

## Estudio y aplicación de un nuevo enfoque en el diagnóstico de avance de los acuíferos en YNF

*Anel Olmos Montoya*  
*Jesús Cruz Gutiérrez*  
*Ángel Carbajal Loredo*  
*Fernando Samaniego Verduzco*

Artículo recibido-evaluado-corrigido y aceptado en octubre de 2023

### Resumen

El estudio se refiere a la aplicación y un enfoque de una **metodología nueva propuesta para el diagnóstico y entendimiento, del comportamiento de entrada de agua en yacimientos naturalmente fracturados (YNF)**, integrando el análisis dinámico y el análisis estático de una muestra representativa de 44 pozos de un campo maduro altamente complejo. Históricamente los diagnósticos de avance de agua con cortes de estables se han documentado como “**avances normales del acuífero**”; sin embargo, se ha observado que este tipo de diagnóstico en YNF está mayormente relacionado con algún “**tipo de canalización**”. El diagnóstico adecuado contribuirá en la definición de **zonas del yacimiento en ventanas de aceite o zonas de flujo preferente al agua**. En los diagnósticos establecidos por (Chan, K.S. 1995), se analizaron pozos de Texas, California, la costa del Golfo y Alaska, aunque en su trabajo no se aclara si el estudio se realizó en yacimientos de una porosidad, uno de los diagnósticos establecidos en su trabajo como canalización multicapa abre la posibilidad de que en su trabajo se estudiaron este tipo de yacimientos. Los gráficos de (Chan, K.S. 1995), son ampliamente utilizados en el diagnóstico de entrada de agua, no obstante; el diagnóstico en YNF requiere que los especialistas consideren la metodología complementaria propuesta, para establecer diagnósticos de avance de agua más certeros.

**Palabras clave:** Canalización, canalización estable, conificación, yacimientos naturalmente fracturados, acuíferos, diagnóstico, avance de agua.

### Study and application of a new approach in the diagnosis of the advance of aquifers in YNF

### Abstract

The study refers to the application and approach of a proposed new methodology for the diagnosis and understanding of the behavior of water inflow in naturally fractured reservoirs (YNF), integrating the dynamic analysis and static analysis of a representative sample of 44 wells of a highly complex mature field. Historically, diagnoses of water advance with stable outages have been documented as “normal aquifer advances”; however; it has been observed that this type of diagnosis in YNF is mostly related to some type of channeling. Proper diagnosis will contribute to the definition of reservoir zones in oil windows or areas of preferential flow to water. In the diagnoses established by (Chan, K.S. 1995), wells from Texas, California, the Gulf Coast and Alaska were analyzed, although in his work it is not clear whether the study was carried out in reservoirs of one porosity, one of the diagnoses defined as multilayer channeling makes a greater reference to this type of deposits. (Chan, K.S. 1995), charts are widely used in water advance diagnostics, however; the

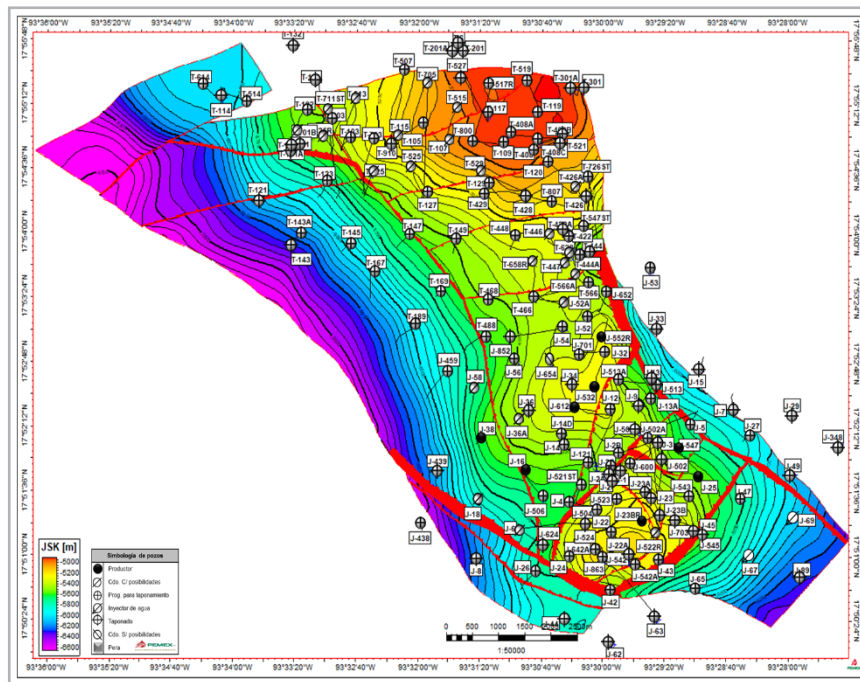
diagnosis in the YNF of the present study requires that specialists consider the proposed complementary methodology, in order to establish more accurate water flow diagnoses that contribute to decision-making, to decide the technical feasibility of performing incremental physical activity in the wells.

**Keywords:** Channeling, stable channeling, conification, naturally fractured reservoirs, aquifers, diagnostics, water advance.

## Introducción

El caso de estudio es un campo del sureste mexicano denominado Jade-Topacio, el cual para facilitar su estudio se divide en dos zonas, zona norte y zona sur, el cual produce

aceite ligero en etapa de saturación, cuenta con más de 40 años de explotación, una extensión de 74 [km<sup>2</sup>] y 169 pozos perforados. Está comprendido por un anticlinal cortado por sistemas de fallas normales e inversas, que delimitan la zona en bloques hidráulicamente conectados, **Figura 1**.



**Figura 1.** Configuración estructural a nivel de JSK del campo Jade-Topacio.

El campo Jade-Topacio se ha clasificado como YNF tipo II de acuerdo con la clasificación (R.A. Nelson, 2001), donde la matriz provee esencialmente la porosidad y las fracturas la permeabilidad, los pozos perforados han sido productores principalmente en la formación Jurásico Superior Kimmeridgiano y cuenta con espesores que van desde 700-1,000 (m).

En la **Figura 2**, es posible apreciar el atributo Ant Tracking aplicado a la configuración estructural a nivel de Jurásico

Superior Kimmeridgiano (JSK), observándose que las anomalías inferidas por medio de este atributo están relacionadas a fallas, o corredores de fracturas que no son perceptibles en los volúmenes de amplitud. Las anomalías de Ant-Tracking que se muestran, son extracciones sobre la superficie con ventana de 150 m a nivel de (JSK). Es posible apreciar que los corredores o fallas tienden a alinearse a lo largo de un azimuth preferencial (NE-SW), las cuales incrementan su densidad en presencia de fallamientos y/o plegamientos. La permeabilidad está

controlada principalmente por el grado de fracturamiento, debido los esfuerzos durante los procesos de fallamiento, sepultamiento y erosión. El campo Jade-Topacio muestra

una estructura con buena comunicación, principalmente en la zona central debido a la presencia de alta densidad de fracturamiento.

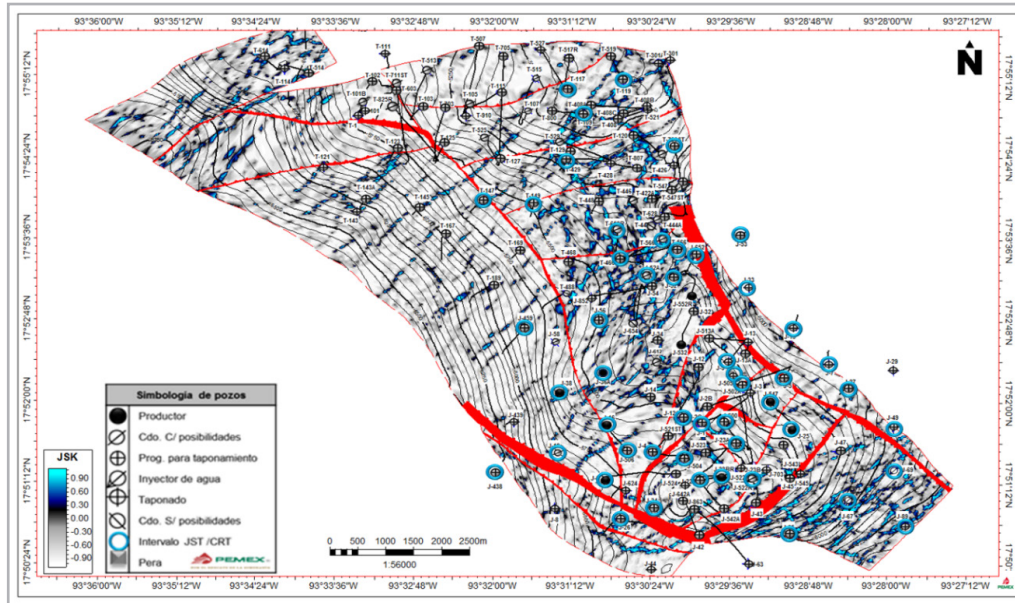


Figura 2. Atributo Ant-Tracking sobre la superficie con ventana a 150 m (JSK).

