpia de fusión  $\Delta H_i^f$  no varía con la temperatura, se obtiene:

$$\ln x_i^l = - \frac{\Delta H_i^f}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_f} \right] \quad (8)$$

Simplificando, se obtiene:

$$\ln x_i^l = - \frac{\Delta H_i^f}{R} \left[ \frac{T_f - T}{T} \right] \quad (9)$$

$$\ln x_i^l = \frac{\Delta H_i^f}{R} \left[ \frac{T - T_f}{T} \right] \quad (10)$$

La ecuación de una mezcla eutéctica binaria, logra la solubilidad ideal de un soluto en función de la temperatura, además utiliza las propiedades de los componentes puros para calcular el comportamiento de la fase, se denota de la siguiente forma:

$$.x_i^l = \exp\left(\frac{\Delta H_i^f}{R} \left[\frac{T-T_f}{T}\right]\right) \quad (11)$$

La relación de fugacidad en el estado de referencia se denota ( $\Psi_i$ ) (Coto, 2010):

$$\Psi_i = \frac{f_i^{os}}{f_i^{ol}} \quad (12)$$

Dónde:

$f_i^{os}$ : Fugacidad del componente puro  $i$  en la fase sólido.

$f_i^{ol}$ : Fugacidad del componente puro  $i$  en la fase líquida.

Con una serie de modificaciones basadas en las ecuaciones de equilibrio solido-liquido introducidas a través de un modelo termodinámico, las condiciones de equilibrio en términos de potenciales químicos pueden ser empelados sin pérdida de generalidades como se menciona a partir de la ecuación 15.

En el equilibrio la actividad y fugacidad de las fases son iguales:

Condiciones:

$$U_i^{OI} = U_i^{OII} \quad (13)$$

$$f_i^{OI} = f_i^{OII} \quad (14)$$

Dónde:

$U_i^{OI}$  Potencial químico del componente  $i$  de una sustancia pura de la fase I

$U_i^{OII}$  Potencial químico del componente  $i$  de una sustancia pura de la fase II

$f_i^{OI}$  Fugacidad del componente  $i$  puro de la fase I

$f_i^{OII}$  Fugacidad del componente  $i$  puro de la fase II

Para la igualdad:

$$U_i^{OI} + RT \ln \frac{f_i^I}{f_i^{OI}} = U_i^{OII} + RT \ln \frac{f_i^{II}}{f_i^{OII}} \quad (15)$$

Dónde:

$U_i^{OI}$  Potencial químico de una sustancia pura del componente i de la fase I

$U_i^{OII}$  Potencial químico de una sustancia pura del componente i de la fase II

R Constante de los gases ideales

T Temperatura del sistema

$f_i^I$  Fugacidad del componente i de la fase I

$f_i^{II}$  Fugacidad del componente i de la fase II

Al realizar simplificaciones y aplicando las condiciones enunciadas, se obtiene:

$$\frac{f_i^I}{f_i^{OI}} = \frac{f_i^{II}}{f_i^{OII}} \quad (16)$$

La ecuación 17 demuestra la condición de equilibrio en términos de potenciales químicos, que son empleados sin pérdida de generalidades por una ecuación en la cual las fugacidades de cualquier especie debe ser la misma para todas las fases:

$$f_i^I = f_i^{II} \quad (17)$$

Con el conocimiento de los fundamentos de la termodinámica del equilibrio entre fases es indispensable para predecir dicho comportamiento de las ceras. El cálculo del equilibrio de fases sólido líquido puede incidir con el criterio de fugacidad se asocia a la tendencia de una sustancia a preferir una fase frente a otras a una presión y temperatura fijas:

$$f_i^S = f_i^L \quad (18)$$

Dónde:

$f_i^L$  Fugacidad del componente i en la fase líquida.

$f_i^s$  Fugacidad del componente i en la fase solida

La fugacidad ( $f_i$ ) del componente i en la fase que corresponde a presión atmosférica puede calcularse a partir de las ecuaciones 19 y 20, a su vez está relacionada con el coeficiente de actividad del componente i ( $y_i$ ), se evalúa en términos de energía en exceso, la energía extra que la hace no ideal está relacionada con las fracciones molares del componente i ( $x_i$ ) en el estado correspondiente, al aplicar en forma separada para cada fase se obtiene:

$$f_i^l = x_i^l y_i^l f_i^{ol} \quad (19)$$

$$f_i^s = x_i^s y_i^s f_i^{os} \quad (20)$$

Dónde:

$f_i^{os}$  Fugacidad del componente puro i en la fase sólido.

$f_i^{ol}$  Fugacidad del componente puro i en la fase líquida.

$f_i^l$  Fugacidad del componente i en la fase líquida.

$f_i^s$  Fugacidad del componente i en la fase solida

$x_i^l$  Composición del componente i en la fase liquida

$x_i^s$  Composición del componente i en la fase solida

$y_i^s$  Coeficientes de actividad del componente i en la fase solida

$y_i^l$  Coeficientes de actividad del componente i en la fase liquida

Al remplazar las ecuaciones 19 y 20 en la ecuación 18 se obtiene:

$$x_i^s y_i^s f_i^{os} = x_i^l y_i^l f_i^{ol} \quad (21)$$

Por lo tanto los coeficientes de actividad (fuerzas de atracción entre el solvente y las moléculas de cera) son despreciables comparadas con el efecto de la temperatura y la entalpia de fusión, se considera la idealidad de la fase líquida

( $y_i^l = 1$ ) y para la fase solida se considera como un sólido puro de modo que cristaliza, por lo tanto la igualdad de la fase sólida en equilibrio puede ser sustituida por la fugacidad en el sólido puro por lo tanto, ( $y_i^s x_i^s = 1$ ), a esto se le llama inmiscibilidad completa para todas las especies en estado sólido (Smith,1996) **[16]**, reemplazándose entonces la ecuación 12 se obtiene la siguiente ecuación:

$$x_i^l y_i^l = x_i^s y_i^s \Psi_i \quad (22)$$

La siguiente expresión es el resultado de las simplificaciones, representa una relación lineal entre la composición de la fase líquida  $x_i^l$  y su temperatura de equilibrio, la cual fue dada para el equilibrio sólido líquido, cuando una muestra líquida se enfría la formación sólida para el componente  $i$  se inicia, por consiguiente, la precipitación de un componente  $i$  de una mezcla líquida modifica la composición del líquido y por lo tanto se produce la precipitación en un rango de temperaturas

$$x_i^l = \Psi_i \quad (23)$$

El parámetro  $\Psi_i$  dependiente de la temperatura, corresponde a una mezcla eutéctica binaria determinada mediante la ecuación 2, con ésta se ha de comprobar para cada componente, por lo que representa un sistema de ecuaciones determinado, las cuales permiten de forma analítica, predecir la cantidad de parafina precipitada mediante la posterior ecuación:

$$x_i^l = \Psi_i = \exp \frac{\Delta H_i^f}{RT_i^f} \left( \frac{T - T_i^f}{T} \right) \quad (24)$$

Donde ( $\Delta H_i^f$ ) es la entalpia de fusión y ( $T_i^f$ ) representa la temperatura de fusión de un componente puro estimado mediante tablas (GPSA) **[17]**, o por correlaciones (won, 1989), donde  $T$  es la temperatura del sistema y  $R$  es la constante universal de los gases ideales.

Para parafinas normales Won propone el cálculo de la temperatura y entalpia de fusión, supone que todos los componentes con el mismo número de carbono tienen la misma temperatura y entalpia de fusión, esto solo cumple para compuestos que contengan un peso molecular menor o igual 450 g/mol:

$$T_i^f = 374,5 + 0,02617 * M_i - \frac{20172}{M_i} \quad (25) \quad \Delta H_i^f =$$

$$1,14 * 0,1426 * M_i * T_i^f \quad (26)$$

Dónde:

$M_i$  Peso Molecular del componente i

$C_i$  Numero de carbonos del componente i

$\Delta H_i^f$  Entalpia de fusión

$T_i^f$  Temperatura de fusión

Además el modelo utiliza la siguiente ecuación en función de los componentes no normales (iso -parafinas, aromáticos, y nafténicos) propuesto por Conoco en 1993:

$$T_{f, \text{no normal}} = T_i^f - \left( 90 - \frac{80 * C_i}{100 + C_i} \right) \quad (27)$$

Dónde:

$C_i$  Numero de carbonos del componente i

$T_i^f$  Temperatura de fusión del componente i parafinas normales

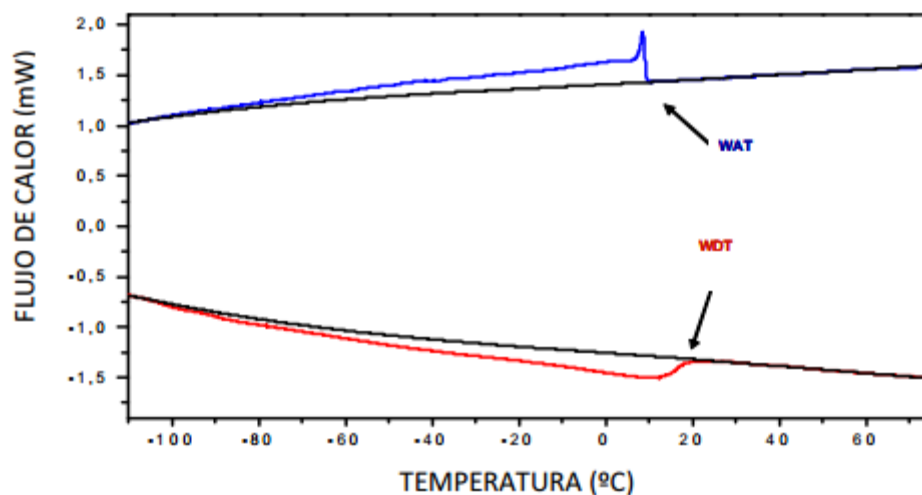
## 2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

La determinación experimental y cuantificación del proceso de precipitación es bastante complejo y de mucho tiempo, existen técnicas más sencillas que son de interés para llevar a cabo dicho estudio

Existen diferentes técnicas experimentales tales como calorimetría diferencial de barrido (DSC), espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN-H) y transformación de Fourier de la radiación infrarroja (FT-IR), estos permiten obtener la cantidad de precipitado sólido en función de la temperatura (Elsharkawy, 1999) [18]. Estas son técnicas completas que arrojan datos muy cercanos al comportamiento del fluido al ir disminuyendo la temperatura.

La técnica de calorimetría de barrido (DSC) es apropiada para desarrollar ensayos de rutina, ha sido ampliamente aplicada para determinar temperatura de aparición y disolución de la cera (WAT y WDT respectivamente) y sus fracciones debido a su simplicidad por lo que la técnica genera una respuesta rápida. Sin embargo, su aplicación a mezclas de derivados del petróleo presenta algunas dificultades relacionadas tanto con la técnica experimental para la interpretación de los termogramas en la figura 3 por el crudo ocluido presente atrapado en los cristales de cera. Baudillo (2009) [19].

**Figura 3. Termogramas de enfriamiento y calentamiento.**



**Fuente:** Baudillo C., Carmen M., Juan E., María R., José P. "Analysis of paraffin precipitation from petroleum mixtures by means of DSC: Iterative procedure considering solid-liquid equilibrium equations", 22 December 2009.

