

# MODELAMIENTO DEL DAÑO DE FORMACIÓN POR PARAFINAS

MESA DE TRABAJO EN DAÑO DE FORMACIÓN

JUAN DAVID PATIÑO  
Aspirante a MSc  
UNIVERSIDAD NACIONAL

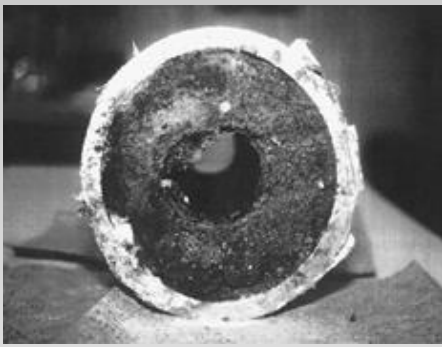
Con el Apoyo Financiero de la VP de Innovación y Tecnología de Ecopetrol

2016

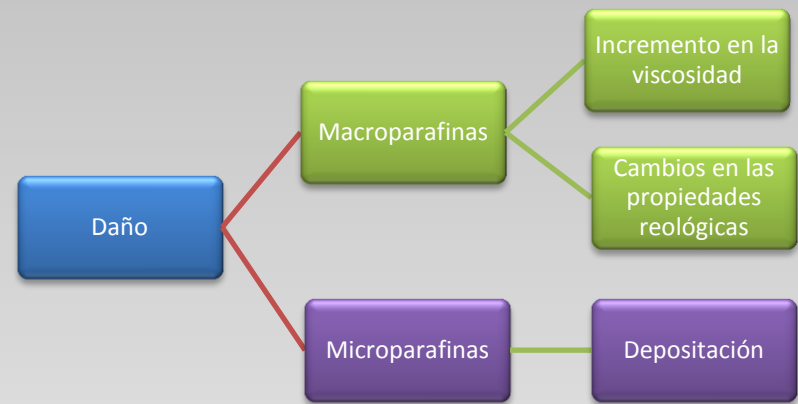


# Daño por Parafinas | Concepto Físico

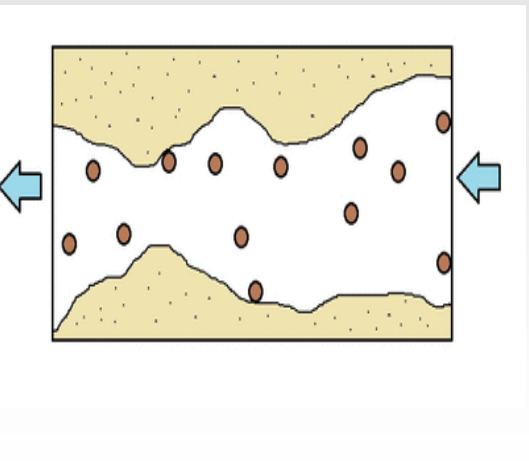
El desequilibrio termodinámico dentro del sistema de producción puede incurrir en serios problemas por precipitación, incrementos de viscosidad y deposición del contenido orgánico del fluido de yacimiento - Figura1. Por ende se incrementan los costos y se reduce la productividad de los campos.



**Figura 1:** Taponamiento en la Línea de Producción por Orgánicos. Tomado de [1].

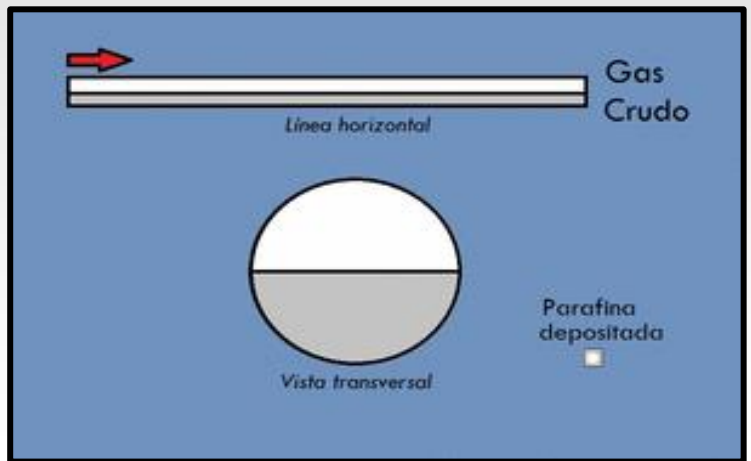


**Esquema 1.** Tipos de Daños Asociado al Contenido Parafinico en los Fluidos de Yacimiento.



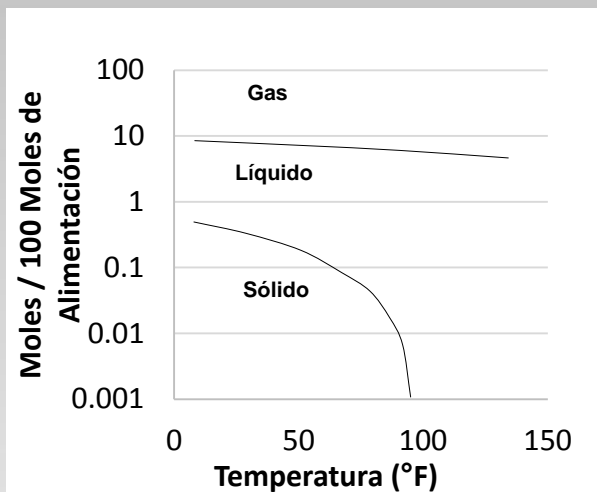
**Animación 1:** Daño por Orgánicos en el Yacimiento.