## Antecedentes

El campo Jade-Topacio ha acumulado en total 1,198 MMb de aceite y 65 MMb de agua, de los 169 pozos perforados, 120 presentan evidencia documental de manifestación de

agua. De acuerdo con los gráficos de producción acumulada de agua en la **zona norte** del campo, 54 pozos incorporaron producción de agua; en la **Figura 3** se observa que sólo 14 de los 54 pozos acumularon un volumen de agua mayor a 0.6 MMb, Figura 3.

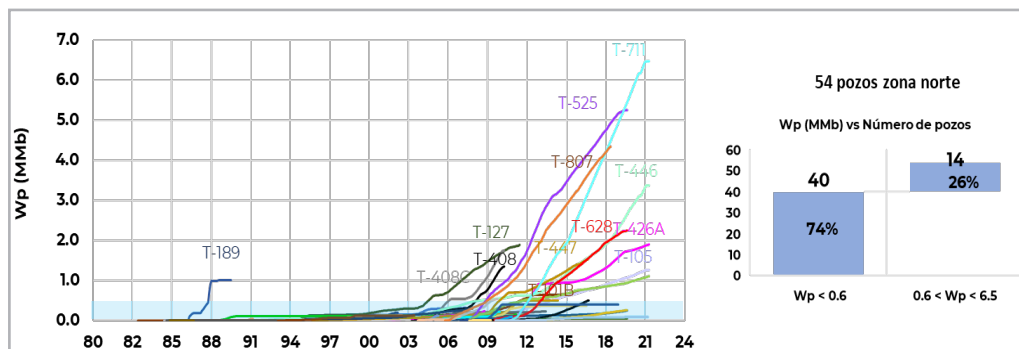
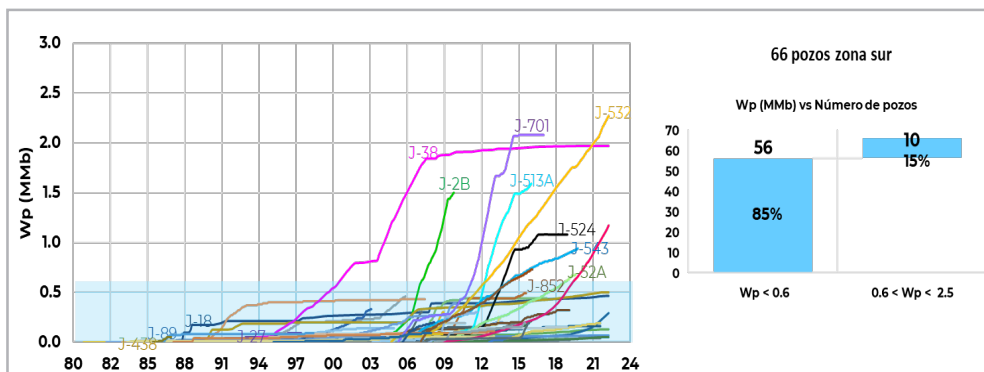


Figura 3. Wp (MMb) pozos ubicados en la zona norte del campo.

Por otro lado, los pozos ubicados al sur de la estructura manifiestan una problemática similar, **Figura 4**, de los 66 pozos que manifestaron irrupción de agua 56 pozos alcanzaron valores de  $(W_p) < 0.6$  MMb. El que un gran número de pozos hayan obtenido tan poca acumulada de agua es indicativo de la incapacidad de los pozos de

continuar incorporando producción al quedar cerrados por alguna problemática relacionada con la irrupción prematura de agua. Es importante mencionar que en la mayoría de estos pozos ya se realizaron cambios de intervalo.



**Figura 4.** Wp (MMb) para los pozos ubicados en zona sur del campo

En 2005 inició el proyecto de implementación de SAP coincidiendo con una mayor manifestación del incremento en el corte de agua. De acuerdo con lo anterior, una de las problemáticas principales del campo en estudio, está relacionada con la presencia irregular de agua en los pozos perforados, que hasta hoy continúa siendo un reto de gran envergadura para los especialistas, que buscan mejorar la productividad de los pozos y continuar con la extracción de reservas. Comprender de una manera mejor lo que ocurre con el comportamiento de los fluidos en el yacimiento conducirá a discretizar zonas con potencial de reactivación, con ello se busca que los recursos económicos puedan enfocarse en actividades sustanciales.

## Base teórica

### Clasificación de los mecanismos de producción de agua:

De acuerdo con Ahmed (2009), existen tres fuerzas esenciales que pueden afectar la distribución de fluidos alrededor de los pozos:

- Fuerzas capilares
- Fuerzas gravitacionales
- Fuerzas viscosas

En un sistema fracturado las fuerzas capilares generalmente tienen un efecto insignificante y se consideran despreciables, aunque en la matriz se considera que están presentes. Las fuerzas de gravedad se dirigen en la dirección vertical y surgen de las diferencias de densidad de los fluidos. El término fuerzas viscosas se refiere a la resistencia al flujo de un fluido a fluir; es decir, los fluidos de mayor viscosidad presentarán mayor resistencia al flujo.

La velocidad con la que un fluido se moverá ha sido descrita por (Darcy 1856), e indica que la velocidad del fluido en el medio poroso para flujo horizontal es proporcional al gradiente de la presión e inversamente proporcional a la viscosidad; para un sistema lineal, la relación es la siguiente:

$$Q = -\frac{KA}{\mu} \frac{dp}{dl}$$

Donde:

- Q: gasto ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ )
- A: área sección transversal ( $\text{cm}^2$ )
- $\mu$ : viscosidad (cp)
- k: permeabilidad de la roca (Darcy)
- $\frac{dp}{dl}$ : gradiente de presión (atm/cm)

Considerando los fundamentos de la Ley de Darcy, en cualquier momento dado, hay un equilibrio entre las fuerzas

gravitacionales y viscosas, en puntos dentro y fuera del intervalo productor del pozo. Cuando las fuerzas dinámicas (viscosas) en el pozo exceden las fuerzas gravitacionales, el agua irrumpe en el pozo y puede manifestarse de las formas siguientes:

**Conificación:** (Ahmed, 2009). Define a la conificación como el resultado principal del movimiento de los fluidos del yacimiento en la dirección de la menor resistencia, equilibrado por una tendencia de los fluidos a mantener el equilibrio de la gravedad.

Producir pozos genera gradientes de presión que mantienen al gas arriba de la zona de aceite debido a su menor densidad, mientras que el agua permanece por debajo de la zona de aceite por su mayor densidad. Si el pozo se produce a un gasto constante y los gradientes de presión en el sistema de drene se vuelven constantes, se alcanza una condición de estado estable, si las fuerzas viscosas son menores a las gravitacionales entonces el cono que se forma no se presentará en el pozo. Podría tratarse entonces de una conificación estable, por otro lado; si la caída de presión en el sistema es inestable producirá que se manifieste la irrupción del cono. Es importante notar que en un sentido realista la conificación estable puede ser pseudoestable, debido a que la distribución de presión en el área de drene generalmente cambia.

**Canalización:** (Anel, 2023) Son irrupciones prematuras de agua y/o gas, como resultado del movimiento de fluidos del yacimiento hacia las zonas de menor presión, las cuales se deben a las caídas de presión ocasionadas por los pozos al momento de entrar a producción. **De acuerdo con la experiencia en el estudio de YNF**, estas canalizaciones pueden presentarse de manera acelerada, moderada o estable; la presencia de esta última es de suma relevancia a la hora de establecer un diagnóstico, ya que suelen diagnosticarse como conificaciones o avances normales del acuífero.