### 3. HERRAMIENTA APLICADA EN EL MODELO ANALÍTICO PARA LA PREDICCIÓN DE PARAFINAS EN CRUDO DE CAMPO COLORADO.

En la tabla 2 se presentan las propiedades de los crudos analizados, proporcionados por Campo Escuela Colorado:

**Tabla 2. Características de los crudos de Campo Colorado analizados en el proyecto**

CRUDO	UBICACIÓN	BASE	DENSIDAD (API)	TIPO
COL 25	BLOQUE 1 ARENA B	PARAFÍNICA	36,0	LIVIANO
COL 64	BLOQUE 2 ARENA B	PARAFÍNICA	36,8	LIVIANO

En la tabla 3 se muestra la composición de tres crudos: Col 25 (bloque 1 arena B), Col 38 (bloque 1 arena C, B) y Col 64 (bloque 2 arena B). Tabla 8, ICP (2008). Los pozos Col 25 y Col 64 presentan similar composición, su producción se encuentra en diferentes bloques 1 y 2 respectivamente pero de la misma arena (B), este proyecto realiza la aplicación de la herramienta con estos dos crudos ya que cuenta con la información necesaria para el desarrollo de la metodología propuesta en el proyecto.

#### 3.1 DATOS DE ENTRADA PARA DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

Los datos de entrada para el modelo Won modificado por Conoco son:

- Cromatografía del crudo a analizar %P/P (porcentaje en peso) de cada componente presente.

- Numero de carbonos (Solo para Iso-parafinas y Aromáticos).
- Masa molar de Todos los componentes.
- Se debe tener en cuenta que este modelo es solo para crudo muerto.

**Tabla 3. Composición Crudos Colorado.**

COMPONENTE	COL 25 Bloque 1 arena B	COL 38 Bloque 1 arena C, B	COL 64 bloque 2 arena B
	WT%	WT%	WT%
CO2	0	0	0
H2S	0	0	0
N2	0	0	0
C1	0	0	0
C2	0	0	0
C3	0.133	0.176	0.112
I-C4	0.114	0.142	0.109
N-C4	0.394	0.424	0.363
I-C5	0.476	0.481	0.433
N-C5	0.675	0.683	0.621
C6	1.668	1.91	1.531
C7	2.885	3.355	2.577
C8	3.944	4.916	3.868
C9	4.208	4.962	4.158
C10	4.029	4.602	4.125
C11	3.595	3.947	3.809
C12	3.319	3.554	3.575
C13	3.836	4.054	4.028
C14	3.308	3.616	3.718
C15	3.534	3.805	3.865
C16	3.139	3.306	3.472
C17	2.947	3.097	3.281
C18	3.024	3.241	3.396
C19	2.965	3.079	3.274
C20	2.673	2.75	2.987
C21	2.412	2.489	2.684
C22	2.413	2.464	2.671
C23	2.243	2.291	2.477
C24	2.042	2.092	2.248
C25	2.14	2.175	2.133
C26	1.693	1.734	2.047
C27	1.997	2.006	2.021
C28	1.72	1.736	1.962
C29	1.549	1.572	1.642
C30	30.352	24.529	26.25
BENZENE	0.123	0.233	0.206
TOULENE	0.452	0.576	0.359
TOTAL%	100	100	100

**Fuente.** ICP, Caracterización Crudo Campo Colorado, “Laboratorio de análisis PVT, Composición crudos colorado Col 25, Col 64 Col 38”, Análisis cromatografico, Registros del Instituto Colombiano del petróleo ICP Bucaramanga.

Para este modelo se realiza una comparación entre los resultados obtenidos usando las temperaturas y entalpías de fusión por tablas (GPSA) y las ecuaciones modificadas por Conoco.

Las siguientes consideraciones se tienen en cuenta para el desarrollo del modelo en el programa:

- El modelo de Won es para crudos muertos (sin contenido de gas), es decir sin la presencia de compuestos livianos como metano, etano, propano y butano (C1, C2, C3 y C4) a temperaturas de prueba y a presión atmosférica.
- El modelo de Won es solo para Hidrocarburos por esto se excluye (dióxido de carbono, compuestos nitrogenados y sulfuros), además de esto, por sus propiedades físicas, esos compuestos nunca precipitan.
- Se consideran compuestos del C18 al C30, ya que en este rango se aprecian las parafinas precipitadas.
- A condiciones de prueba (DSC), -20 °C de temperatura final de prueba, el compuesto de menor peso molecular que precipita es el C18. Además de esto, el modelo de Won está diseñado para C10+, los demás no se consideran debido a que es muy poco probable su precipitación.

Con los compuestos C18-C30 se obtiene el porcentaje de error para la temperatura de fusión (ver tabla 4) y la entalpia de fusión (ver tabla 5).

El porcentaje de error para la temperatura de fusión es:

$$\% \text{Error de T de fusión} = \frac{(\Sigma T \text{ por tablas} - \Sigma T \text{ por ecuaciones})}{\Sigma T \text{ por tablas}} * 100 \quad (28)$$

$$\% \text{Error de T de fusión} = \frac{(4188,35 - 4183,88)}{4188,35} * 100 = 0,17 \% \quad (29)$$

El porcentaje de error de entalpia de fusión es:

$$\% \text{Error de H de fusion} = \frac{(\Sigma H \text{ por tablas} - \Sigma H \text{ por ecuaciones})}{\Sigma H \text{ por tablas}} * 100 \quad (30)$$

$$\% \text{Error de H de fusion} = \frac{(254277,66 - 231560,75)}{254277,66} * 100 = 8,97 \% \quad (31)$$

**Tabla 4. Porcentaje de error de Temperatura de Fusión para Compuestos C18-C30**

Compuesto		Temp. de Fusión (°K) Ecuación	Temp. de Fusión (°K) Tablas	T.F TAB - TF Ecu.
C18	Octadecano	301.80	301,25	0,55
C19	Nonandecano	306.31	305,15	1,16
C20	Eicosano	310.41	309,75	0,66
C21	Heneicosano	314.16	313,35	0,81
C22	Docosano	317.60	317,15	0,45
C23	Tricosano	320.77	320,65	0,12
C24	Tetracosano	323.72	323,75	0,03
C25	Pentacosano	326.46	326,65	0,19
C26	Hexacosano	329.01	329,45	0,44
C27	Heptacosano	331.41	331,95	0,54
C28	Octacosano	333.66	334,35	0,69
C29	Nonacosano	335.78	336,35	0,57
C30	Triacontano	337.79	338,55	0,76
		$\Sigma =$	4188,35	6,96
		<i>%Error de T de fusion =</i>	0,17	

**Tabla 5. Porcentaje de error de Entalpia de Fusión para Compuestos C18-C30**

Compuesto		Entalpia de fusión (cal/mol) Ecuación	Entalpia de fusión (cal/mol) Tablas	EF TAB - EF Ecu.
C18	Octadecano	12470,95	14823,85	2352,90
C19	Nonandecano	13355,06	14230,67	875,61
C20	Eicosano	14240,84	16727,79	2486,95
C21	Heneicosano	15128,29	15080,27	48,02
C22	Docosano	16017,42	18685,31	2667,89
C23	Tricosano	16908,21	18134,22	1226,01
C24	Tetracosano	17800,67	20615,56	2814,88
C25	Pentacosano	18694,81	20038,16	1343,35
C26	Hexacosano	19590,61	21885,65	2295,04
C27	Heptacosano	20488,09	21359,44	871,35
C28	Octacosano	21387,23	23936,93	2549,70
C29	Nonacosano	22288,04	23323,65	1035,61
C30	Triacontano	23190,53	25436,16	2245,63
		$\Sigma =$	254277,66	22812,95
		<i>%Error de H de fusion =</i>	8,97	

En la ecuación 28 el error es menor al 1 % para las temperaturas de fusión y menor al 10 % para las entalpías de fusión como se muestra en la ecuación 31, lo que hace confiable la utilización de estos datos en el desarrollo del modelo. En la herramienta de cálculo se usaron los datos de entalpia de fusión y temperatura de fusión por ecuaciones.

### 3.2 ALGORITMO DE CÁLCULO.

A continuación se explican los pasos para obtener el sólido precipitado para cada componente con la herramienta de cálculo. El algoritmo utilizado para crear la herramienta de cálculo y predecir las temperaturas de transición sólido líquido a condiciones de equilibrio para n-parafinas se basa en la solución de un sistema de ecuaciones.

Pasos para calcular la fracción para cada componente:

- Hallar  $n_i$  para cada componente

$$n_i = \frac{\% \frac{p}{p}}{\text{Masa Molar } \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \quad (32)$$

- Posteriormente se realiza la sumatoria de  $n_i$ ; que serían las moles por cada gramo de muestra:

$$N = \sum n_i \quad (33)$$

- Recalculamos  $n_i$  para cada componente pero esta vez como fracción:

$$n_i = \frac{n_i}{N} \quad (34)$$

$X_i = n_i$  = Composición del líquido para cada componente.

Procedimiento para determinar el sólido precipitado:

- Ingresar un valor de temperatura inicial.
- Calcular la temperatura de fusión para cada compuesto y comparar con la temperatura inicial y seleccionar los compuestos que tienen la temperatura de fusión mayor a la temperatura inicial.
- Para los componentes seleccionados determinar la composición del líquido en equilibrio por medio de la ecuación 24.
- Si la composición cumple que  $(x_i < x_i^1)$  siendo  $x_i$  el valor experimental determinado experimentalmente mediante GC-MS o puede ser estimada a partir de funciones de distribución obtenidas a partir de la curva de destilación TBP y  $x_i^1$  es la composición del líquido en el equilibrio, se transfiere ese componente a la fase sólida, con la posterior ecuación se calcula el parámetro S para cada componente.

$$S = x_i - x_i^1 \quad (35)$$

Dónde:

S= Cantidad de solido precipitado.

$x_i^1$  = Composición en equilibrio.

$x_i$  =Composición determinada en la ecuación 34

- Se asume una base de cálculo para calcular el %p/p Precipitado total y de este modo llegamos a la siguiente ecuación:

$$\left(\% \frac{p}{p}\right)_i = S_i * N * M_i \quad (36)$$

$$\% \frac{p}{p} = \sum \left( \% \frac{p}{p} \right)_i \quad (37)$$

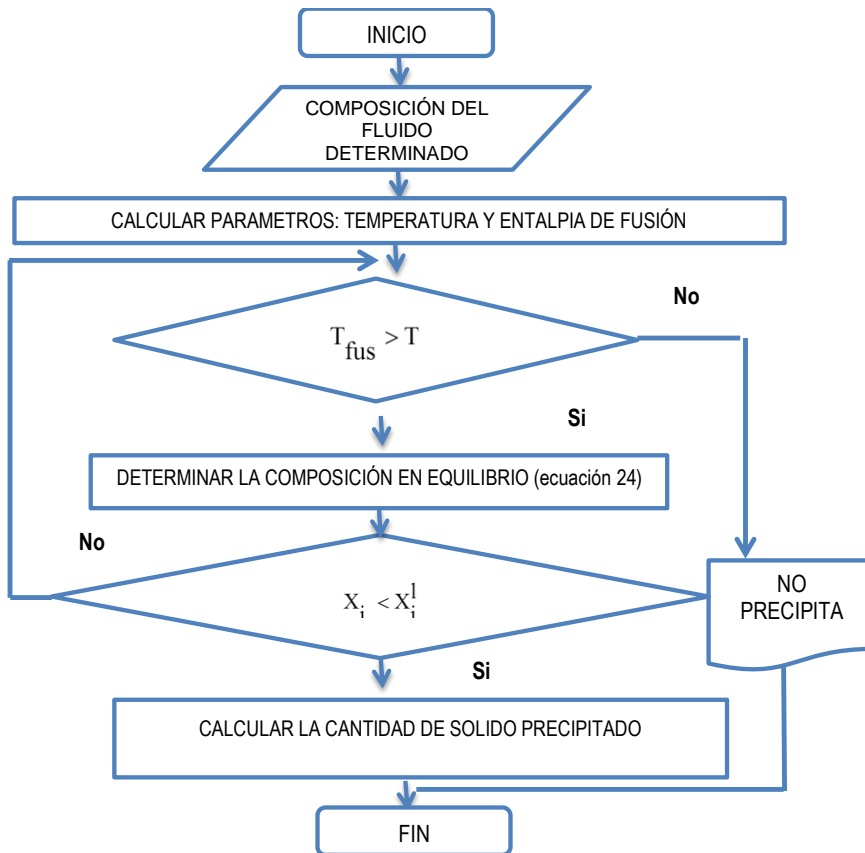
Dónde:

$\left( \% \frac{p}{p} \right)_i$ : Porcentaje en peso de precipitado de cada componente

$M_i$ : Masa molar de cada componente

A continuación se describe mediante un diagrama de flujo la forma en la cual la herramienta de cálculo realiza el análisis, se fijaron todos los caracteres y formas que comprenden la interfaz, el código de cálculo se ha programado en C++ y el algoritmo se muestra en un diagrama de flujo (ver fig. 4).