**Animación 2:** Daño por Orgánicos en el Yacimiento y en la tubería de Producción.

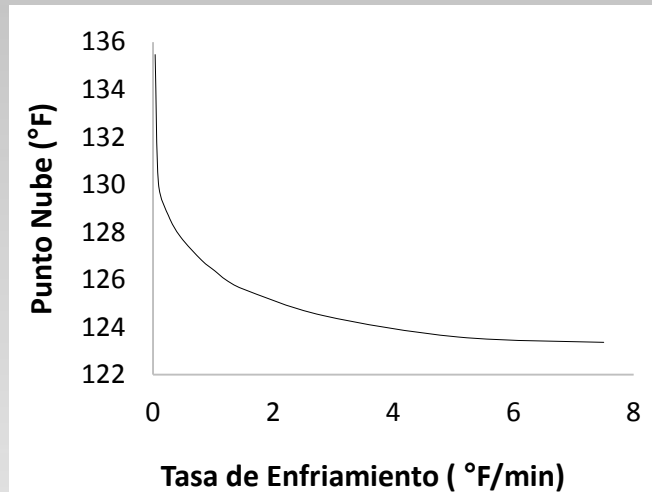


**Animación 3:** Proceso de Precipitación y Depositación Flujo Estratificado.

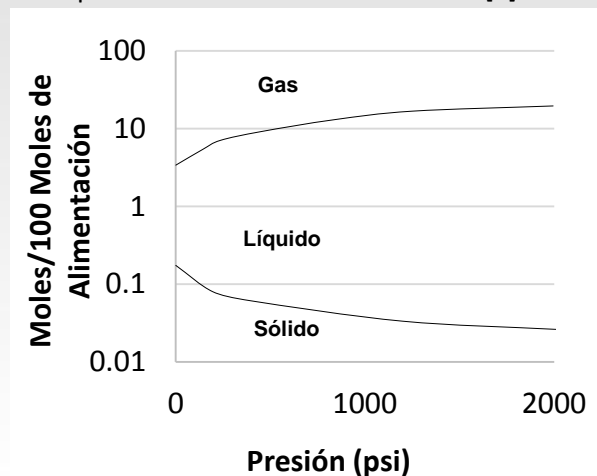
# Daño por Parafinas | Métodos de Diagnóstico



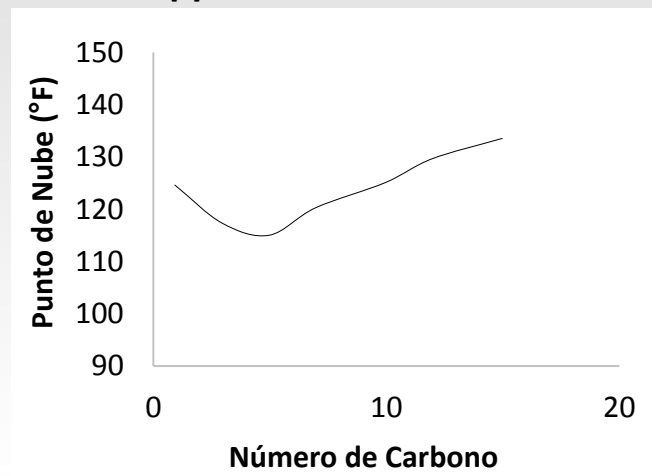
**Figura 2:** Impacto de la temperatura en el comportamiento de fases. Tomado de [2].



**Figura 3:** Tasa de Enfriamiento vs Punto Nube. Tomado de [3].



**Figura 4:** Impacto de la presión en el comportamiento de fases. Tomado de [2].



**Figura 5:** Composición y punto de nube. Tomado de [4].

En la Figura 2. Se presenta los resultados encontrados por Won. Ilustran los efectos de la temperatura en la distribución de fases para un crudo sintético con 41 componentes.

En la Figura 3. Hunt estudia el efecto de la tasa de enfriamiento sobre el punto de nube.

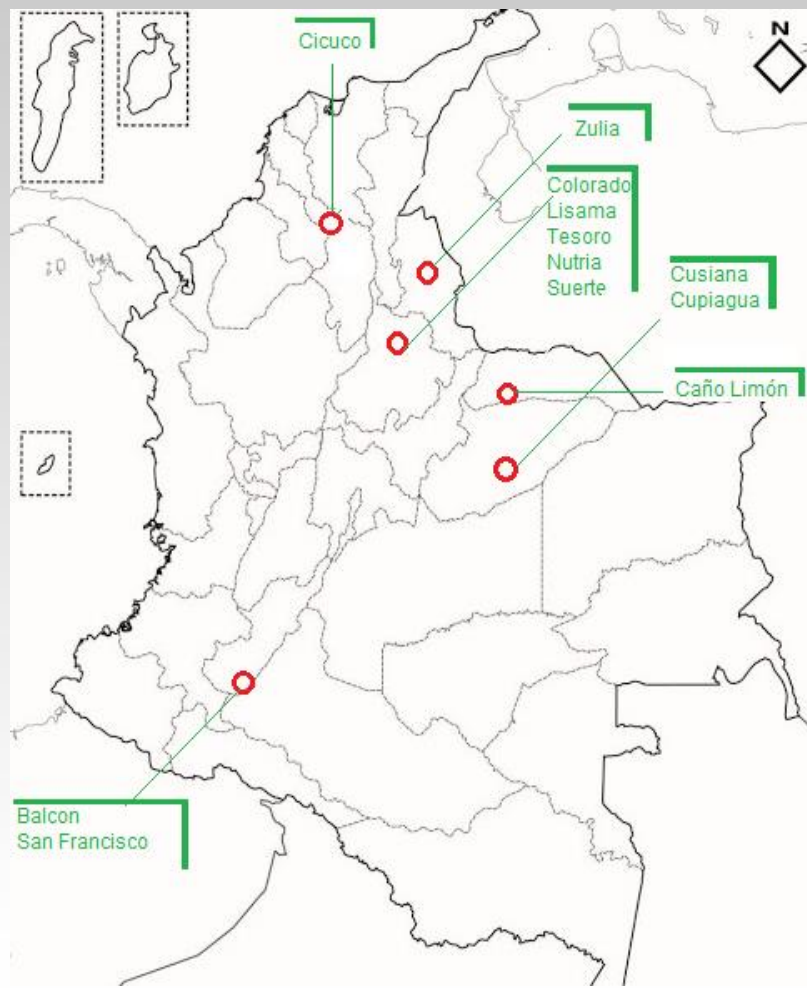
En la Figura 4. Se presenta los resultados encontrados por Won e ilustran los efectos de la presión en la distribución de fases para un crudo sintético con 41 componentes.