**Canalización estable:** (Ahmed, 2009). Se dice que, si un pozo produce con una caída de presión constante, su flujo es estacionario. Por lo que se alcanza un equilibrio en el sistema; cuando las caídas de presión en el sistema de drene se mantienen estables se puede presentar la irrupción controlada del influjo de agua, permitiendo al pozo continuar con su operación.

El fenómeno de canalización estable en YNF suele correlacionarse con fenómenos de conificación, debido a que los pozos pueden ser sensibles a variaciones del diámetro del estrangulador, presentando periodos largos

de estabilidad del corte de agua muestreado. No obstante; en el estudio presente se podrá identificar de qué forma se presenta este fenómeno en YNF.

## Metodología

- 1) Identificar el tipo de YNF de acuerdo con la clasificación de (R.A. Nelson, 2001).
- 2) Extraer del Proyecto OFM o base de datos las variables,  $Q_o$  medido ( $B_d$ ) vs  $F_w$  laboratorio (%).
- 3) Con los gráficos de  $Q_o$  vs  $F_w$  (%) calcular las pendientes matemáticas (" $m$ " tiempo/% $F_w$ ) de cada una de las tendencias de irrupción de agua, (matemáticamente, la pendiente se calcula como el desplazamiento vertical entre el desplazamiento horizontal). Previamente se descartan altos cortes de agua por eventos como tratamientos, que no corresponden con muestras representativas del acuífero; se recomienda validar cada una de las tendencias con el comportamiento de la salinidad, al método a aplicar se denominará como "**Método de la pendiente**".
- 4) Una vez aplicado el método, se deben agrupar los pozos por patrones de comportamiento y clasificar las gráficas por fecha de irrupción.
- 5) Documentar el valor de cada una de las pendientes de los pozos en estudio, se establece un rango de valores de " $m$ " mínimos y máximos de acuerdo con los patrones identificados.
- 6) Generación de la "**Gráfica especializada de corte de agua inicial y patrones de comportamiento**" que correlaciona patrones de comportamiento, fecha inicial de incremento en  $F_w$  (%) >5% de la tendencia inicial de irrupción de agua vs las profundidades del intervalo de fondo en ( $m_{vbnm}$ ).
- 7) Realizar la gráfica de la distribución de frecuencia de patrones de comportamiento identificados.
- 8) Generar un mapa de atributo Ant-tracking con la identificación de patrones de comportamiento.

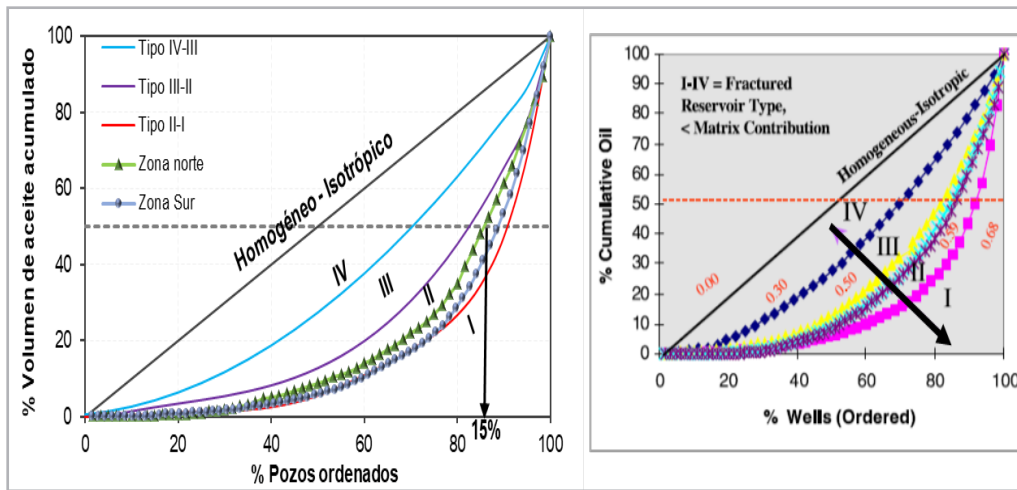
## Aplicación

Clasificación (R.A. Nelson, 2001): Se considera que los pozos en un yacimiento homogéneo contribuyen de igual manera a la producción acumulada; gráficamente este planteamiento se representa como una línea de 45°; mientras más se

aleje hacia la derecha, **Figura 5**; se irá pareciendo a los yacimientos tipo I, es decir; que la influencia de las fracturas será cada vez mayor.

- Tipo I: 5%-15% de pozos dan el 50% de reservas
- Tipo II: 15%-25% de pozos
- Tipo III y IV: 25%-40% de pozos

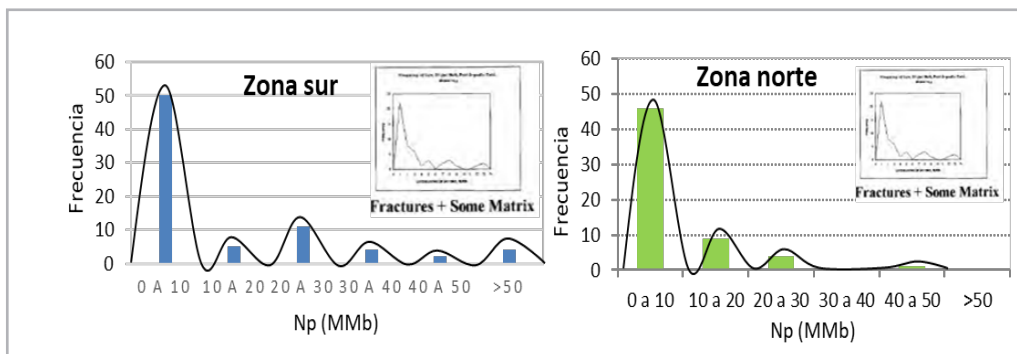
En YNF, 50% de las reservas provienen de un pequeño % de pozos perforados y varía con el tipo de yacimiento. Indicador "FIC" Fracture Impact Coefficient: 0-1 (Homog-Heterog).



**Figura 5.** Gráfico %Acumulado de aceite vs % pozos perforados.

El campo Jade-Topacio, observado globalmente, muestra un comportamiento más aproximado al tipo II, donde la matriz provee esencialmente la porosidad y las fracturas la permeabilidad. De acuerdo con la **Figura 6**, la zona sur cuenta con mayor número de pozos con producciones acumulativas de aceite altas en comparación con la zona norte, el coeficiente de heterogeneidad FIC para la zona sur es de 0.612, mientras que para la zona norte el

coeficiente FIC es de 0.548, demostrando que la calidad de roca es mejor en la zona sur debido a una mayor influencia de las fracturas, las oportunidades de ejecutar cambios de intervalo hacia la zona norte son limitadas por presentar baja calidad de roca en Tithoniano y Cretácico, ya que son formaciones que históricamente no han manifestado producción de hidrocarburos.



**Figura 6.** Gráficos de frecuencia vs NP (MMb).

**Grupo 1. Canalización acelerada del acuífero**

Se aplicó la metodología propuesta en una muestra representativa de 44 historias de pozos, que manifestaron producción de agua significativa en el campo. A continuación, se presentan los grupos de comportamiento identificados:

De acuerdo con el análisis de la muestra de 44 historias se identificaron 26 pozos con pendientes características que oscilan en el rango de valores de “*m*” (Fw%/días) **mínimo de 0.03 y un máximo de 1.73 que muestran una tendencia a invadirse en un tiempo menor a 3 años**, en la **Tabla 1**, se muestran los pozos identificados dentro de este grupo.