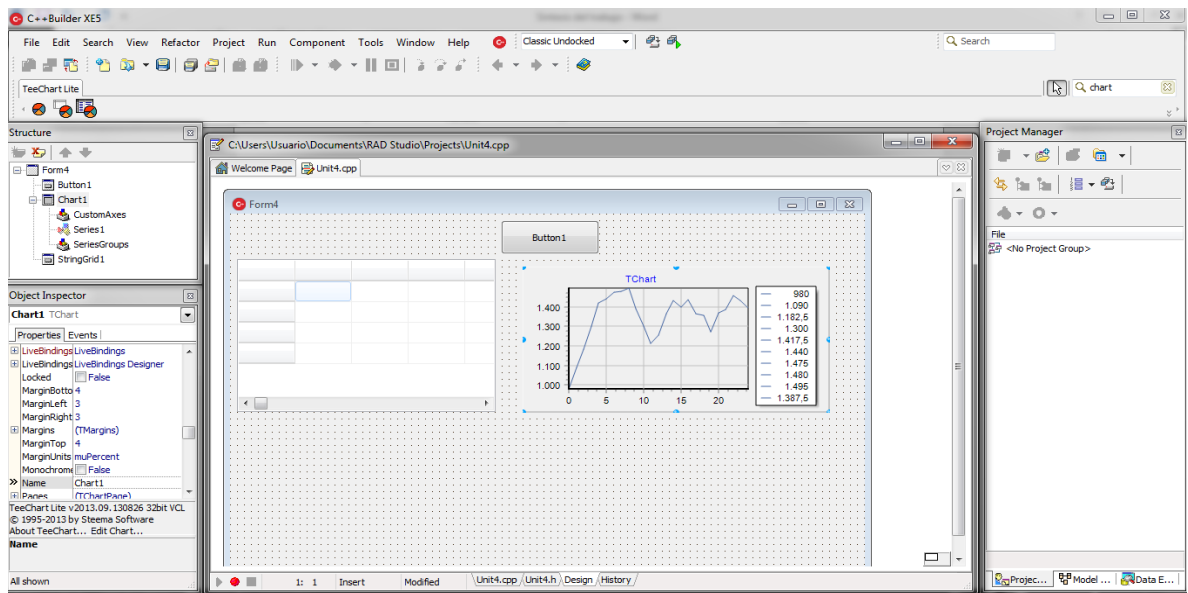
**Figura 4. Secuencia de cálculo para determinar la cantidad de sólido precipitado**



### 3.3 MÉTODO DE PROGRAMACIÓN DE LA HERRAMIENTA.

La herramienta de cálculo permite predecir la precipitación de parafinas y la temperatura a la cual se presenta el primer cristal de precipitado, en crudo de Campo Escuela Colorado, se programó en Boreland C++ Builder versión 2013. La figura 5 muestra la construcción de la interfaz creando una fachada.

**Figura 5. Construcción de la interfaz**



### 3.4 APLICACIÓN DEL MODELO TERMODINÁMICO EN EL PROGRAMA DE CÁLCULO

La aplicación y precisión es limitada, pero permite obtener resultados rápidos y económicos; puesto que utiliza la composición del crudo (ver tabla 3) y las propiedades de los componentes puros para calcular los comportamientos de las fases y predecir de forma analítica la WAT y la cantidad de parafinas precipitadas en el crudo.

**3.4.1 Presentación de la herramienta programada.** Para acceder al contenido de la herramienta denominada, Wax Precipitation Simulator 1.0, se debe seleccionar la opción “start” (ver fig. 6).

Las variables de entrada para la simulación son (ver fig. 7):

- Temperatura inicial C°: Es la medida inicial de un sistema según su movimiento de partículas y su estado relativo de calentamiento o enfriamiento.
- Velocidad de enfriamiento C°/ min: Se toma como base de la prueba de laboratorio DSC, “según rango que se opere a la largo del desarrollo del procedimiento” como base para dato de entrada. La velocidad de enfriamiento es importante porque condiciona el tamaño de los cristales de los que depende la proporción de líquido retenido por la fracción sólida.

En la figura 8 se encuentra la interfaz que permite la identificación de la prueba a desarrollar. Cabe resaltar que para una óptima ejecución de la herramienta, se debe operar para modelos ideales siendo está, una condición para el desarrollo del programa.

**Figura 6. Acceso al contenido de la herramienta.**

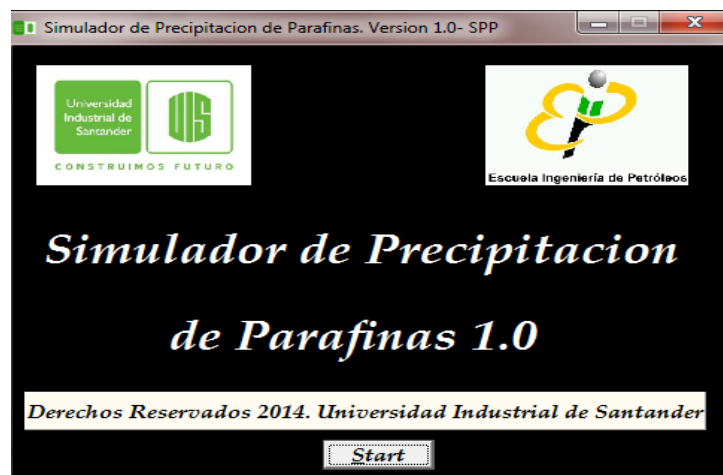


Figura 7. Variables de entrada para la simulación de la herramienta.

WPS Application- UIS - EIP

Información

INGRESO DE DATOS PRIMARIOS

Ti [°C] 25

dT/dt [°C/min] 15

tp [min] 2

dt [Seg] 6

Temperatura inicial

Velocidad de enfriamiento

Rango de tiempo

Rango de temperatura

CROMATOGRAFÍA: N° Componente Parafina # C %P/P muestra Mm [g/mol]

Cargar 1 C1 1 0,00 16,01

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar

TOTALES: % P/P Registrado 0,00 Fracción Molar 0,00

BORRAR FILA N CALCULAR RESULTADOS

Figura 8. Identificación de la prueba.

Ingreso de datos para la prueba

INGRESO DE DATOS PRIMARIOS

Ti [°C] 25

dT/dt [°C/min] 15

tp [min] 2

dt [Seg] 5

IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA

Campo COLORADO 25

Pozo Pozo 01

Fecha 13/03/14

Autor AUTORES DEL PROYE

CROMATOGRAFÍA: N° Componente Parafina # C %P/P muestra Mm [g/mol]

Cargar 1 C1 1 0,00 16,01

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar

TOTALES: % P/P Registrado 0,00 Fracción Molar 0,00

BORRAR FILA N CALCULAR RESULTADOS

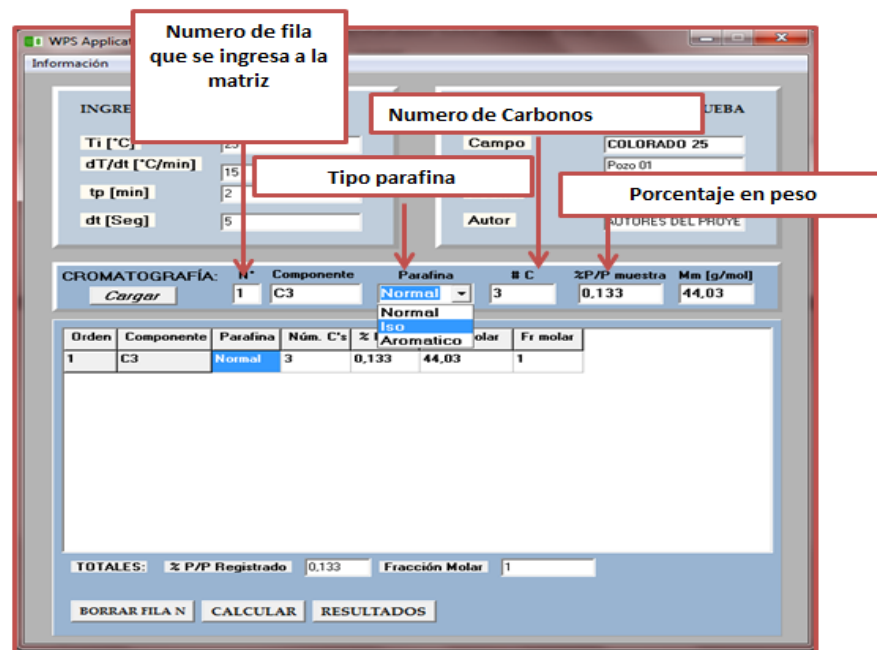
En la figura 9 se cargan los datos correspondientes a la composición del crudo, donde se ingresa el primer componente de la muestra en el cuadro "N\*", en seguida se define el tipo de parafina desplegando el submenú, luego se ingresa el números de carbonos que presenta cada componente y el porcentaje en peso

“%P/P muestra”, resultando automáticamente la masa molar “Mm (g/mol)”, ya que se encuentra cargada dentro de las líneas del código del programa ;los componentes se ingresan uno a uno con el botón “cargar”. En seguida se selecciona la opción “Calcular”, ubicada en la parte inferior de la interfaz, resultando las variables que aparecen en la figura 10, esta opción abre una bandeja principal donde se visualiza los valores calculados “salida de datos” (ver fig. 11)

A continuación se explican cada una de las variables involucradas en la herramienta de cálculo:

- T inicial °C: Es la temperatura en la cual se inicia a valorar el sistema, en la matriz.
- V enf °C/S: Es la velocidad de enfriamiento que operó a lo largo del sistema.
- T final °C: Es el rango de temperatura en la cual termina de valorar el sistema, en la matriz.