Adeyanju en el 2012 implementa un estudio para entender el efecto de la composición en el punto nube. Utiliza crudos sintéticos con mezcla de un 30 % de hidrocarburos puros como  $C_3$ ,  $n-C_5$ ,  $n-C_7$ ,  $n-C_{10}$ ,  $n-C_{12}$ ,  $n-C_{15}$ . La Figura 5 muestra la tendencia de los compuestos  $C_1$  a  $C_5$  a disminuir el punto de nube en los fluidos.

# Daño por Parafinas | Impacto en los Campos de Colombia

**Tabla 1.** Producción perdida de campos parafínicos en Colombia, datos tentativos con base en las estadísticas de la ANH 2015

Campo	BPDC	Campo	BPDC	Campo	BPDC	Campo	BPDC	Campo	BPDC
Tesoro	16.7	Cupiagua Sur	235.85	Balcon	74.1	Dina Cretaceo	25.3	Kona	31.65
Lisama Profundo	4.3	Cusiana	314.55	Cicuco	26.7	Dina Terciario	255.4	Carupana	9.55
Lisama	52.4	Cusiana Norte	119.45	Nutria	69.3	La Jugua (Tello)	2.5	Palagua	335.45
Cupiagua	387.4	Rio Zulia	27.95	San Francisco	278.6	Begonia	120.75	Girasol	248.55
Cupiagua Lira	202.3	Caño Limon	1475.35	Celtis	13.05	Ciriguelo	12.4	Tello	240.4
Total 4579.95 Barriles Promedio PERDIDOS por Día Calendario									



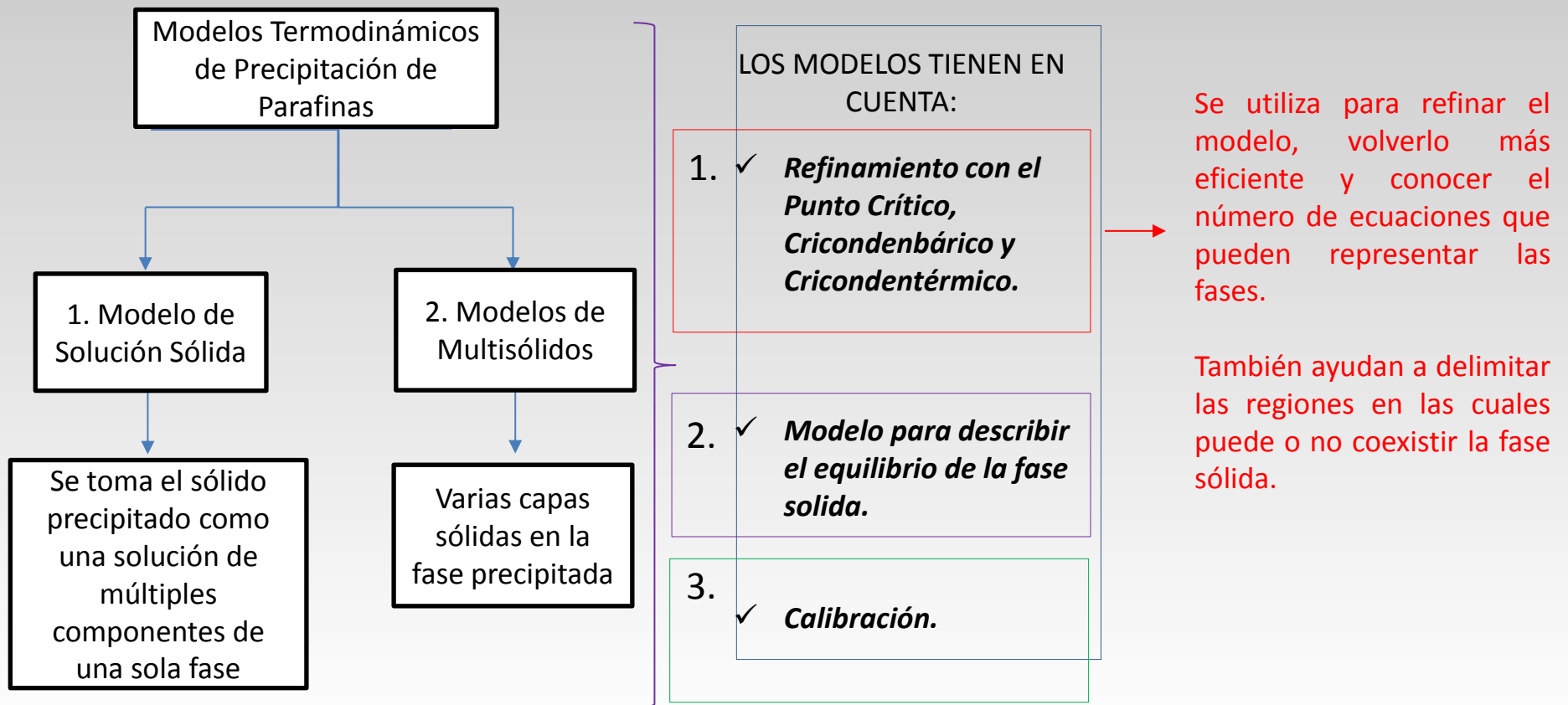
**Figura 6:** Mapa de Fluidos Parafínicos en Colombia.