Canalización acelerada del acuífero			
# Muestra	Pozo	Fecha inicial de incremento de Fw (%)	Base del intervalo más profundo (mvbnm)
1	T-468	16/06/1992	5795
2	J-27	23/02/1994	6082
3	J-47	03/10/1995	5974
4	T-466	30/03/1996	5987
5	J-25	02/12/2001	5823
6	J-9	05/12/2001	5778
7	T-428	22/06/2002	5212
8	J-3	11/11/2002	5668
9	J-13A	10/05/2003	5626
10	J-54	23/06/2003	5884
11	J-52	26/07/2005	6077
12	T-408	16/09/2005	5562
13	T-408C	01/01/2006	5514
14	J-23A	13/06/2006	5485
15	T-517R	30/09/2006	5261
16	T-422A	23/02/2007	5793
17	J-12	08/01/2009	5412
18	J-44	01/02/2009	5474
19	J-42	01/02/2009	5729
20	J-863	30/07/2009	5343
21	T-447	30/11/2009	6109
22	J-513A	01/02/2010	5988
23	J-32	21/06/2010	5438
24	J-701	10/08/2010	5577
25	J-34	01/01/2012	5557
26	T-547	31/12/2013	5593

**Tabla 1.** Pozos del grupo 1.

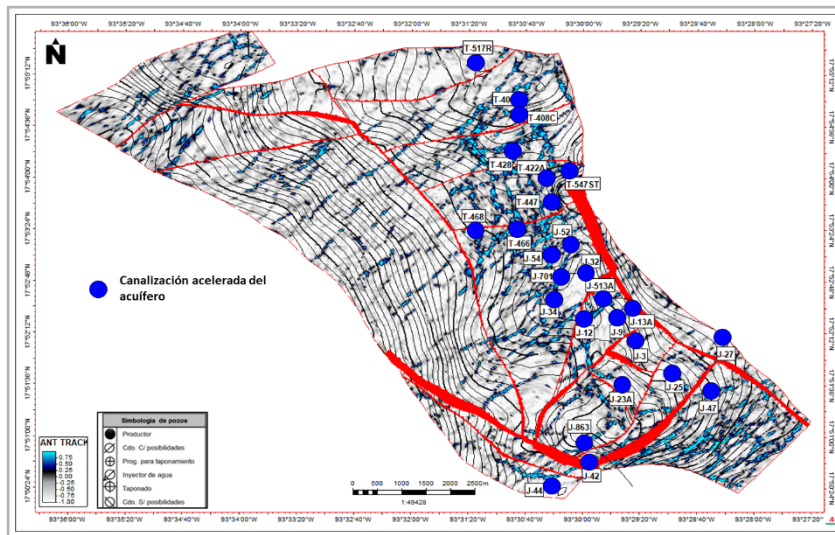


Figura 7. Mapa Ant-tracking con pozos del grupo 1.

De acuerdo con lo anterior, si se toma un pozo de este grupo, por ejemplo, J-3, se aplica el método de la pendiente, y a su vez se aplica el gráfico de diagnóstico de (Chan, K.S.

1995), se aprecia que ambos diagnósticos mantienen una correspondencia en la definición de la problemática, ver Figuras 8 y 9.

Pozo	Tiempo de tendencia de invasión	Valor de "m"
J-3	1 año	0.14

Tabla 2. Características J-3.

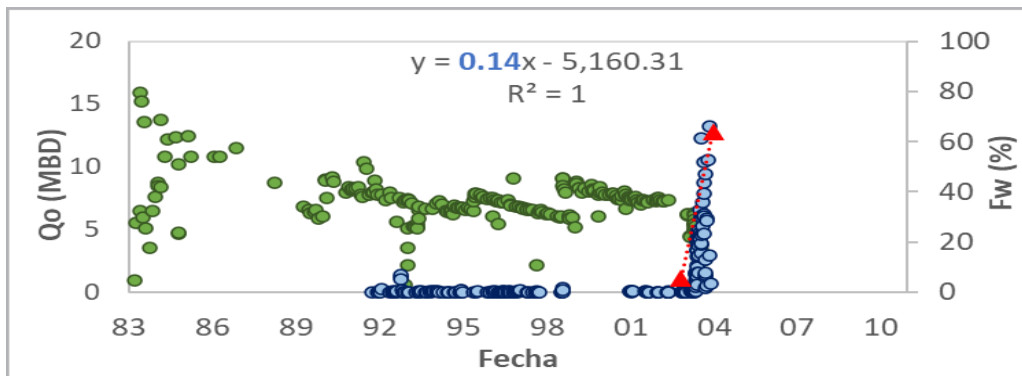


Figura 8. Método de la pendiente J-3, "Canalización acelerada".



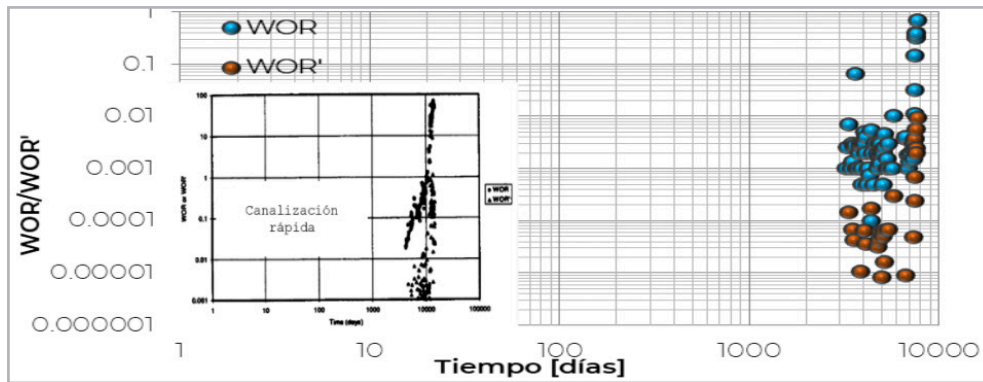


Figura 9. Diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), J-3, “Canalización rápida”.

**Grupo 2. Canalización moderada del acuífero**

De acuerdo con el análisis de las 44 historias, se identificaron 4 pozos con pendientes características que oscilan en el

rango de valores de “*m*” (Fw%/días) mínimo de 0.003 y un máximo de 0.27 que muestran una tendencia a invadirse en un tiempo mayor a 3 años, en la Tabla 3, se muestran los pozos identificados dentro de este grupo.

Canalización moderada del acuífero			
# Muestra	Pozo	Fecha inicial de incremento de Fw (%)	Base del intervalo más profundo (mvsbm)
1	J-38	26/03/1994	5792
2	T-448	16/10/1995	5525
3	T-446	10/01/2003	5871
4	J-23BR	21/06/2019	5289

Tabla 3. Pozos del grupo 2.

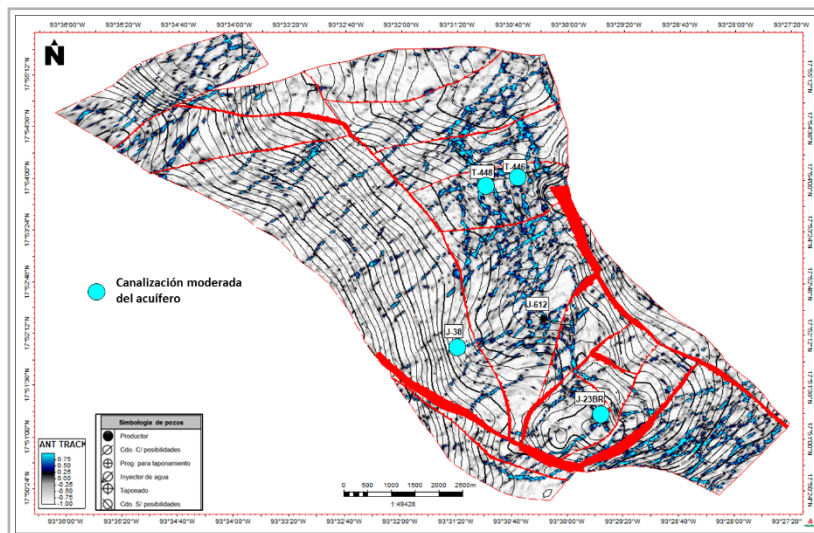


Figura 10. Mapa Ant-tracking con pozos del grupo 2.