**Figura 9. Ingreso de datos de composición del crudo.**



- Temperatura de fusión (K): Es la temperatura a la cual se encuentra el equilibrio de fases solido-liquido, es decir la materia pasa del estado sólido a estado líquido, se funde.
- Entalpia de fusión cal/mol: Es la cantidad de energía necesaria para hacer que un mol de un elemento que se encuentra en su punto de fusión, pase del estado sólido al líquido a presión constante.
- WAT: Es el rango de temperatura a la cual aparece el primer cristal de cera debido a la disminución de la capacidad solvente de la matriz del crudo, por disminución de la temperatura

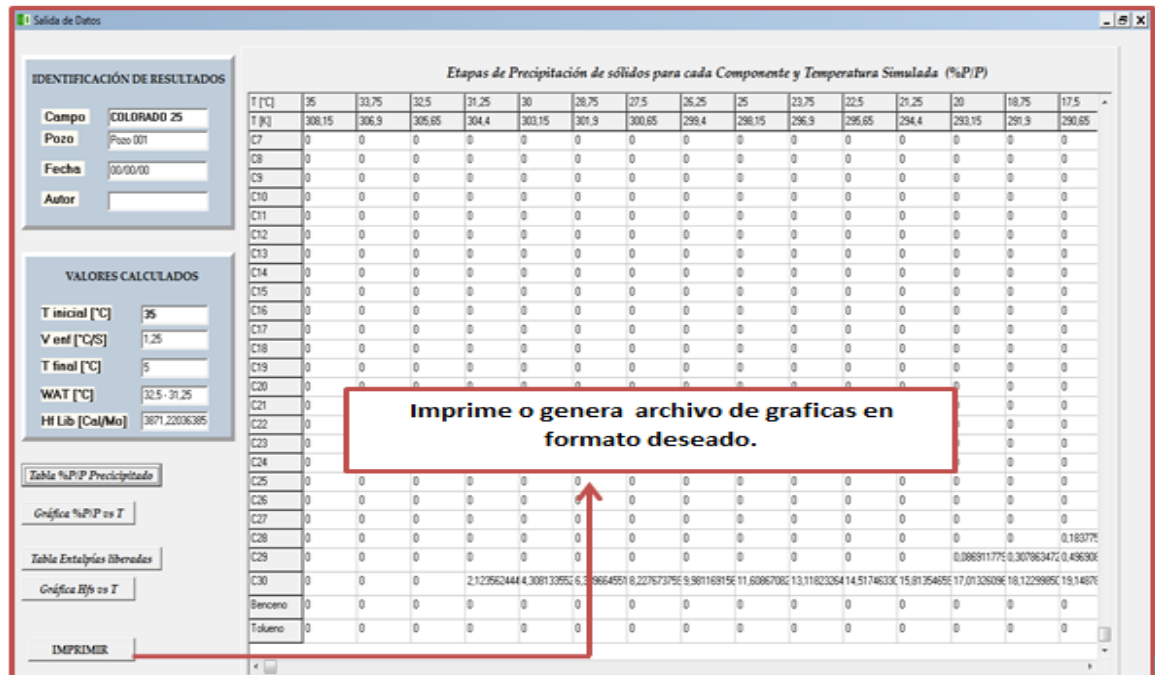
**Figura 10. Cálculo de Entalpia de Fusión y Temperatura de Fusión.**

The screenshot shows a software application window titled 'WPS Application- UIS - EIP' with a sub-window 'Información'. It is divided into several sections:

- INGRESO DE DATOS PRIMARIOS:** Contains a 'Cargar información ingresada' button and several input fields.
- IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA:** Contains fields for 'Campo' (COLORADO 25), 'Pozo' (Pozo 01), 'Fecha' (13/03/14), and 'Autor' (AUTORES DEL PROYE).
- CROMATOLOGRAFÍA:** A summary row with fields for 'N°' (1), 'Componente' (C3), 'Parafina' (Normal), '# C' (3), 'ΣP/P muestra' (0.133), and 'Mm [g/mol]' (44.03). A 'Cargar' button is also present.
- Table:** A table with columns: Orden, Componente, Parafina, Núm. C's, Σ P/P, Masa Molar, Fr molar, Tf Calc [K], and Hf Calc [Cal/M]. The first row contains: 1, C3, Normal, 3, 0.133, 44.03, 1, -82.4899106E, -590.4374497.
- Annotations:** Two red boxes labeled 'Temperatura de fusión' and 'Entalpia de fusión' are positioned below the table. Red arrows point from these boxes to the 'Tf Calc [K]' and 'Hf Calc [Cal/M]' columns of the first row, respectively.
- TOTALES:** A section with 'Σ P/P Registrado' (0.133) and 'Fracción Molar' (1).
- Buttons:** 'BORRAR FILA N', 'CALCULAR', and 'RESULTADOS' are located at the bottom.

- $\Delta H_{Lib}$  (cal/ mol): Es el valor de la energía que ha perdido el sistema para generar la depositación de parafinas, mostrándonos el cambio de la entalpia con respecto a la temperatura.

Figura 11. Salida de datos



Los resultados se generan mediante tablas y gráficas que corresponden:

- Etapas de precipitación de sólidos para cada componente y temperatura simulada.
- Entalpia de precipitación de sólidos para cada componente y temperatura simulada.

**3.4.2 Aplicación de la herramienta en crudo de Campo Colorado 25.** A continuación se muestran la aplicación de la herramienta para obtener resultados de precipitación del crudo de campo colorado 25.

- Ingreso de datos primarios (ver fig. 12)
- Identificación de la prueba.
- Ingreso de cromatografía de Col 25, componente a componente, según número de carbono y tipo de parafina.

**Figura 12. Ingreso de datos primarios.**

The image shows a software window titled "INGRESO DE DATOS PRIMARIOS". It contains four input fields with the following values:

Variable	Value
Ti [°C]	35
dT/dt [°C/min]	15
tp [min]	2
dt [Seg]	5

En la figura 12 se ingresa los datos primarios, donde se indica los parámetros de entrada de la prueba, se corre con una temperatura inicial es 35(°C), a una velocidad de enfriamiento de 15 (°C/min), con etapas de tiempo de 2 (min) y etapas de temperatura de 5 °C.

Se ingresa uno a uno la composición del crudo, tipo de parafina y su correspondiente número de carbono al escribir estos datos automáticamente se muestra el porcentaje en peso de la muestra, masa molar, temperatura y entalpia de fusión. Seguidamente se selecciona la opción "Cargar"; en la figura 13 se muestra los datos cargados de los componentes del C3-C8, en la figura 14 los datos cargados de los compuestos C9-C16, en la figura 15 los datos cargados de los compuestos C17-C24 y en la en la figura 16 los datos cargados de los compuestos C25-Tolueno.

Una vez se han cargado todos los componentes del crudo, se selecciona la opción "RESULTADOS" al dar clic sobre esta, se abre una ventana donde muestra la salida de datos.

Figura 13. Ingreso de datos de compuestos C3-C8.

CROMATOGRAFÍA:  N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca]
1	C3	Normal	3	0,133	44,03	0,0065541	-82,48991066	-590,43744
2	I_C4	Iso	4	0,114	58,04	0,0042617	-58,20117130	-549,14053
3	N_C4	Normal	4	0,394	58,04	0,0147293	28,46549535	268,57805
4	I_C5	Iso	5	0,476	72,05	0,0143346	10,62383331	124,43415
5	N_C5	Normal	5	0,675	72,05	0,0203277	96,41330700	1129,2636
6	C6	Normal	6	1,668	86,06	0,0420542	142,3575817	1991,6192
7	C7	Normal	7	2,885	100,07	0,0625542	175,5399371	2855,6449
8	C8	Normal	8	3,944	114,09	0,0750074	200,6779519	3721,9592
9	C9	Normal	9	4,208	128,1	0,0712757	220,3816510	4589,3263

TOTALES: % P/P Registrado  Fracción Molar

Figura 14. Ingreso de datos compuestos C9-C16.

CROMATOGRAFÍA:  N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca]
9	C9	Normal	9	4,208	128,1	0,0712757	220,3816510	4589,3263
10	C10	Normal	10	4,029	142,11	0,0615159	236,2726391	5458,3634
11	C11	Normal	11	3,595	156,12	0,0499636	249,3773590	6329,0706
12	C12	Normal	12	3,319	170,13	0,0423293	260,3841483	7201,4478
13	C13	Normal	13	3,836	184,14	0,0452007	269,7718600	8075,4951
14	C14	Normal	14	3,308	198,15	0,0362231	277,8839200	8951,2125
15	C15	Normal	15	3,534	184,14	0,0416422	269,7718600	8075,4951
16	C16	Normal	16	3,139	226,17	0,0301142	291,2293212	10707,657
17	C17	Normal	17	2,947	240,18	0,0266231	296,7985008	11588,385

TOTALES: % P/P Registrado  Fracción Molar

Figura 15. Ingreso de datos compuestos C17-C24.

CROMATOGRAFÍA:  N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
17	C17	Normal	17	2,947	240,18	0,0266231	296,7985008	11588,385
18	C18	Normal	18	3,024	254,19	0,0258130	301,7941917	12470,782
19	C19	Normal	19	2,965	268,2	0,0239872	306,3062660	13354,850
20	C20	Normal	20	2,673	282,21	0,0205514	310,4067496	14240,588
21	C21	Normal	21	2,412	296,22	0,0176670	314,1540421	15127,996
22	C22	Normal	22	2,413	310,24	0,0168762	317,5983516	16017,709
23	C23	Normal	23	2,243	324,25	0,0150094	320,7743657	16908,458
24	C24	Normal	24	2,042	338,26	0,0130984	323,7176635	17800,877
25	C25	Normal	25	2,14	352,27	0,0131811	326,4560109	18694,967

TOTALES: % P/P Registrado  Fracción Molar

Figura 16. Ingreso de datos parte C25-Tolueno.

CROMATOGRAFÍA:  N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
25	C25	Normal	25	2,14	352,27	0,0131811	326,4560109	18694,967
26	C26	Normal	26	1,693	366,28	0,0100290	329,0129255	19590,726
27	C27	Normal	27	1,992	380,29	0,0113655	331,4084595	20488,156
28	C28	Normal	28	1,72	394,3	0,0094645	333,6598150	21387,255
29	C29	Normal	29	1,549	408,31	0,0082314	335,7818333	22288,025
30	C30	Normal	30	30,352	422,32	0,1559412	337,7873862	23190,464
31	Benceno	Aromatico	6	0,123	78,06	0,0034185	33,23261056	421,71338
32	Tolueno	Aromatico	7	0,452	92,07	0,0106521	73,83680979	1105,1352

TOTALES: % P/P Registrado  Fracción Molar

El análisis está en el rango de temperatura  $T$  inicial: 35 °C y  $T$  final: 5 °C con velocidad de enfriamiento de 1,25 °C/s, el rango de temperatura a la cual aparece el primer cristal de cera es de 32,5 °C a 31,25 °C y la entalpia liberada del sistema es 3871,22 cal/mol (ver fig. 17).

**Figura 17. Ingreso de datos.**

VALORES CALCULADOS	
T inicial [°C]	35
V enf [°C/S]	1,25
T final [°C]	5
WAT [°C]	32,5 - 31,25
Hf Lib [Cal/Mo]	3871,22036385

La figura 18 muestra la tabla de resultados del porcentaje en peso precipitado para cada componente. La figura 19 muestra la gráfica de porcentaje de sólido precipitado como función de la temperatura.

La figura 20 muestra la tabla de resultados de la entalpia de precipitación de sólidos para cada componente. La figura 21 muestra la gráfica de entalpia de precipitación en función de la temperatura.