Mesa Temática de Innovación y Tecnología



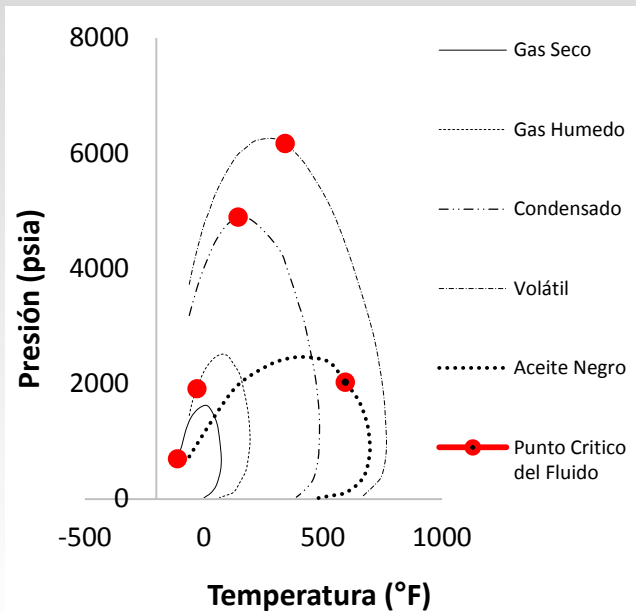
# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento



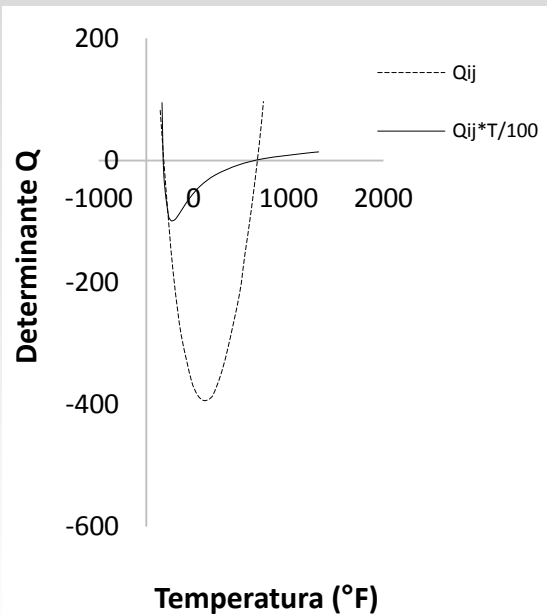
# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

➤ Cálculo del Punto Crítico con el Método de Heidemann & Khalil.

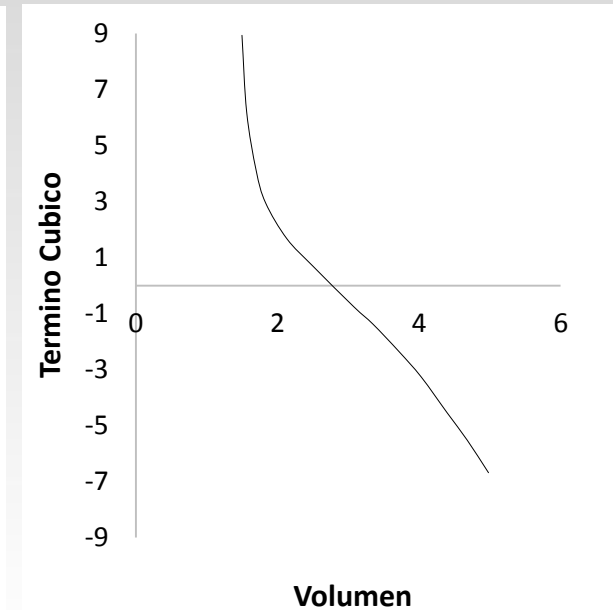
$$\left[ A - A_0 - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} \Delta n_i \right]_{T_0, V_0} = \frac{1}{2!} \sum_j \sum_i \frac{\partial^2 A}{\partial n_j \partial n_i} \Delta n_i \Delta n_j + \frac{1}{3!} \sum_k \sum_j \sum_i \frac{\partial^3 A}{\partial n_k \partial n_j \partial n_i} \Delta n_i \Delta n_j \Delta n_k \rightarrow \text{Ecuación 1.}$$



**Figura 7:** Comportamiento del Punto Crítico para Diversos Tipos de Fluidos de Yacimiento. Tomada de [5].



**Figura 8:** Simulación del Comportamiento Terminio Cuadrático. Método de Heidemann & Khalil. Simulada con base en [6].



**Figura 9:** Simulación del Comportamiento Terminio Cubico. Método de Heidemann & Khalil. Simulada con base en [6].



# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

➤ Cálculo del Punto Cricondenbárico y cricondentérmico con el Método de Taraf.