Si por ejemplo, al pozo J-23BR, se le aplica el método de la pendiente, y a su vez se le aplica el gráfico de diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), se le aprecia que ambos diagnósticos mantienen una correspondencia en la definición de la problemática de tipo canalización, es decir; con el **método de la pendiente** se define la problemática como

**“canalización moderada del acuífero”**, mientras que utilizando el diagnóstico por (Chan, K.S. 1995), se define como **“canalización multicapa”**. Debido a que este pozo opera únicamente en la formación JSK, se considera que el diagnóstico adecuado para definir la problemática es como se indicó, utilizando el método de la pendiente.

Pozo	Tiempo de tendencia de invasión	Valor de “m”
J-23BR	4 años	0.027

Tabla 4. Características J-23BR.

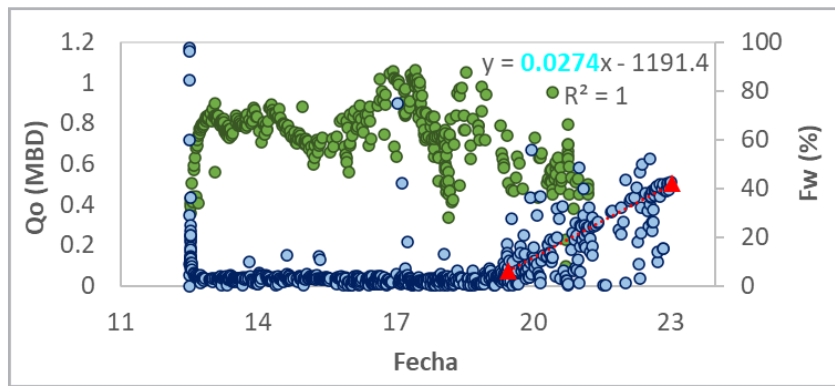


Figura 11. Método de la pendiente J-23BR, “Canalización moderada del acuífero”.

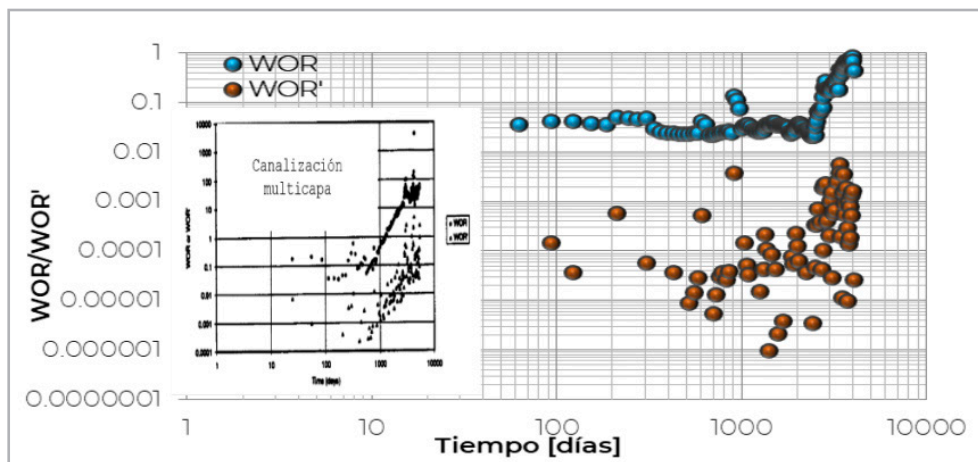


Figura 12. Diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), J-23BR, “Canalización multicapa”.

### Grupo 3. Canalización estable

De acuerdo con el análisis de las 44 historias se identificaron 12 pozos, que contienen dos tendencias de incremento de corte de agua; generalmente suelen iniciar con una tendencia de canalización acelerada o moderada del acuífero; posteriormente, el comportamiento del corte de agua cambia y toma una **tendencia estabilizada, con un incremento gradual.**

-Valor de “m” (Fw%/días) de la tendencia estabilizada se encuentra entre un valor mínimo de **0.0018** y un máximo de **0.02**.

-Tiempo de producción de los pozos **mayor a 5 años** posterior al cambio de pendiente, en la **Tabla 5**, se muestran los pozos identificados dentro de este grupo.

Canalización estable			
# Muestra	Pozo	Fecha inicial de incremento de Fw (%)	Base del intervalo más profundo (mvsbm)
1	T-127	01/07/1995	5692
2	T-519	08/03/2007	5228
3	J-532	04/02/2008	5667
4	T-525	01/02/2009	5372
5	T-101B	01/03/2010	5860
6	T-105	01/03/2010	5444
7	T-807	05/11/2010	5664
8	T-426A	01/01/2011	5390
9	T-711	20/08/2011	5735
10	T-628	24/05/2012	5461
11	J-52A	27/01/2014	5461
12	J-522R	22/01/2019	5265

Tabla 5. Pozos del grupo 3.

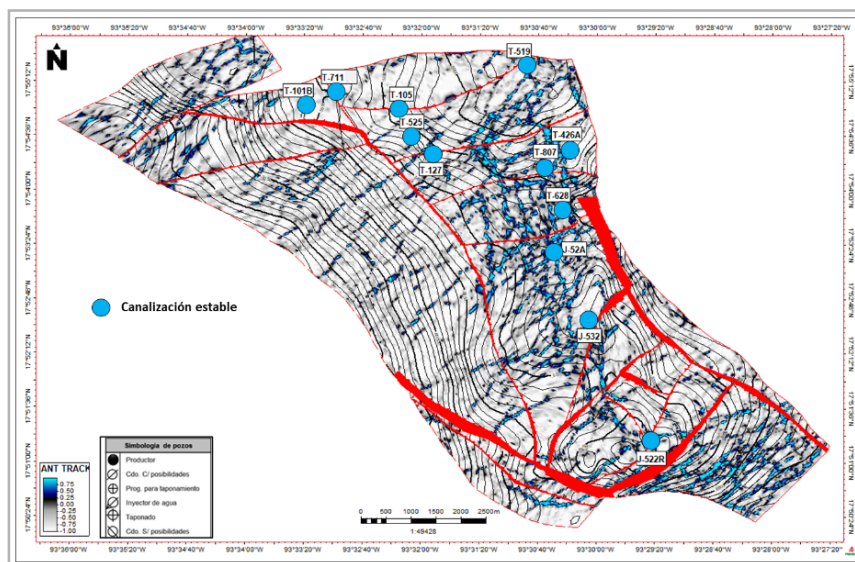


Figura 13. Mapa Ant-tracking con pozos del grupo 3.

Si se toma de ejemplo al pozo T-105, se aplica el método de la pendiente, y a su vez se aplica el gráfico de diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), **Figuras 14 y 15**, se encontrará que la problemática presente de acuerdo con el **método de la pendiente** es de tipo **“Canalización estable”**, por otro lado; en este caso comienza la complejidad al utilizar los gráficos de (Chan, K.S. 1995), y encontrar el diagnóstico más aproximado a los datos graficados, ya que no es muy clara la interpretación. Por (Chan, K.S. 1995); es posible definirlo

como **“Avance normal del acuífero con alta relación agua-aceite”**, no obstante; este pozo opera únicamente en la formación JSK cuya base del intervalo más profundo se encuentra a una profundidad de 5,444 mvbnm, esto es, una diferencia en profundidad relevante con otros pozos del grupo 3 que se encuentran operando en zonas del yacimiento más profundas, por lo que llama la atención que pueda ser diagnosticado como avance normal del acuífero.

Pozo	Tiempo de tendencia de invasión posterior al cambio de pendiente	Valor de “m” (Fw%/días)
T-105	6 años	0.002

Tabla 6. Características T-105.

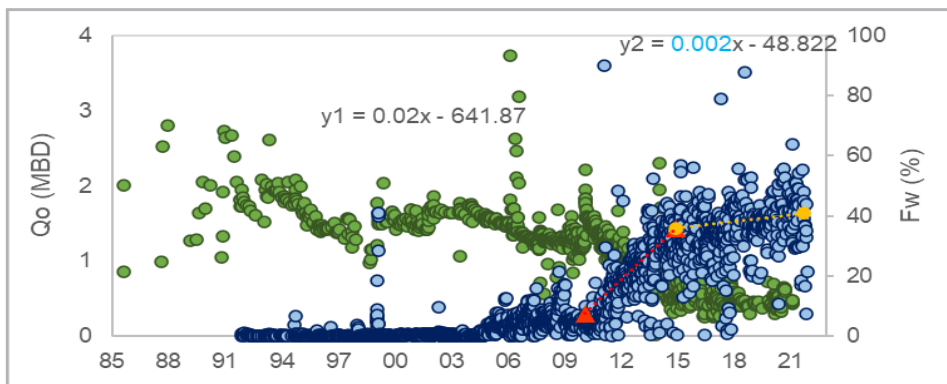


Figura 14. Método de la pendiente T-105, “Canalización estable”.