**Figura 18. Etapas de precipitación de sólidos para cada componente generada por la herramienta de cálculo**

*Etapas de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (%P/P)*

T [°C]	35	33,75	32,5	31,25	30	28,75	27,5	26,25	25	23,75	22,5	21,25	20	18,75	17,5
T [K]	308,15	306,9	305,65	304,4	303,15	301,9	300,65	299,4	298,15	296,9	295,65	294,4	293,15	291,9	290,65
C7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,183775
C29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,086911775	0,307863472	0,496908	
C30	0	0	0	2,123562444	4,308133552	6,339664551	8,227673755	9,981169156	11,60867082	13,11823264	14,51746330	15,81354655	17,01326095	18,12299850	19,14878
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*Etapas de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (%P/P)*

T [°C]	21,25	20	18,75	17,5	16,25	15	13,75	12,5	11,25	10	9,75	7,5	6,25	5
T [K]	294,4	293,15	291,9	290,65	289,4	288,15	286,9	285,65	284,4	283,15	281,9	280,65	279,4	278,15
C7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,107180965	0,366797805
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,161567505	0,432588551	0,668415554	0,873359595	1,051223874
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0,158098585	0,375892830	0,564316035	0,727112977	0,867579922	0,988614695
C27	0	0	0	0	0,075490355	0,349924085	0,586953815	0,791408025	0,967528385	1,119036415	1,249193087	1,360852124	1,456507607	1,538336385
C28	0	0	0	0,183775485	0,410835661	0,605882487	0,773202035	0,916538452	1,039158235	1,143907405	1,233262335	1,309374810	1,374112045	1,429092052
C29	0	0,086911775	0,307863472	0,496908500	0,658431125	0,796245282	0,913664344	1,013562985	1,098431875	1,170425984	1,231407230	1,282982065	1,326534531	1,363255312
C30	15,81354655	17,01326095	18,12299850	19,14878314	20,09628827	20,97085373	21,77750210	22,52095445	23,20564555	23,83573815	24,41513734	24,94750365	25,43626605	25,88463430
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 19. Grafica generada por la herramienta de cálculo Col 25.

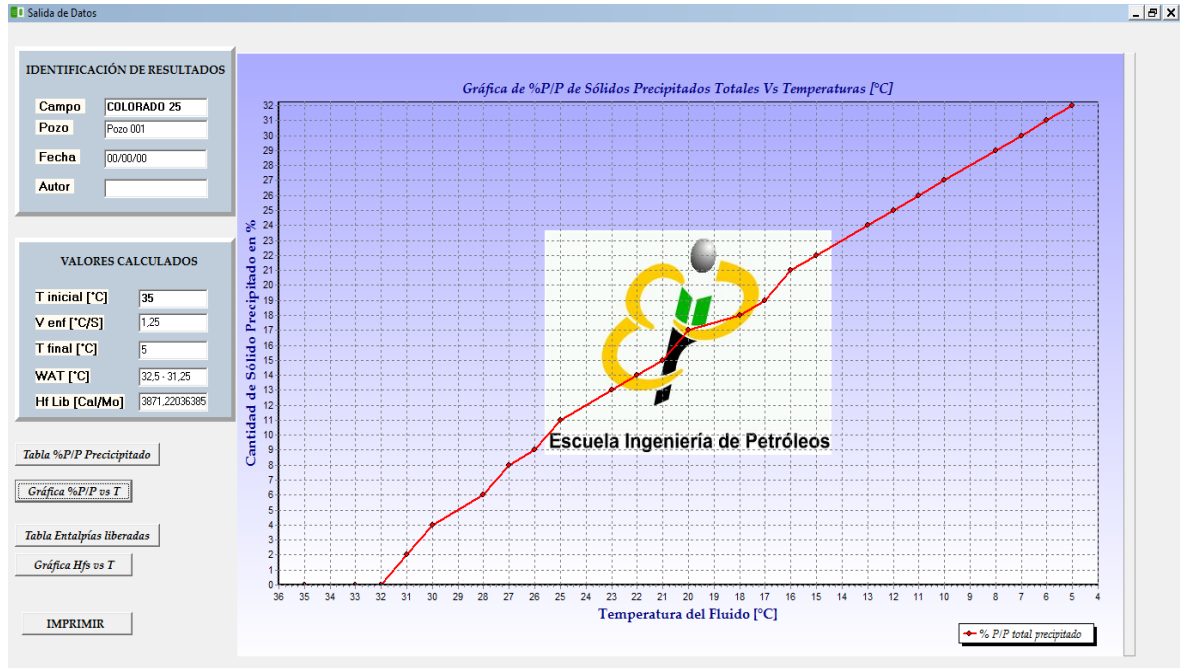
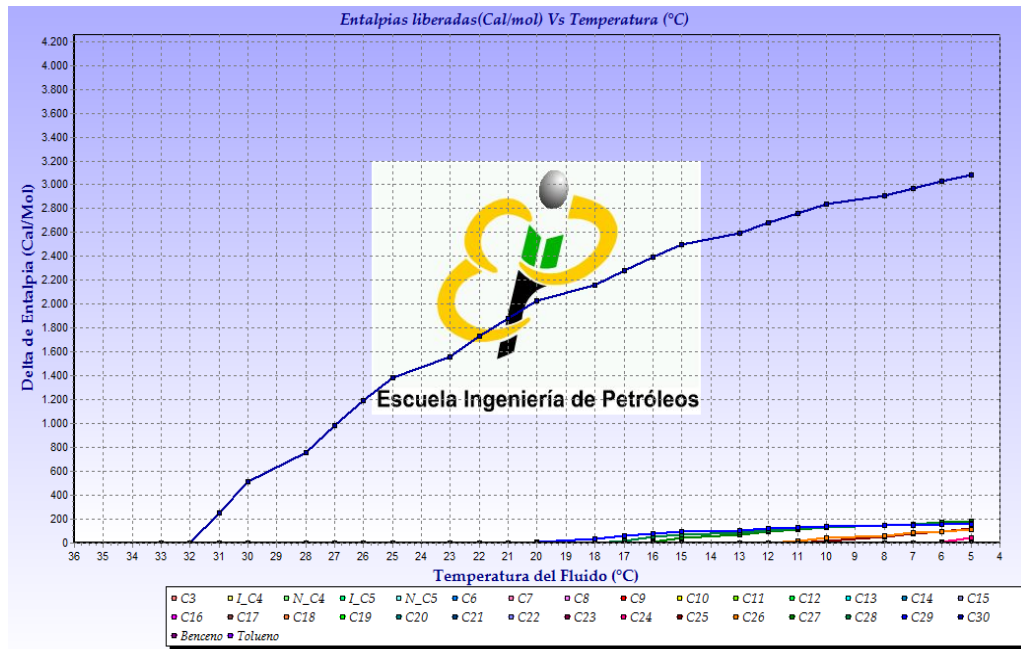


Figura 20. Entalpías de precipitación de sólidos para cada componente y temperatura

Entalpías de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (Hfs [Cal/mol])														
T [°C]	21,25	20	18,75	17,5	16,25	15	13,75	12,5	11,25	10	8,75	7,5	6,25	5
T [K]	294,4	293,15	291,9	290,65	289,4	288,15	286,9	285,65	284,4	283,15	281,9	280,65	279,4	278,15
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,23837594	41,88252511
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	18,60451821	49,81262385	76,36813172	100,5670435	121,0485555	
C26	0	0	0	0	0	0	0	18,34765960	43,62312056	65,49001363	84,38292662	100,6843986	114,7307281	
C27	0	0	0	8,82459545E	40,90507163E	68,6131330E	92,5132137E	113,1011534	130,8119857	146,0269081	159,0795132	170,261350E	179,8268885	
C28	0	0	21,6287398E	48,35170211	71,3069781E	90,99900022	107,868421E	122,2996787	134,6277244	145,1440040	154,1017654	161,7207624	168,1914197	
C29	0	10,2937962E	36,4632258E	58,85364287	77,98431804	94,3069709E	108,2140374	120,0459927	130,097829E	138,6247827	145,8473770	151,955879E	157,1142162	161,4634107
C30	1884,13682E	2027,07920E	2159,301121	2281,52029E	2394,412701	2498,61456E	2594,72430E	2683,30443E	2764,883327	2839,956981	2908,990664	2972,42051E	3030,65509E	3084,07683E
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 21. Grafica de Entalpias liberadas Vs Temperatura Col 25.



El procedimiento anteriormente descrito para el crudo colorado 25 se ejecutó de igual manera para el crudo colorado 64 ver anexos.

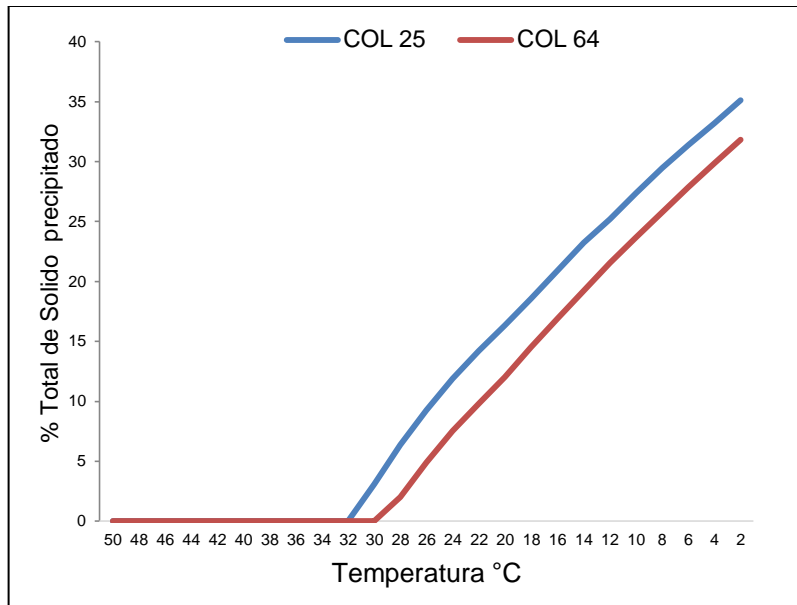
#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dos variables consideradas en este estudio de precipitación de cera son la temperatura de aparición de cera WAT y la cantidad de cera precipitada en función de la temperatura WPC.

En la figura 22 se aprecia la curva obtenida mediante la simulación del modelo termodinámico proveniente de los pozos Colorado 25 y Colorado 64. Los resultados son coherentes con la cromatografía en la cual se observa la concentración de C30 como el componente más pesado; en Col 25 es mayor, lo que genera una precipitación a una temperatura más elevada que en Col 64 con una concentración menor de C30, corroborando con la composición de los crudos. También se observa que el crudo de colorado 25 presenta un porcentaje más alto de sólido precipitado.