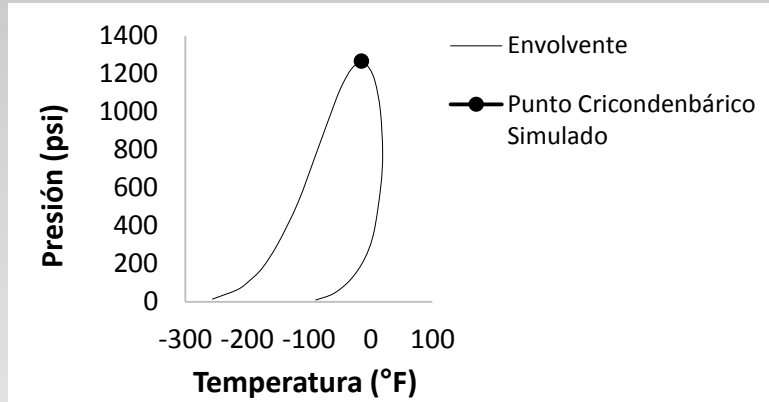


Figura 10: Simulación del Punto Cricondenbárico. Composición de la Mezcla 3 Tomada y Simulada de [7].

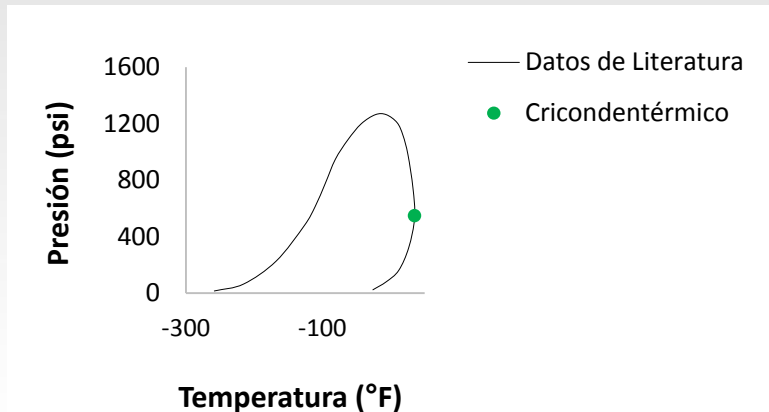


Figura 11: Datos simulados y Comparados para el Punto Cricondentérmico. Composición de la Mezcla 1 Tomada y Simulada de [7].

$$Q_1 = 1 - \sum_1^n x_i - \sum_1^n x_i (\ln z_i - \ln x_i + \ln \phi_i^v - \ln \phi_i^L) = 0 \rightarrow \text{Ecuación 2.}$$

$$\text{El criconbárico en } \frac{dQ}{dt} = 0 \rightarrow \text{Ecuación 3.}$$

$$\text{Jacobiano}(J) = \begin{bmatrix} \frac{dQ}{dp} & \frac{dQ}{dt} \\ \frac{dQ}{dpdt} & \frac{d^2Q}{d^2t} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 4.}$$

$$\text{Vector}(V) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{dQ}{dt} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 5.} \quad J^{-1} \times V = \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta t \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 6.}$$

$$Q_1 = 1 - \sum_1^n x_i - \sum_1^n x_i (\ln z_i - \ln x_i + \ln \phi_i^v - \ln \phi_i^L) = 0 \rightarrow \text{Ecuación 7.}$$

$$\text{El cricondentérmico en } \frac{dQ}{dp} = 0 \rightarrow \text{Ecuación 8.}$$

$$\text{Jacobiano}(J) = \begin{bmatrix} \frac{dQ}{dp} & \frac{dQ}{dt} \\ \frac{d^2Q}{d^2p} & \frac{dQ}{dpdt} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 9.}$$

$$\text{Vector}(V) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{dQ}{dp} \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 10.} \quad J^{-1} \times V = \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta t \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 11.}$$

# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

Expresiones para estimar la fugacidad de la fase solida

$$f_i^{os}(p) = f_i^{ol}(p) \exp \left[ -\frac{\Delta H_i^f}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_i^f} \right) - \frac{1}{RT} \int_T^{T_i^f} \Delta C_{pi} dt + \frac{1}{RT} \int_T^{T_i^f} \frac{\Delta C_{pi}}{T} dt + \frac{\Delta V_i(P - P_{ref})}{RT} \right] \rightarrow \text{Ecuación 12.}$$

$$f_i^s = x_i^s \gamma_i^s f_i^{os} \rightarrow \text{Ecuación 13.}$$

$$\Delta C_{pi} = 0.3033 MW_i + (-4.635 \cdot 10^{-4} MW_i * t) \rightarrow \text{Ecuación 14.}$$

$$t_i^f = 374.5 + 0.02617 MW_i - \frac{20172}{MW_i} \rightarrow \text{Ecuación 15.}$$

$$\Delta H_i^f = 0.1426 MW_i t_i^f \rightarrow \text{Ecuación 16.}$$



# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

Expresiones para estimar el balance de masa

$$\frac{\partial f}{\partial n_l} = \sum_{i=1} \left\{ \frac{-z_i(1-k_i)^2}{\left[ n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i \right]^2} \right\} \rightarrow \text{Ecuación 17.}$$

$$f(n_l, n_w) = \sum_{i=1} \left\{ \frac{z_i[1-k_i]}{n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i} \right\} = 0 \rightarrow \text{Ecuación 18.}$$

$$\frac{\partial f}{\partial n_w} = \sum_{i=1} \left\{ \frac{-z_i(1-k_i) \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right]}{\left[ n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i \right]^2} \right\} \rightarrow \text{Ecuación 19.}$$

$$g(n_l, n_w) = \sum_{i=1} \left\{ \frac{z_i \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} \right]}{n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i} \right\} - 1 = 0 \rightarrow \text{Ecuación 20.}$$

$$\frac{\partial g}{\partial n_l} = \sum_{i=1} \left\{ \frac{-z_i(1-k_i) \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} \right]}{\left[ n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i \right]^2} \right\} \rightarrow \text{Ecuación 21.}$$

$$\begin{bmatrix} n_l \\ n_w \end{bmatrix}^{\text{nuevo}} = \begin{bmatrix} n_l \\ n_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial n_l} & \frac{\partial f}{\partial n_w} \\ \frac{\partial g}{\partial n_l} & \frac{\partial g}{\partial n_w} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f(n_l, n_w) \\ g(n_l, n_w) \end{bmatrix} \rightarrow \text{Ecuación 22.}$$

$$\frac{\partial g}{\partial n_w} = \sum_{i=1} \left\{ \frac{-z_i \left( \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right) [k_i k_{wi}]}{\left[ n_l(1-k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i \right]^2} \right\} \rightarrow \text{Ecuación 23.}$$

# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

*Para recalcular las composiciones:*

$$\sum_i^n x_l = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z_i}{n_l(1 - k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i} \right\} = 1 \rightarrow \text{Ecuación 24.}$$

$$\sum_i^n x_{wl} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z_i \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} \right]}{n_l(1 - k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i} \right\} = 1 \rightarrow \text{Ecuación 25.}$$

$$\sum_i^n y_i = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z_i k_i}{n_l(1 - k_i) + n_w \left[ \frac{k_i}{k_{wi}} - k_i \right] + k_i} \right\} = 1 \rightarrow \text{Ecuación 26.}$$

*Condiciones que debe cumplir el balance de masa:*

$$n_l + n_w + n_v = 1 \rightarrow \text{Ecuación 27.}$$

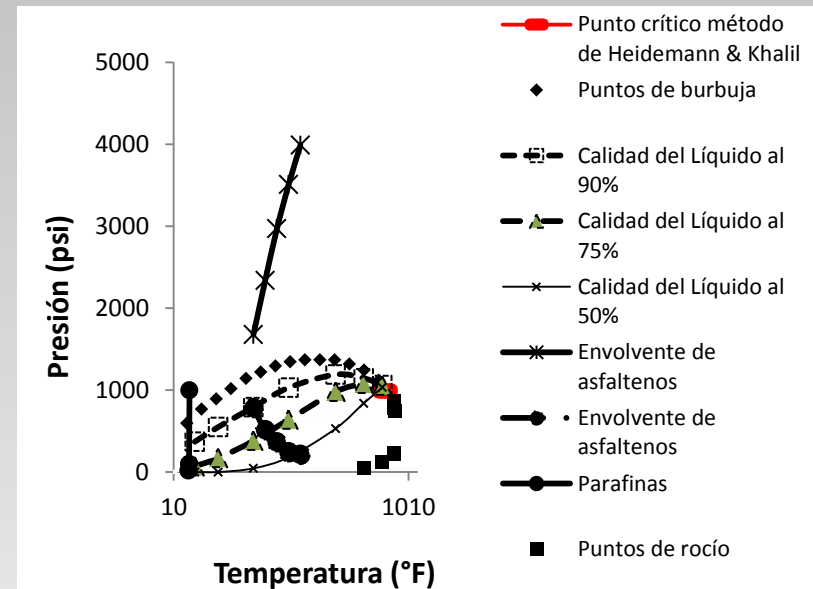
$$n_l x_i + n_w x_{wi} + n_v y_i = z_i \rightarrow \text{Ecuación 28.}$$

$$\sum_i^n x_i = \sum_i^n x_{wl} = \sum_i^n y_i = \sum_i^n z_i = 1 \rightarrow \text{Ecuación 29.}$$

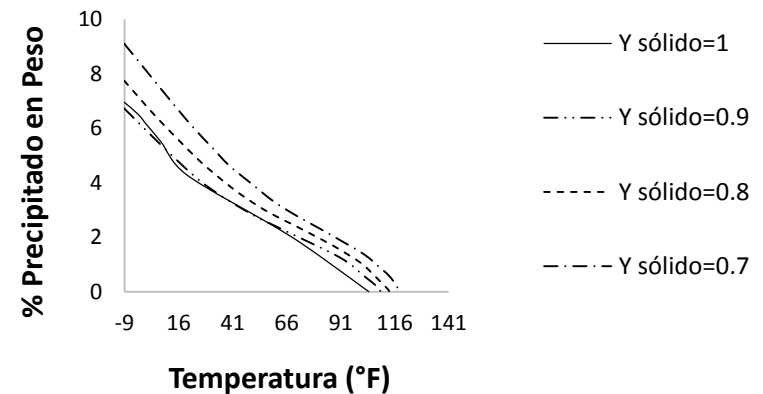
*Calculo de las constantes de equilibrio:*

$$k_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_i^l}{\phi_i^v} \rightarrow \text{Ecuación 30.}$$

$$k_{wi} = \frac{x_i}{x_{wi}} = \frac{\phi_i^s}{\phi_i^l} \rightarrow \text{Ecuación 31.}$$



**Figura 12:** Diagrama de fases, envolvente de parafinas y asfaltenos, punto crítico y líneas de calidad.



**Figura 13:** Sensibilidad del modelo termodinámico al coeficiente de actividad de la fase sólida.

# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

Información estimada con el modelo caso 1- Fluido Campo Colorado 25.