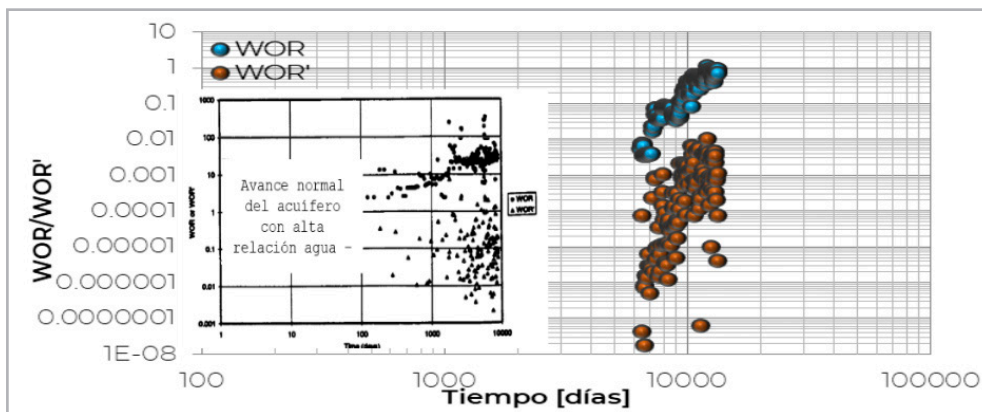


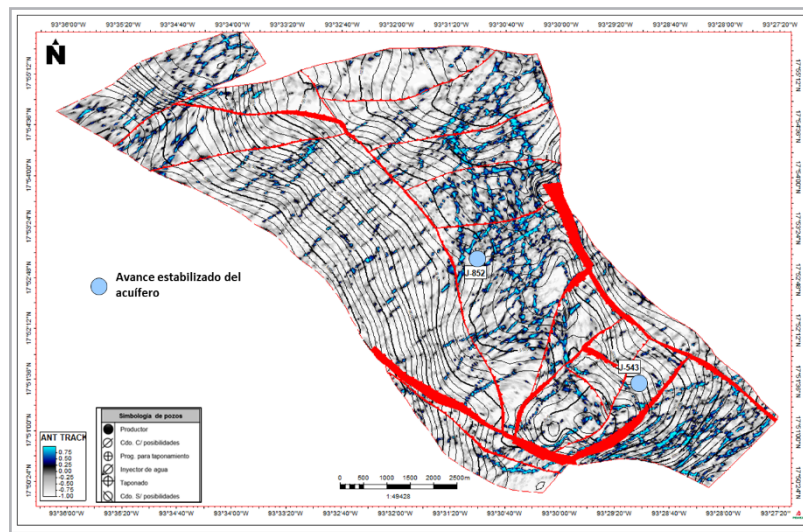
Figura 15. Diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), T-105, “Avance normal del acuífero con alta relación agua-aceite.”

#### Grupo 4. Avance estabilizado del acuífero

De acuerdo con el análisis de las 44 historias, se identificaron 2 pozos con pendientes características que oscilan en el rango de valores de “m” (Fw%/días) mínimo de 0.0011 y un máximo de 0.0046 que muestran una tendencia a invadirse en un tiempo mayor a 7 años, en la **Tabla 7**, se muestran los pozos identificados dentro de este grupo:

Avance estabilizado del acuífero			
# Muestra	Pozo	Fecha inicial de incremento de Fw (%)	Base del intervalo más profundo (mvbnm)
1	J-543	07/09/2007	5634
2	J-852	31/03/2008	5683

**Tabla 7.** Pozos del grupo 4.



**Figura 16.** Mapa Ant-tracking con pozos del grupo 4.

Si se toma un pozo de este grupo, por ejemplo, J-543, se aplica el método de la pendiente, y a su vez se aplica el gráfico de diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), **Figuras 17 y 18**, se encontrará que la problemática presente de acuerdo con el **método de la pendiente** es definido como “**Avance estabilizado del acuífero**”, por otro lado; al utilizar los

gráficos de (Chan, K.S. 1995), al encontrar el diagnóstico más aproximado a los datos graficados; es posible definirlo como “Avance normal del acuífero con alta relación agua-aceite”, no obstante, el pozo mantiene una baja relación agua-aceite, ya que sus cortes de agua son menores al 30%, por lo que llama la atención dicho diagnóstico.

Pozo	Tiempo de producción posterior al incremento de corte de agua	Valor de "m"
J-543	12 años	0.0011

Tabla 8. Características J-543.

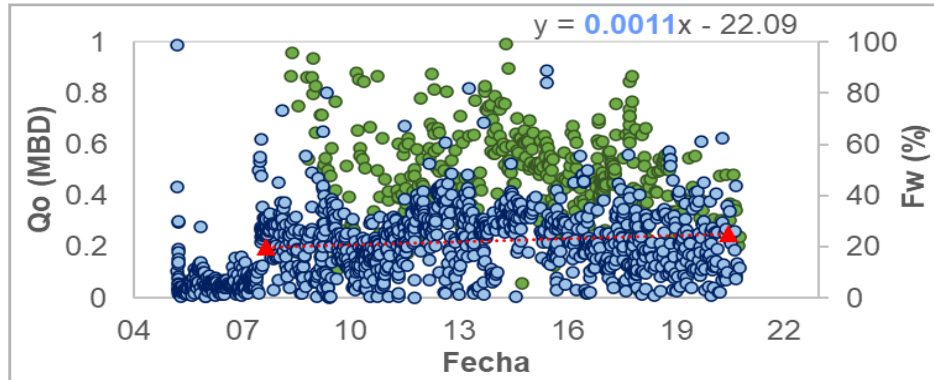


Figura 17. Método de la pendiente J-543, "Avance estabilizado del acuífero".

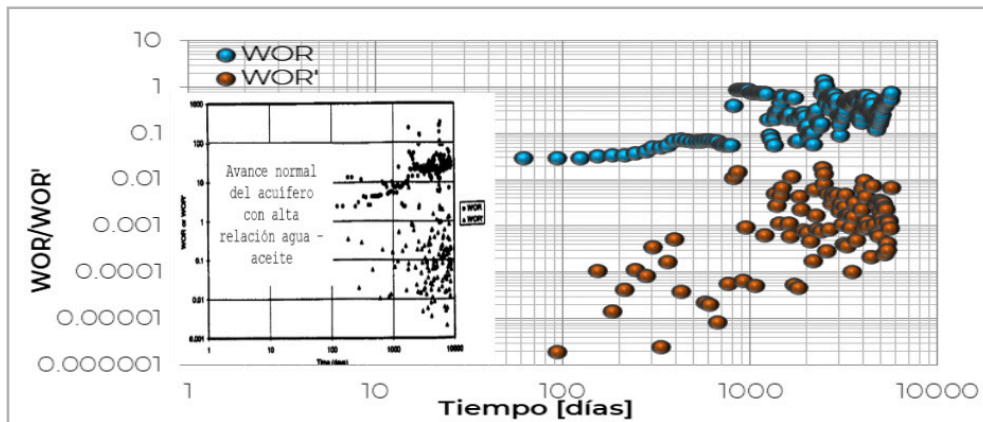


Figura 18. Diagnóstico de (Chan, K.S. 1995), J-543 "Avance normal del acuífero con alta relación agua-aceite."

A continuación, en la **Tabla 9** se muestran las pendientes características encontradas de acuerdo con los grupos identificados; para realizar un diagnóstico certero es necesario considerar las observaciones particulares de

cada grupo, para establecer el diagnóstico final, ya que en algunos casos los valores "m" podrían estar dentro de dos grupos distintos.