- **WAT** colorado 25= 32°C
- **WAT** Colorado 64= 30°C

**Figura 22. Sólido obtenido en el crudo colorado por ecuación**

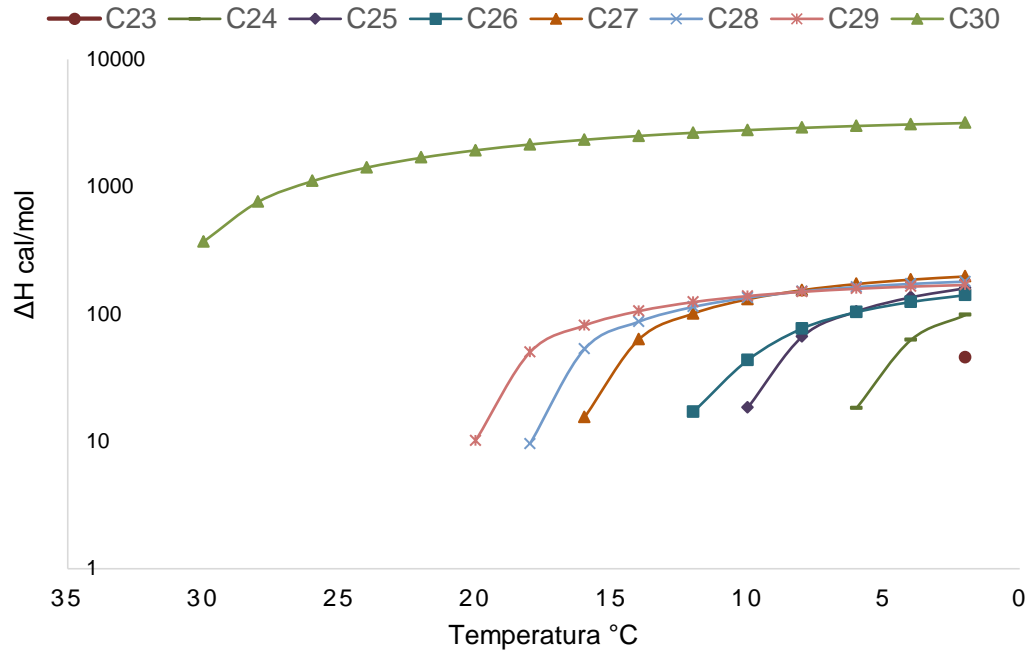


#### **4.1 DETERMINACIÓN DE ENTALPIA DE PRECIPITACIÓN DE SÓLIDOS PARA CADA COMPONENTE.**

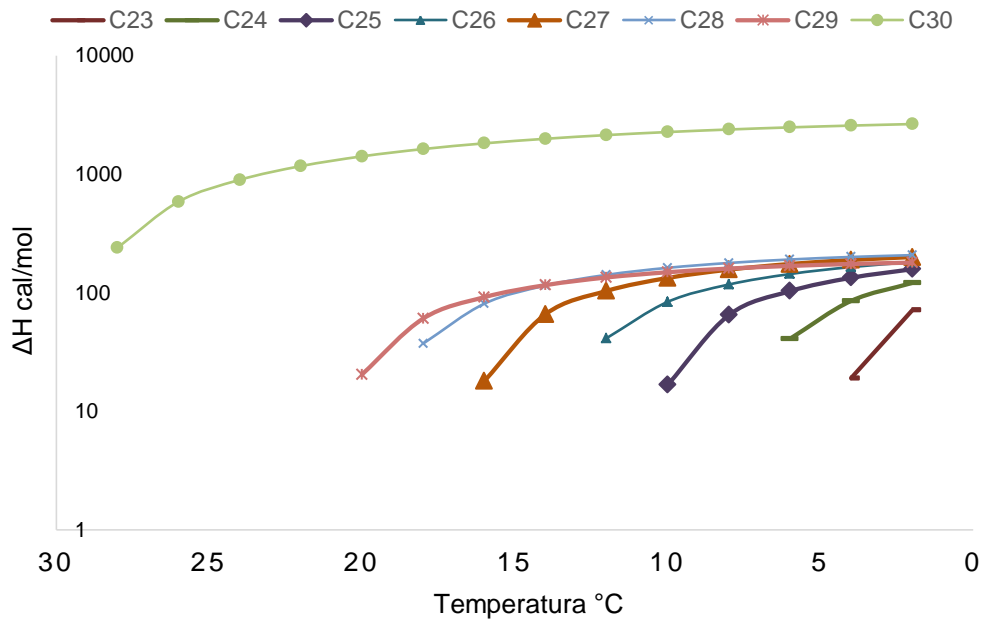
El delta de entalpia indica la cantidad de energía que ha liberado el sistema para generar la deposición de parafinas de cada compuesto, los cambios que presentan la energía ocurren durante el enfriamiento o calentamiento del proceso.

Se calculó la entalpia de precipitación para cada componente del crudo Col 25 y Col 64, con la herramienta de cálculo descrita anteriormente; las gráficas generadas se muestran en la figura 23 y figura 24 respectivamente. En las gráficas se observa que el crudo de col 25 requiere una entalpia de 370,199 cal/ mol y col 64 de 239,139 cal/ mol. El componente de mayor peso molecular C30 presenta una mayor tendencia a precipitarse por lo tanto requiere de un  $\Delta H$  mayor.

**Figura 23. Entalpias de precipitación de solidos del crudo Col 25**



**Figura 24. Entalpias de precipitación de solidos del crudo Col 64**



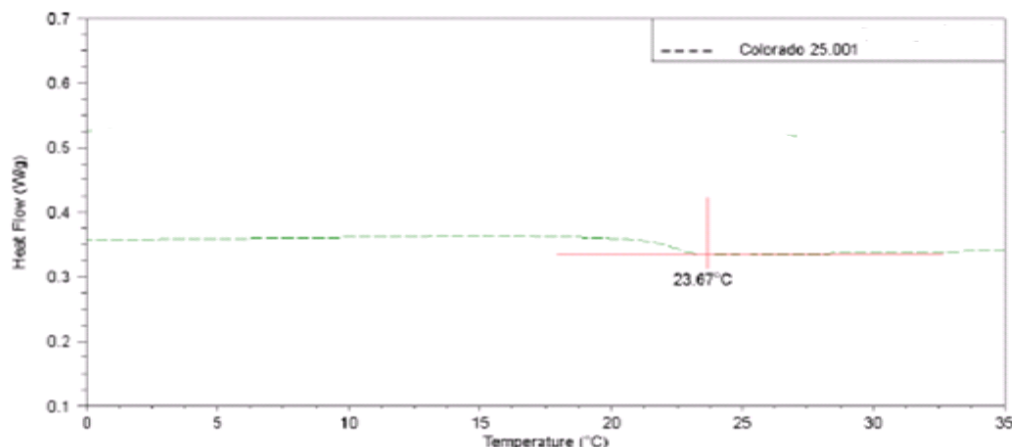
## 4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

El modelo termodinámico que se desarrolló en esta investigación se valida mediante resultados obtenidos en laboratorio; el DSC permite crear un termograma de la muestra y obtener la WAT experimental (ver fig. 25) y se compara con la WAT obtenida analíticamente. En la tabla 6 se comparan los resultados obtenidos en el modelo y los por la prueba de laboratorio denominado calorimetría diferencial de barrido.

**Tabla 6. Comparación de resultados del crudo Colorado 25**

CAMPO	WAT MODELO	WAT DSC	% ERROR
COL- 25	32	23.67	26.03

**Figura 25. Termograma de la muestra del crudo Col 25**



**Fuente:** RAMÍREZ, Johanna. RAMÍREZ BELTRÁN, Andres "Estudio de la respuesta reológica de crudos parafínicos de Campo Escuela Colorado ante un campo ". Tesis de Grado; Escuela de Ingeniería Química. UIS. Bucaramanga 2013

$$\% \text{ Error modelo Col25} = \frac{(\text{WAT Modelo} - \text{WAT DSC})}{\text{WAT Modelo}} * 100 \quad (38)$$

$$\% \text{ Error modelo Col25} = \frac{(32 - 23,67)}{32} * 100 = 26,03 \% \quad (39)$$

El error de 23,03 %, es un valor aceptable en este tipo de modelos termodinámicos, la precisión de la WAT es de más o menos 8°C. La cantidad de sólidos obtenidos a la temperatura de punto de fluidez WAT es mayor que el contenido de cera propuestos en la literatura debido al aceite crudo atrapado en la estructura parafínica precipitado.

La tabla 7 indica la temperatura y entalpia necesaria para la precipitación del primer cristal de cera (WAT).

**Tabla 7. Reporte de entalpias liberadas y su WAT correspondiente**

<b>CAMPO</b>	<b>WAT MODELO</b>	<b><math>\Delta H</math> cal/ mol</b>
<b>COL- 25</b>	32	370,199
<b>COL- 64</b>	30	239,139

#### 4.3 ANÁLISIS CUALITATIVO DEL MODELO DE WON MODIFICADO POR CONOCO PARA LA PREDICCIÓN DE PARAFINAS

**Tabla 8. Escala descriptiva**

<b>Escala Descriptiva</b>				
<b>EVALUACIÓN</b>	<b>(MB) Muy Bueno</b>	<b>(B) Bueno</b>	<b>( R ) Regular</b>	<b>(D) Deficiente</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Cumple totalmente la característica, aportando para que los resultados del modelo sean muy similares a los obtenidos experimentalmente	Cumple la característica, aporta para que los resultados del modelo se aproximen a los obtenidos experimentalmente	Cumple parcialmente la característica; medianamente contribuye para que los resultados del modelo sean similares a los obtenidos experimentalmente	Cumple deficientemente la característica; con lo cual los resultados del modelo se desvían de los obtenidos experimentalmente

**Tabla 9. Análisis cualitativo del modelo de Won modificado por Conoco**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>EVALUACIÓN</b>
Determinación de la precipitación de parafinas a baja presión	Muy Bueno
Determinación del punto de cristalización de parafinas	Bueno
Exactitud de los resultados comparados con los experimentales (efectividad)	Bueno
Aplicado especialmente para crudos y menos para fluidos sintéticos y productos de refinación	Bueno
Eficacia ( logro del objetivo de hacer una buena determinación del punto de cristalización y predicción de precipitación)	Regular
Cantidad de datos de entrada que se requieren para el modelado	Muy Bueno
Basados en datos de experimentales	Bueno
Supone que precipitan sólo los componentes pesados	Regular
Suponen que las normales, iso y ciclo parafinas tienen incidencia sobre el punto de cristalización	Muy Bueno
Eficiencia (tiempo de simulación, obtención de datos)	Muy Bueno
Los sistemas determinados "DSC" fueron descritos con éxito empleando el modelo.	Muy Bueno

## 5. CONCLUSIONES

- La revisión del estado del arte muestra que no hay un consenso en la comunidad científica sobre la selección de un modelo termodinámico con el fin de elegir el modelo que represente las mejores condiciones para la predicción de precipitación de parafinas.
- El modelo termodinámico seleccionado en esta investigación se ajusta al crudo de col 25 y col 64, en cuanto a características y datos de entrada.
- Se hizo una herramienta de cálculo llamada “Simulador de precipitación de parafinas 1.0” con la que se puede calcular el porcentaje de sólido precipitado y el  $\Delta H$  requerido para el crudo Col 25 y Col 64.
- Se comparó el resultado de la WAT obtenido con la herramienta de cálculo con la WAT obtenida experimentalmente mediante la prueba DSC
- La deposición de parafinas en los dos crudos analizados de Campo Colorado tienen características similares aunque sean de diferente bloque. Al aplicarse el modelo termodinámico, se logra obtener un modelo predictivo el cual utiliza las propiedades de los compuestos puros y la composición del fluido estudiado.
- La WAT obtenida mediante el modelo se ajusta al resultado experimental para el crudo Col 25, a partir de estos dos indicadores podemos observar el porcentaje de error de un 26,03%, dando como resultado una evaluación del modelo termodinámico Buena.

- En el presente trabajo se determina la WAT comparada con datos existentes en la base de datos de Campo Escuela Colorado para el crudo Col 25 mediante mediciones de DSC. Debido a la falta de datos relacionados con la prueba DSC no es posible realizar un ajuste adecuado entre la curva del modelo aplicado y la curva experimental, es decir no se cuenta con el análisis de crudo ocluido , pues el modelo sigue muy de cerca los datos obtenidos en la celda de equilibrio. Siendo así estos valores válidos para estimar de una manera clara la magnitud del fenómeno de precipitación de ceras que tiene lugar en el crudo.
- Uno de los aspectos más importantes que nos proporciona este estudio es el WPC, que suministra información sobre la cantidad de sólido precipitado en función de la temperatura, valores que fueron obtenidos a través de la aplicación del modelo termodinámico.