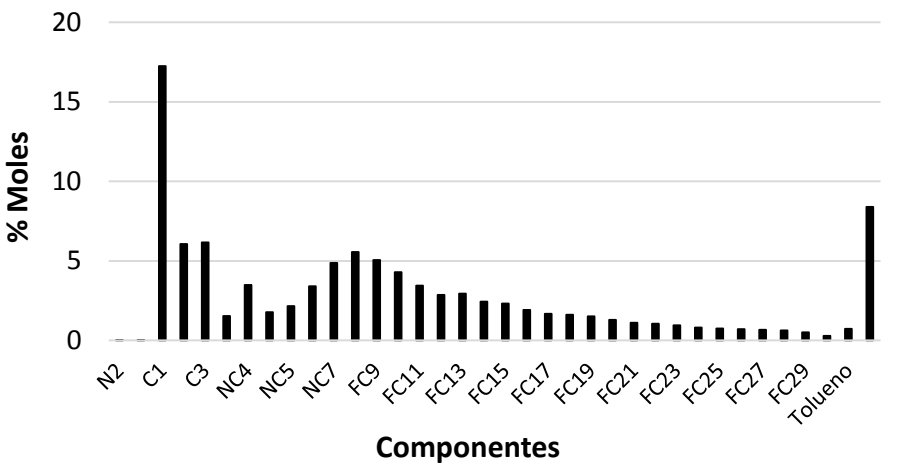


Figura 14: Fluido proveniente del Campo Colorado 25.

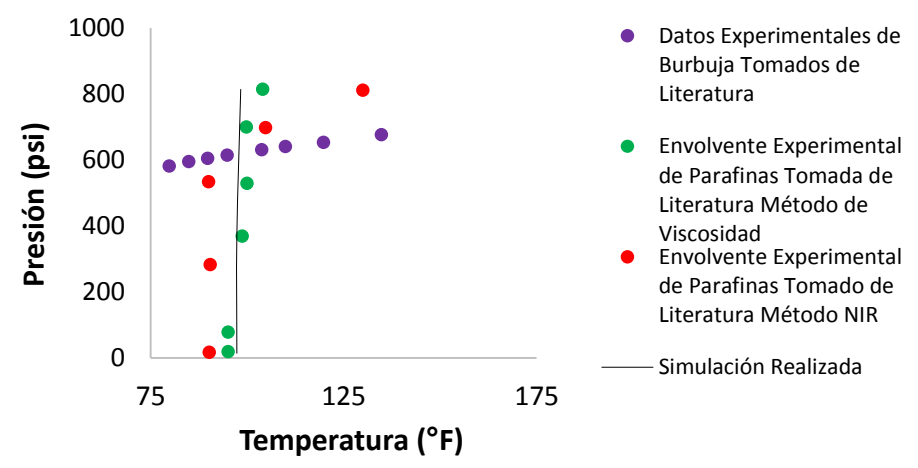


Figura 15: Comparación Métodos Experimentales y Simulado para el Fluido del Campo Colorado 25. (Los Datos Experimentales se Tomaron con Autorización del Autor. [8])

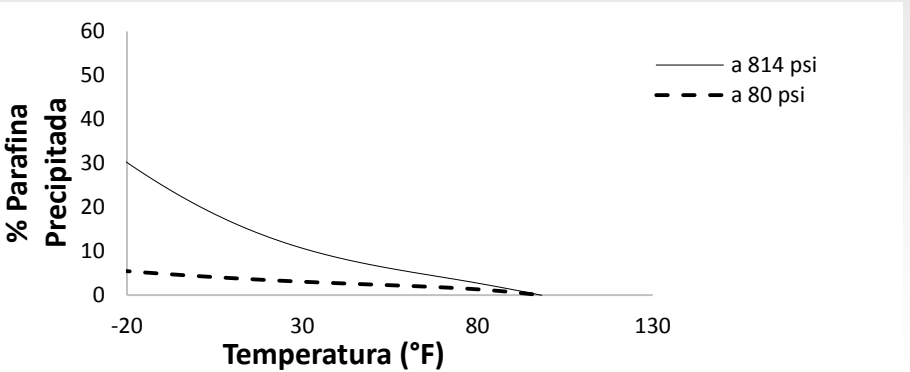


Figura 16: Simulación Termodinámica del Comportamiento de las Parafinas Precipitadas en Función de la Presión para el Campo Colorado 25.

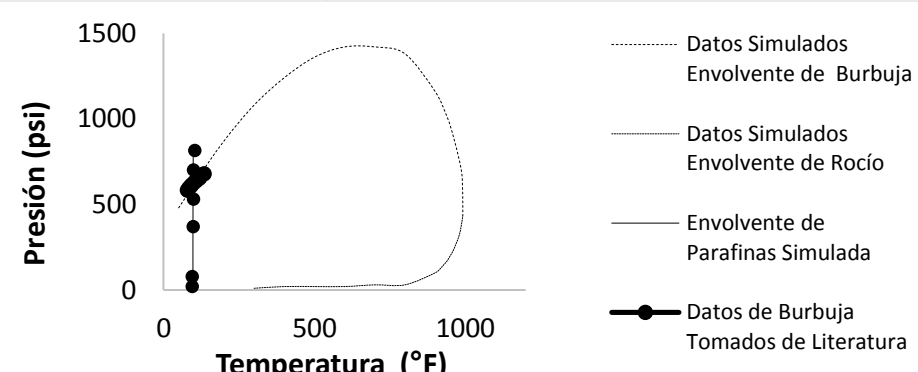


Figura 17: Simulación Termodinámica de Fases y Validación Envolvente de Parafinas Campo Colorado.

# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

Información estimada con el modelo caso 2-Fluido del Casanare.