Grupo	m (Fw%/días)		Tiempo de invasión	Observaciones
	Mínimo	Máximo		
Canalización acelerada del acuífero	0.03	1.73	Menor a 3 años	Irrupción acelerada del agua
Canalización moderada del acuífero	0.003	0.027	Mayor de 3 años	Los pozos pueden continuar operando en un t>3 años desde que se presentó la irrupción
Canalización de agua estable	0.0018	0.02	Mayor a 5 años posterior al cambio de tendencia	Presencia de dos tendencias de irrupción de agua, la primera puede ser acelerada o gradual y la segunda tendencia es estabilizada, los valores de “m” están referidos a la tendencia estabilizada
Avance estabilizado del acuífero	0.0011	0.0046	Corte de agua estable por más de 7 años	Bajo corte de agua histórico

Tabla 9. Tabla de diagnóstico de patrones de comportamiento en YNF.

### Aplicación de la “gráfica especializada de corte de agua inicial y patrones de comportamiento”

De un análisis previo **Figura 19**, partir del modelo analítico generado y utilizando las curvas de volumen poroso del campo, se estimó un contacto agua-aceite a la profundidad

de 5,694 mvbnm. Debido a la heterogeneidad, extensión y ritmos de producción del campo, se sabe que definir un **contacto de fluidos homogéneo no sería lo más adecuado**; por lo que se recomienda tomar bajo reserva el contacto estimado. De acuerdo con esta estimación, debajo de esta profundidad se define la zona invadida de agua con un ritmo de invasión de +-21 metros por año.

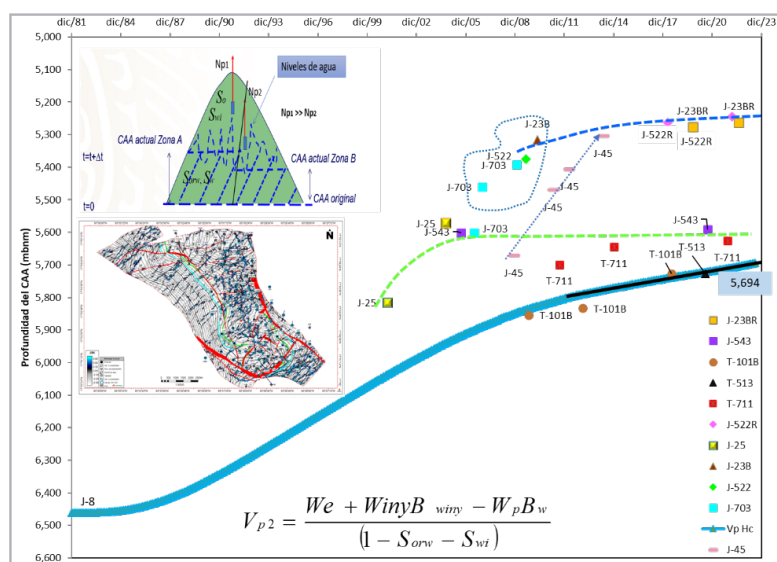


Figura 19. Avance del contacto agua-aceite utilizando un modelo analítico en el campo Jade-Topacio.

Por otro lado, en la **Figura 20**, al graficar la profundidad del intervalo más profundo de los 44 pozos en estudio versus la fecha inicial del incremento en el Fw (%) (agua procedente del acuífero, previamente validada, es decir; no considera incrementos de cortes de agua por limpiezas, estimulaciones, inducciones, etc, previamente se verifica que las tendencias a analizar presenten la salinidad del acuífero), se obtiene la **“Gráfica especializada de corte de agua inicial”** que permite observar la presencia irregular del acuífero. En dicha gráfica se puede observar que el grupo definido como **“Canalización estable”** se encuentra distribuido desde las profundidades más profundas 5,860 mvbnm hasta las más someras 5,265 mvbnm. **La irregularidad de la presencia de este patrón tanto en tiempo como en profundidad** es indicativo de que el nombre que se atribuye a **este patrón se refiere a un tipo de canalización y no así a un avance normal del contacto agua-aceite**; la razón fundamental de realizar este gráfico en las condiciones descritas es para ubicar el movimiento del agua desde su fecha inicial, descartando problemáticas de canalización atribuidas a condiciones mecánicas, sino más bien este diagnóstico se enfoca en el análisis del influjo de agua debido al sistema fracturado a condiciones iniciales de cada pozo dentro del yacimiento.

De acuerdo con el gráfico es posible establecer que en la década de los 90 se manifestó la presencia del acuífero en pozos profundos, presentándose en diferentes tipos de irrupción de agua, prevaleciendo el de tipo **“Canalización acelerada del acuífero” en rangos de profundidad entre (5,795-6,082 mvbnm)**, una mayor manifestación del acuífero inició a partir de 2000, donde se aprecia una mayor presencia de irrupciones de agua, el patrón de

mayor frecuencia sigue siendo el de canalización acelerada del acuífero que avista el movimiento del agua a lo largo de la estructura. Esto es indicativo de la alta comunicación vertical del medio fracturado. La zona de transición se ubica por encima de esta profundidad donde converge el mayor número de datos agrupados; en este estudio la zona de transición se ubicó en una ventana de 351 mvbnm. Si se pudiera establecer un **contacto agua-aceite promedio del gráfico especializado** es posible estimarlo en el recuadro verde central en la zona de transición con una profundidad estimada de **5,519 mvbnm**; esta profundidad se puede correlacionar con la presencia de un **gradiente de agua verificado por registro de resistividad** en el pozo J-543, a la profundidad **5,591 mvbnm** (no incluido en este trabajo por cuestión de espacio). En este estudio se revisaron los registros geofísicos de los últimos pozos perforados, identificándose solamente el gradiente de agua en el pozo J-543, ya que es uno de los pozos ubicados en la zona baja de la estructura, aunque se perforaron pozos a profundidades menores no se observaron gradientes de agua y aun así manifestaron agua; se infiere que la manifestación de agua en las zonas altas proviene de problemas de canalización debido al fracturamiento alto.

De acuerdo con lo anterior, el utilizar las técnicas propuestas permite a los especialistas comprender de una forma más aproximada las problemáticas de irrupción de agua presente en los pozos, identificándose la profundidad de la zona de transición donde se puede ubicar la ventana de aceite; adicionalmente se pueden correlacionar otras técnicas de estimación para el contacto agua-aceite y con ello establecer una caracterización de la problemática presente.



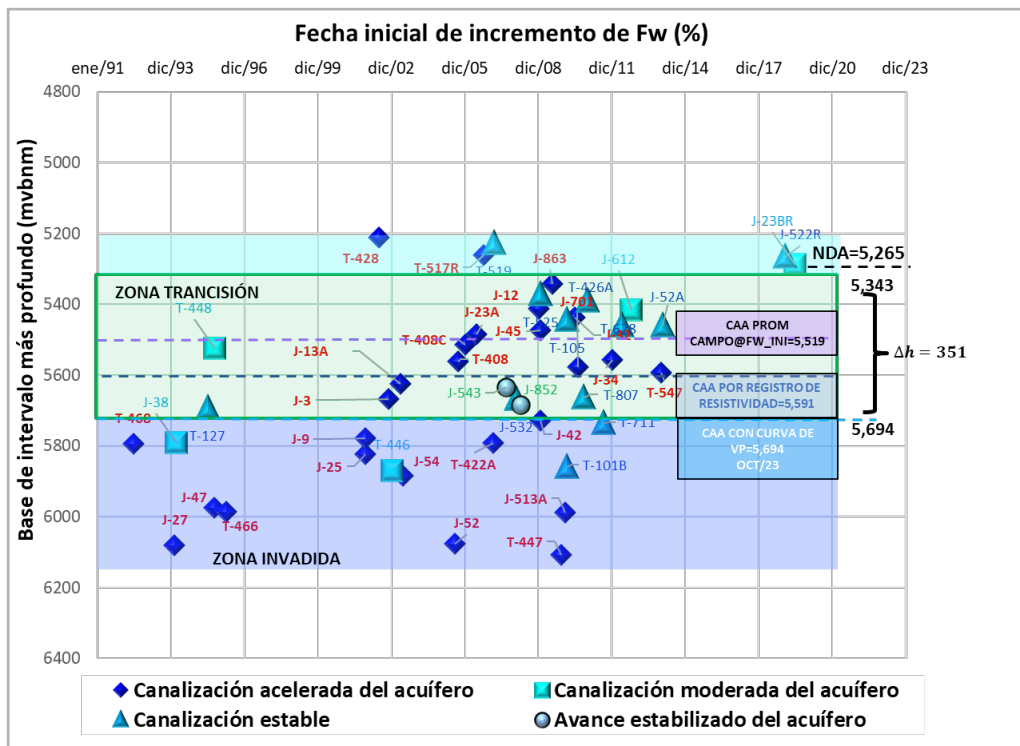


Figura 20. Gráfica especializada de corte de agua inicial y patrones de comportamiento.