## 6. RECOMENDACIONES

- Es de vital importancia tener la composición y caracterización detallada del crudo para el desarrollo de un modelo termodinámico que pronostique las curvas de precipitación de ceras y solucionar este problema antes de que tenga lugar.
- Se recomienda trabajar la herramienta para el análisis de crudos pesados, pues si se observa el modelo muestra mayores cambios a concentraciones mayores (el componente más pesado).
- Teniendo en cuenta que se trabajó con datos de Campo Escuela Colorado, se recomienda realizar la espectrometría de masas “composición de crudos” del fluido de todos los pozos que presenten problemas de precipitación de parafinas, para un posterior análisis siguiendo esta metodología con ayuda de la herramienta, ya que la composición de masas puede variar en los pozos de un mismo yacimiento.
- Para poder realizar la validación de los modelos termodinámicos es necesario realizar pruebas de laboratorio tal como la utilizada en la metodología DSC “Calorimetría diferencial de barrido”, para determinar la precipitación experimental con mayor precisión es necesario hacer pruebas de Precipitación simple y fraccionada.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] DOBBS, James. A unique method of paraffin control in production operations. SPE. International Symposium on oilfield chemistry, SPE No.55647 [online] 14 – 17 January 2009. [Citado 3 Feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

[2] FERWORN, K.A.; HAMMAMI, A. and ELLIS, H. Control of Wax Deposition: An Experimental Investigation of Crystal Morphology and an Evaluation of Various SPE. International Symposium on oilfield chemistry, SPE. No. 37240 [online] 26 - 29 November 1997. [Citado 3 Feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

[3] KOSTA, Leontaritis. Practical asphaltene solutions & management. Curso de formación avanzada. En Ingenieros, Revista de la Facultad de Ingenierías, de la Universidad Sur Colombiana Neiva, Noviembre 1999, Vol 4, N° 5, P. 96 - 104.

[4] PRAUSNITZ, J., LICHTENTHALER, R., AZEVEDO, E.; Molecular Thermodynamics of Fluid Phase Equilibria. Prentice- Hall Inc; Englewood Cliffs NJ; 2nd Edition; (1986); (Chapter 9).

[5] BARRER, K. y NEWBERRY, M. Formation damage prevention through the control of paraffin and asphaltene deposition. SPE. International Symposium on oilfield chemistry, En: SPE. No. 16796 [online] 39 - 48 November 1989. [Citado 14 March. 1989] Available from: ONEPETRO.

[6] GARCIA, Maria del Carmen. Paraffin Deposition in Oil Production. International Symposium on oilfield chemistry. SPE 64992-MS , (2001) [online] 13 - 16 February 2011. [Citado 3 feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

[7] NEWBERRY, M.E. and BARRER, K.M. Formation damage prevention through the control of paraffin deposition. SPE. International Symposium on oilfield chemistry, En: SPE. No. 13797 [online] 13 - 29 April 1985. [Citado 3. Feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

[8] CRISTANCHO, Diana. HOYOS, Jorge. "Procedimientos Metodológicos para la Caracterización de Fluidos de Campos Maduros. Aplicación a los Fluidos del Campo Colorado". Tesis de Grado. UIS. Bucaramanga,( 2008)

[9] MARTOS, C. Coto, C. ESPADA, J. ROBUSTILLO, M. Peña, J. Merino, D. "Characterization of Brazilian Crude Oil Samples to Improve the Prediction of Wax Precipitation in Flow Assurance Problems". Energy & Fuels. p 2221-2226. (2010).

[10] INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO, ICP Caracterización Crudo Campo Colorado, "Laboratorio de análisis PVT, Composición crudos colorado Col 25, Col 64 Col 38", Análisis cromatográfico, Registros del Instituto Colombiano del petróleo ICP Bucaramanga (2008).

[11] LIRA-GALEANA C., FIROOZABADIA., & PRAUSNITZ; "Thermodynamics of Wax Precipitation in Petroleum Mixtures"; AIChE Journal; Vol. 42, 239-242; (1996).

[12] COUNTINHO J., SANTSO M, Pauly J. and DARIDON J.; "Modeling High – Pressure Wax Formation in Petroleum Fluids"; Aiche journal; Vol 5.1 No.7; (2005); pág. 2089-2097.

[13] WON K.; "Thermodynamics for Solid Solution Liquid- Vapor Equilibria: Wax Phase Formation from Heavy Hydrocarbon Mixtures"; FLUID PHASE EQ (1986); pág. 265-279.

[14] WON k., COUTINHO J., RUFFIER V.; “Experimental Measurements and Thermodynamic Modeling of Paraffinic Wax Formation in Undercooled”; (1989); pág. 377–396.

[15] ERICKSON D., Niesen V., BROWN T., Conoco Inc; “Thermodynamic Measurement and Prediction of Paraffin Precipitation in Crude Oil”; SPE Members; Society of Petroleum Engineers held in Houston, Texas, 3-6 October (1993).

[16] SMITH J.; VAN N.; Abboht H.; “Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics”; McGraw-Hill Inc; (1996); (Chapter 14).

[17] GPSA, Gas Processors Suppliers Association. “ENGINEERING DATA BOOK”. Edition pdf, Available at Published as a service to the gas processing and related process industries, pag. 23,24, Twelfth Edition (2004).

[18] ELSHARKAWY AM, AL-SAHHAF TA, FANHIM MA. Wax deposition from Middle East crudes. Fuel (1999); 79: 1047–55.

[19] BAUDILIO C., Carmen M., Juan E., María R., José P. “Analysis of paraffin precipitation from petroleum mixtures by means of DSC: Iterative procedure considering solid–liquid equilibrium equations”., 22 December (2009)

## BIBLIOGRAFÍA

AHN S, WANG K. , SHULER P.J . Paraffin Cristal and Deposition Control By Emulsification. International Symposium on oilfield chemistry. SPE 93357, [online] ONEPETRO, February 2005. [Citado 3 feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

AJIENKAS J. A ; IKOKU C.U . Department of Petroleum Engineering The effect of Temperatura on the Rheology of waxy Crude. USA. SPE 23605 ) [online] ONEPETRO, August 1991. [Citado 3 feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

ARIZA EMILIANO L. Determinación del Umbral de Cristalización de las Parafinas en el Crudo del Campo Colorado. Universidad Industrial de Santander. Magister en Hidrocarburos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008.

ARIZA, L, Emiliano. De la Caracterización de Crudos qué es Clave para Diagnosticar la Precipitación de Parafinas. En: Revista Fuentes: El Reventón Energético. Vol. 9. No. 1 de (2011). p 33-39

CANDELO, Andrés Felipe y CARVAJAL CIFUENTES, Benjamín Mauricio. Estudio comparativo de los métodos de control de parafinas. Trabajo de Grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2010.

DANCKWERTS, P. V. Continuous Flow System, Distribution of Residence Times. En: Chemical Engineering Science. 1953. N° 2, p. 3857-3866

GARCIA, Maria del Carmen. Paraffin Deposition in Oil Production. SPE International Symposium on oilfield chemistry. SPE 64992-MS [online] ONEPETRO, 13 - 16 February 2001. [Citado 3 feb. 2014] Available from: ONEPETRO.

GONZALEZ, G., Diana y Otros. Métodos para el Control e Inhibición de la Acumulación de Depósitos Parafínicos. En: Ingenierías. Revista de la Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander. 2010. Vol. 9, No. 2, p 193-206.

HERNANDEZ, Antonio y GARCIA, Andrés “Caracterización de depósitos orgánicos mediante un análisis estadístico en un campo colombiano. Aplicación al campo colorado” Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2008

JAMALUDDIN A.K. and NILGHSWANDER J. A. System Approach for Characterizing Hydrocarbon Solids. International Symposium on oilfield chemistry. International Symposium on oilfield chemistry, SPE. No. 37240., [online] ONEPETRO, 2003. [Citado 3 Feb.2014] Available from: ONEPETRO.

KOSTA, Leontaritis. Applied Hydrocarbon phase behavior thermodynamics and modelling, Professional course. Universidad Sur Colombiana. Neiva, Junio (2001).

MARQUEZ, L.C.C. y Otros. Study of Paraffin Crystallization Process under the Influence of Magnetic Fields and Chemicals. International Symposium on oilfield chemistry, SPE. No. SPE 38990. [Online] ONEPETRO 2008. [Citado 3 Feb.2014] Available from: ONEPETRO

PEDERSEN, W B. et al Precipitation from North Sea oils 2. Solid phase content as function of temperature determined by pulsed NMR. En: Energy Fuel. 1991 N° 5 p. 908–913.

QUEIMADA A.J.N. et al. Low temperature behaviour of refined products from DSC measurements and their thermo dynamical modelling. En: Thermochim Acta 2001 N° 372 p. 93–101

ROCHA, Nelson. GONZALEZ, Gaspar, VAITSMAN, Delmo Santiago. Efeito do Campo Magnético Precipitacao de Parafinas. Rio de Janeiro: Universidad Federal do Rio de Janeiro. 1997

RODRIGUEZ, L. y CASTAÑEDA, M. Estudio de los fenómenos de cristalización de parafinas en el comportamiento fluido dinámico de crudos parafínicos-fase1. En: Ciencia, Tecnología y Futuro. 2001 Vol.2, Num.2. p.65-78.

ROEHNER R.M. and HANSON, F.V. Determination of wax precipitation temperature and amount of precipitated solid wax versus temperature for crude oils using FT-IR spectroscopy. En: Energy Fuel. 2001. N° 15 p. 756–763.

ROLEMBERG, M. Measurements and prediction of the solid – liquid equilibria of satured fatty acid binary mixtures. Proceeding of the VI Iberoamerican Conference on Phase Equilibria and Fluid Properties for Process Design. Brasil; October 12-16, 2002.

## ANEXOS

### ANEXO A. Aplicación de la herramienta de cálculo para el crudo de Campo Colorado 64

WPS Application- UIS - EIP
- □ ×

Información

**INGRESO DE DATOS PRIMARIOS**

Ti [°C]

dT/dt [°C/min]

tp [min]

dt [Seg]

**IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA**

Campo

Pozo

Fecha

Autor

**CROMATOGRAFÍA:** N\*  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
1	C3	Normal	3	0,112	44,03	0,0054905	-82,48991068	-590,43744
2	I_C4	Iso	4	0,109	58,04	0,0040536	-58,20117130	-549,14053
3	N_C4	Normal	4	0,363	58,04	0,0134996	28,46549535	268,57805
4	I_C5	Iso	5	0,433	72,05	0,0129717	10,62383331	124,43415
5	N_C5	Normal	5	0,621	72,05	0,0186037	96,41330700	1129,2636
6	C6	Normal	6	1,531	86,06	0,0383986	142,3575817	1991,6192
7	C7	Normal	7	2,577	100,07	0,0555845	175,5399371	2855,6449
8	C8	Normal	8	3,868	114,09	0,0731783	200,6779519	3721,9592
9	C9	Normal	9	4,158	128,1	0,0700617	220,3816510	4589,3263

**TOTALES:** % P/P Registrado  Fracción Molar

WPS Application- UIS - EIP

Información

**INGRESO DE DATOS PRIMARIOS**

Ti [°C]

dT/dt [°C/min]

tp [min]

dt [Seg]

**IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA**

Campo

Pozo

Fecha

Autor

**CROMATOGRAFÍA:** N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
9	C9	Normal	9	4,158	128,1	0,0700614	220,3816510	4589,3263
10	C10	Normal	10	4,125	142,11	0,0626532	236,2726391	5458,3634
11	C11	Normal	11	3,809	156,12	0,0526618	249,3773590	6329,0706
12	C12	Normal	12	3,575	170,13	0,0453564	260,3841483	7201,4478
13	C13	Normal	13	4,054	184,14	0,0475203	269,7718600	8075,4951
14	C14	Normal	14	3,718	198,15	0,0405003	277,8839200	8951,2125
15	C15	Normal	15	3,885	184,14	0,0455393	269,7718600	8075,4951
16	C16	Normal	16	3,472	226,17	0,0331351	291,2293212	10707,657
17	C17	Normal	17	3,281	240,18	0,0294856	296,7985008	11588,385

**TOTALES:** % P/P Registrado  Fracción Molar

WPS Application- UIS - EIP

Información

**INGRESO DE DATOS PRIMARIOS**

Ti [°C]

dT/dt [°C/min]

tp [min]

dt [Seg]

**IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA**

Campo

Pozo

Fecha

Autor

**CROMATOGRAFÍA:** N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
17	C17	Normal	17	3,281	240,18	0,0294856	296,7985008	11588,385
18	C18	Normal	18	3,396	254,19	0,0288372	301,7941917	12470,782
19	C19	Normal	19	3,274	268,2	0,0263485	306,3062660	13354,850
20	C20	Normal	20	2,987	282,21	0,0228456	310,4067496	14240,588
21	C21	Normal	21	2,684	296,22	0,0195574	314,1540421	15127,996
22	C22	Normal	22	2,671	310,24	0,0185831	317,5983516	16017,709
23	C23	Normal	23	2,477	324,25	0,0164886	320,7743657	16908,458
24	C24	Normal	24	2,248	338,26	0,0143446	323,7176635	17800,877
25	C25	Normal	25	2,133	352,27	0,0130696	326,4560109	18694,967

**TOTALES:** % P/P Registrado  Fracción Molar

WPS Application- UIS - EIP

Información

**INGRESO DE DATOS PRIMARIOS**

Ti [°C]

dT/dt [°C/min]

tp [min]

dt [Seg]

**IDENTIFICACIÓN DE LA PRUEBA**

Campo

Pozo

Fecha

Autor

**CROMATOGRAFÍA:** N°  Componente  Parafina  # C  %P/P muestra  Mm [g/mol]

Orden	Componente	Parafina	Núm. C's	% P/P	Masa Molar	Fr molar	Tf Calc [K]	Hf Calc[Ca
25	C25	Normal	25	2,133	352,27	0,013069	326,4560109	18694,967
26	C26	Normal	26	2,047	366,28	0,012062	329,0129255	19590,726
27	C27	Normal	27	2,021	380,29	0,011470	331,4084595	20488,156
28	C28	Normal	28	1,962	394,3	0,010740	333,6598150	21387,255
29	C29	Normal	29	1,642	408,31	0,008680	335,7818333	22288,025
30	C30	Normal	30	26,25	422,32	0,134162	337,7873862	23190,464
31	Benceno	Aromatico	6	0,206	78,06	0,005696	33,23261056	421,71338
32	Tolueno	Aromatico	7	0,359	92,07	0,008416	73,83680979	1105,1352

TOTALES: % P/P Registrado  Fracción Molar

Salida de Datos

**IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS**

Campo: COLORADO 64  
 Pozo: Pozo 001  
 Fecha: 00/00/00  
 Autor: AUTORES

**VALORES CALCULADOS**

T inicial [°C]: 40  
 V enf [°C/S]: 1,25  
 T final [°C]: 10  
 WAT [°C]: 31,25 - 30  
 Hf Lib [Cal/Mo]: 2878,36377374

Tabla %P/P Precipitado  
 Gráfica %P/P vs T  
 Tabla Entalpías liberadas  
 Gráfica Hfs vs T

IMPRIMIR

**Etapas de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (%P/P)**

T [°C]	40	38,75	37,5	36,25	35	33,75	32,5	31,25	30	28,75	27,5	26,25	25	23,75	22,5
T [K]	313,15	311,9	310,65	309,4	308,15	306,9	305,65	304,4	303,15	301,9	300,65	299,4	298,15	296,9	295,65
C7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C30	0	0	0	0	0	0	0	0	0,069564984	2,111748914	4,009658446	5,772348804	7,408384746	8,925862391	10,33240
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Salida de Datos

**IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS**

Campo: COLORADO 64  
 Pozo: Pozo 001  
 Fecha: 00/00/00  
 Autor: AUTOPES

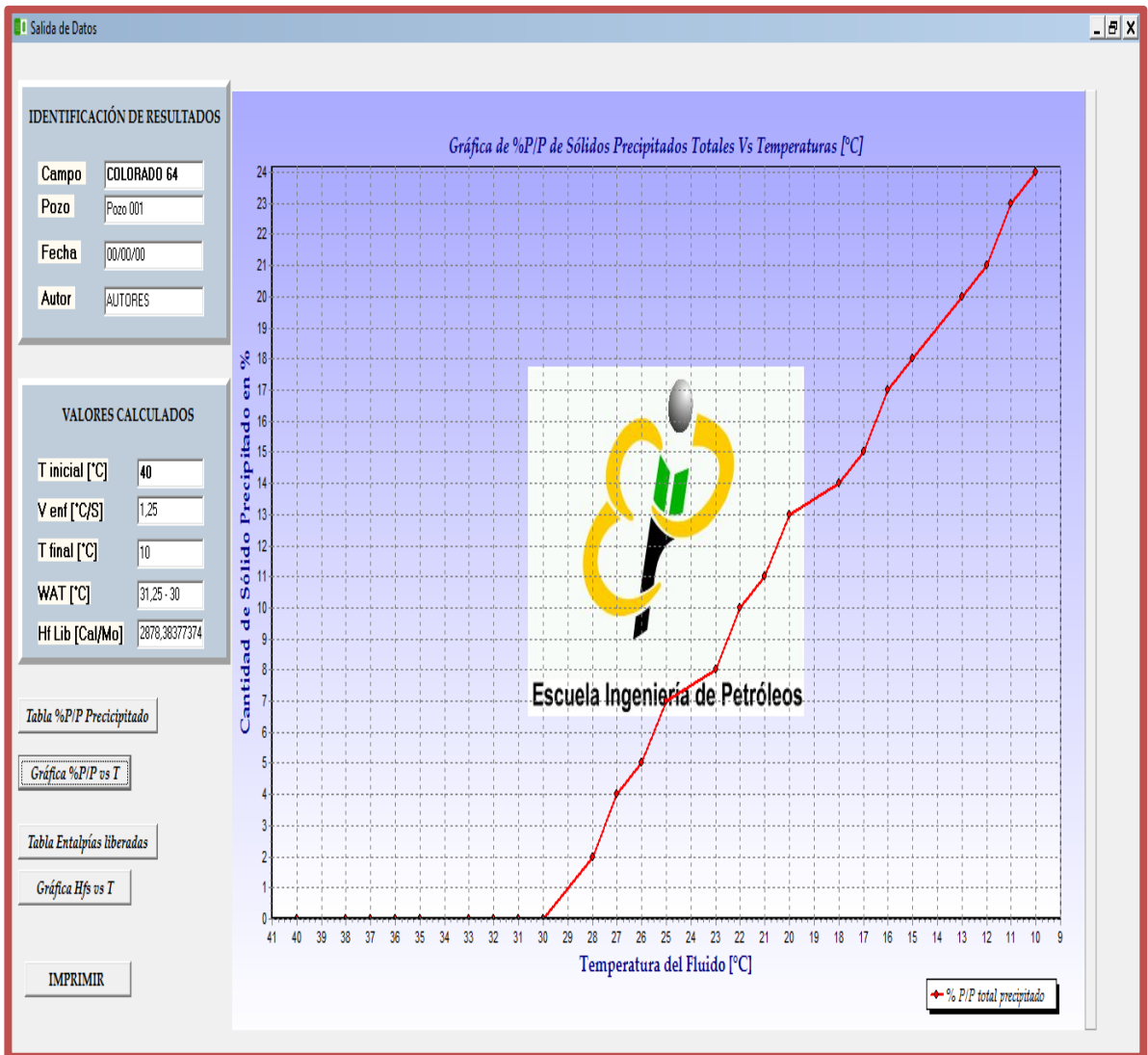
**VALORES CALCULADOS**

T inicial [°C]: 40  
 V enf [°C/S]: 1,25  
 T final [°C]: 10  
 WAT [°C]: 31,25 - 30  
 HI Lib [Cal/Mo]: 2878,38377374

Tabla %P/P Precipitado  
 Gráfica %P/P vs T  
 Tabla Entalpías liberadas  
 Gráfica Hfs vs T  
 IMPRIMIR

**Etapas de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (%P/P)**

T [°C]	26,25	25	23,75	22,5	21,25	20	18,75	17,5	16,25	15	13,75	12,5	11,25	10
T [K]	299,4	298,15	296,9	295,65	294,4	293,15	291,9	290,65	289,4	288,15	286,9	285,65	284,4	283,15
C7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,144133025
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25131728E	0,50404988E	0,722386137	
C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09444058E	0,370313387	0,60858605E	0,814112374	0,991156274	1,14345878E
C28	0	0	0	0	0	0	0,15236197E	0,41771984E	0,64597067E	0,84204029E	1,01023722E	1,15432528E	1,27758804E	1,38238650E
C29	0	0	0	0	0	0,17224489E	0,39435521E	0,58439155E	0,74676117E	0,886237994	1,003332777	1,10375527E	1,189069194	1,26144082E
C30	5,772348804	7,40838474E	8,925862391	10,33243032	11,6353100E	12,8413154E	13,9568721E	14,9880358E	15,9405094E	16,81966097	17,6305392E	18,37789011	19,0661715E	19,6895682E
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Salida de Datos

**IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS**

Campo: COLORADO 64  
 Pozo: Pozo 001  
 Fecha: 00/00/00  
 Autor: AUTORES

**VALORES CALCULADOS**

T inicial [°C]: 40  
 Vent [°C/S]: 1.25  
 T final [°C]: 10  
 WAT [°C]: 31.25 - 30  
 HI Lib [Cal/Mo]: 2878.38377374

Tabla %P/P Precipitado  
 Gráfica %P/P vs T  
 Tabla Entalpías liberadas  
 Gráfica Hfs vs T

IMPRIMIR

**Entalpías de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (Hfs [Cal/mol])**

T [°C]	40	38.75	37.5	36.25	35	33.75	32.5	31.25	30	28.75	27.5	26.25	25	23.75	22.5
T [K]	313.15	311.9	310.65	309.4	308.15	306.9	305.65	304.4	303.15	301.9	300.65	299.4	298.15	296.9	295.65
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C30	0	0	0	0	0	0	0	0	8.245225057	250.2960734	475.2467293	684.1704665	878.0824270	1057.942207	1224.656
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Salida de Datos

**IDENTIFICACIÓN DE RESULTADOS**

Campo: COLORADO 64  
 Pozo: Pozo 001  
 Fecha: 00/00/00  
 Autor: AUTORES

**VALORES CALCULADOS**

T inicial [°C]: 40  
 V enf [°C/S]: 1,25  
 T final [°C]: 10  
 WAT [°C]: 31,25 - 30  
 Hf Lib [Cal/Mo]: 2878,38377374

Tabla %P/P Precipitado  
 Gráfica %P/P vs T  
 Tabla Entalpías liberadas  
 Gráfica Hfs vs T

IMPRIMIR

**Entalpías de Precipitación de sólidos para cada Componente y Temperatura Simulada (Hfs [Cal/mol])**

T [°C]	26,25	25	23,75	22,5	21,25	20	18,75	17,5	16,25	15	13,75	12,5	11,25	10
T [K]	299,4	298,15	296,9	295,65	294,4	293,15	291,9	290,65	289,4	288,15	286,9	285,65	284,4	283,15
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,51723141
C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,0137334E	58,1908645E	83,46632554
C27	0	0	0	0	0	0	0	0	10,9822313E	43,06270751	70,7707689E	94,6708496E	115,258789E	132,9696215
C28	0	0	0	0	0	0	17,8381097E	48,9054598E	75,6284221E	98,58369817	118,2757202	135,145141E	149,5763987	161,9044444
C29	0	0	0	0	0	20,2941977E	46,4636273E	68,8540444E	87,98471957	104,3073724	118,214438E	130,046394E	140,098231E	148,625184E
C30	684,170466E	678,082427E	1057,942207	1224,65636E	1379,080811	1522,023194	1654,24510E	1776,46428E	1889,35668E	1993,559547	2089,66829E	2178,24841E	2259,82731E	2334,90096E
Benceno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