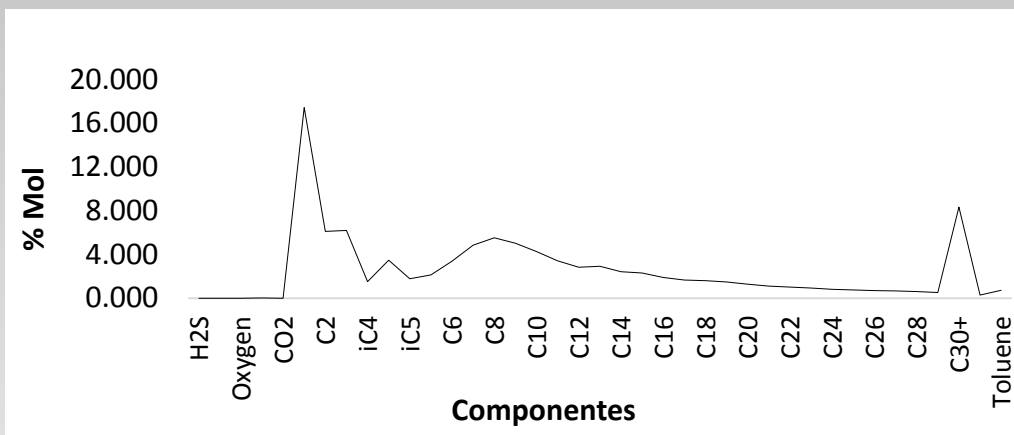


Figura 18: Fluido proveniente de Casanare, composición en porcentaje mol.

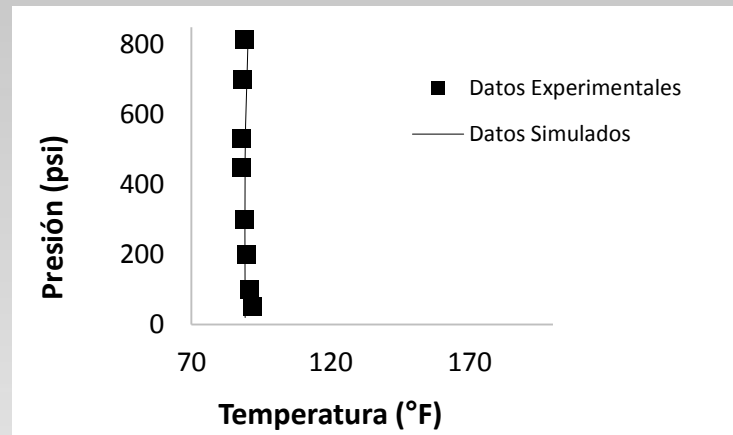


Figura 19: Envoltorio de Parafinas Simulada para el Fluido proveniente de Casanare.

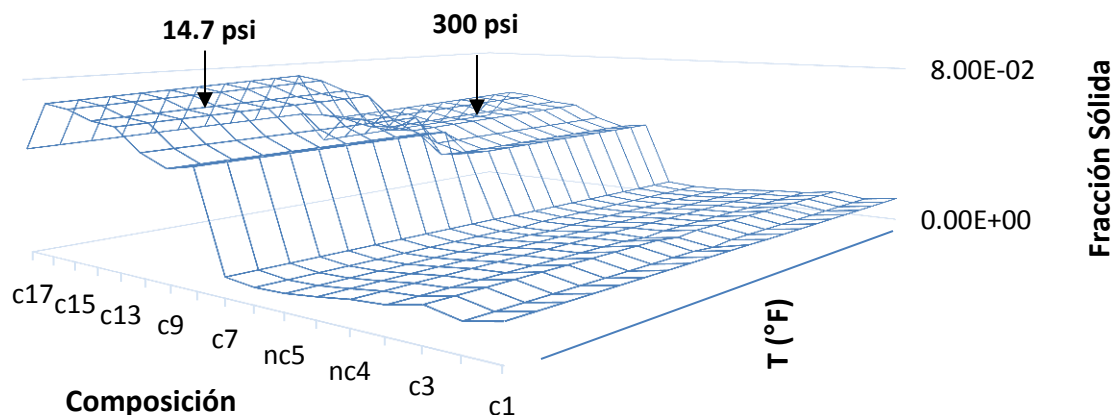


Figura 20: Simulación Realizada para Entender el Cambio con la Presión, Composición y Temperatura para el Fluido proveniente de Casanare.

# Daño por Parafinas | Introducción al Modelamiento

## -Referencias

- [1]. Banki R, Hoteit H, Firoozabadi A. Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy–porosity approach and irreversible thermodynamics. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2008;51(13-14):3387-3398.
- [2]. Lira-Galeana C, Hammami A. Wax Precipitation from petroleum fluids: a review. In: Yen TF, Chilingarian GV. *Asphaltenes and Asphalts, 2 Developments in Petroleum Science*, 40 B. 1 edition. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2000. Chapter 21;557-608.
- [3]. Hunt EB. Laboratory Study of Paraffin Deposition. *Journal of Petroleum Technology* 1962;14(11):1259-1269.
- [4]. Oyekunle L, Adeyanju O. Thermodynamic Prediction of Paraffin Wax Precipitation in Crude Oil Pipelines. *Petroleum Science and Technology*. 2011;29(2):208-217.
- [5]. Pedersen K, Christensen PL. Petroleum Reservoir. In: Pedersen K, Christensen PL. *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*. 1 edition. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group; 2007. Chapter 1; 1-11.
- [6]. Heidemann RA, Khalil AM. The Calculation of Critical Points. *AIChE Journal*. 1980;26(5):769–779.
- [7]. Taraf R, Behbahani R, Moshfeghian M. Direct Prediction of Cricondentherm and Cricondenbar Coordinates of Natural Gas Mixtures using Cubic Equation of State. *Int. J. Thermophys.* 2008;29(6):1954–1967.
- [8]. Ariza E, Calvete G, Zapata J. Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo en el Campo Colorado. (Tesis maestría). Bucaramanga. Colombia: Escuela de ingeniería de petróleos, Universidad industrial del Santander; 2008.

## *Datos de contacto*

*Juan David Patiño Mesa*

*Cel: 3207868629*  
*jpatiomesa@gmail.com*



Mesa Temática de Innovación y Tecnología