Es importante resaltar que existen dos pozos que se incorporaron a producción recientemente, J-23BR y J-522R, si se utilizan como ejemplo al J-522R, **Figura 21**, este pozo comenzó con la manifestación de agua a partir de 2018, cuya entrada de agua se ha estimado a una profundidad de +5,265 mvbnm, evidenciando un “Nivel de Agua Actual (NDA) a dicha profundidad. De acuerdo con la Figura 16, es posible observar que el pozo J-522R manifiesta la presencia de un corte de agua bajo y estable, dicho pozo está localizado a una distancia de 953 m del pozo J-543 en relación a la cima del JSK, J-543 se **diagnosticó como**

**avance estabilizado del acuífero** y tiene un CAA estimado por registro de resistividad a 5,591 mvbnm, no obstante; el pozo J-522R está ubicado 326 mvbnm más alto que el CAA estimado por registro y el pozo manifiesta agua, debido a una mayor presencia del fracturamiento cercano al pozo y la presencia de fallas cercanas. Considerando lo antes mencionado, el avance de agua en el pozo J-522R, **considerando el “método de la pendiente”** se diagnostica como **canalización estable**, resultado que demuestra que los nombres atribuidos a cada patrón de comportamiento en este estudio están soportados técnicamente.



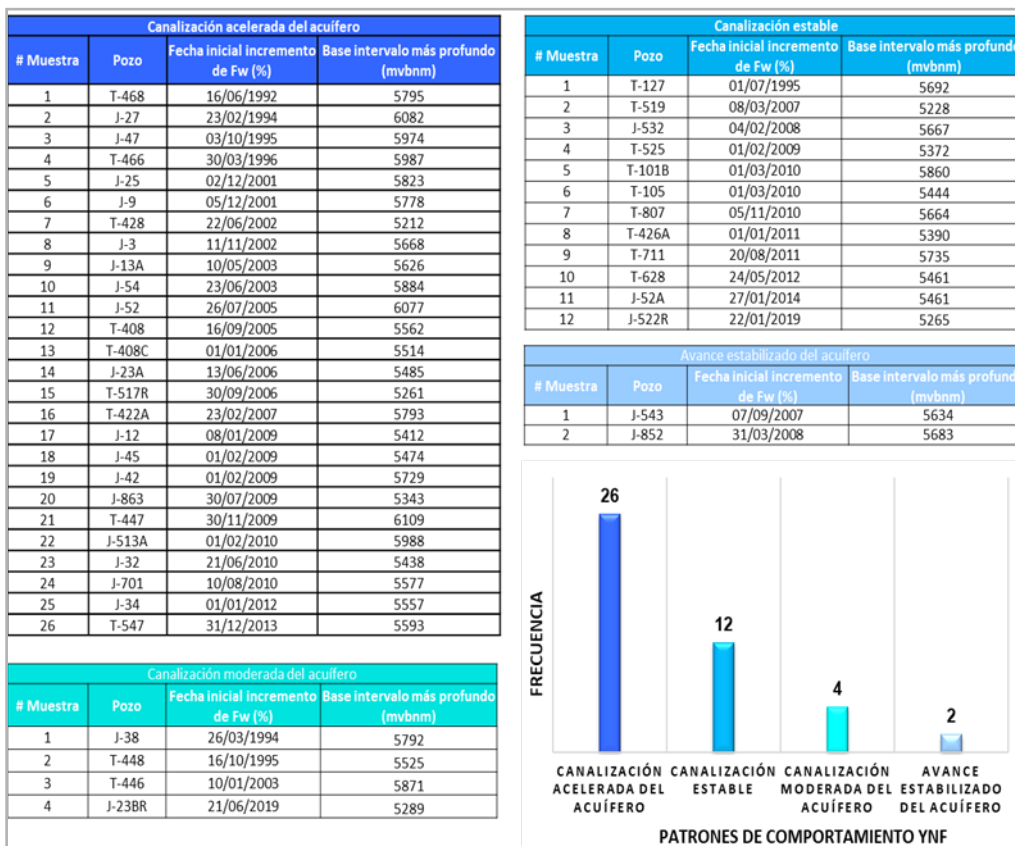


Figura 22. Análisis de frecuencia de irrupción.

En la **Figura 23**, es posible identificar la **distribución de los cuatro grupos de avance de agua identificados en este YNF**, donde es posible apreciar que la zona con mayor intensidad de fracturamiento refleja la mayor cantidad de pozos con presencia de canalización acelerada del acuífero; debido a la incidencia de este grupo que cubre el 59% del total de las

muestras analizadas, esto explica por qué hay una mayor presencia de columnas estáticas de agua en la mayoría de los pozos cerrados, donde se ha podido tomar información, principalmente hacia la zona sur del campo, a su vez indica que cualquier intervención mayor a ejecutar presentará una mayor incidencia de irrupción acelerada del acuífero.

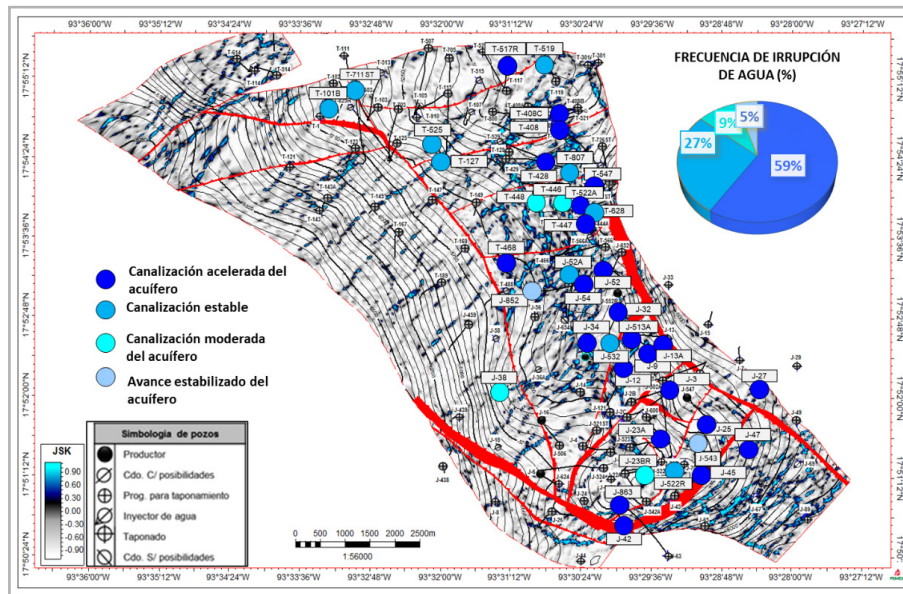


Figura 23. Ant tracking con patrones de comportamiento en YNF.

## Conclusiones

- Al incorporar la **metodología de este estudio propuesta**, es posible determinar el origen de los problemas de invasión de agua, causados por la conductividad de las fracturas en determinadas zonas del yacimiento.
- En este trabajo **no se descartan los efectos de conificación**; se considera que es un fenómeno presente, sin embargo, **se visualiza que en YNF este fenómeno antecede a las problemáticas finales diagnosticadas**.
- Se establecieron criterios y se estimaron rangos de valores de ("m" Fw%/días)** que permiten a los especialistas correlacionar a otros campos con características similares, de tal manera que puedan contribuir en un diagnóstico más certero del influjo de agua a nivel de pozo.
- Se ha demostrado que **en un YNF el avance normal del acuífero está mayormente relacionado con avances de tipo canalización** debido a los canales preferentes al flujo, y se presenta de forma distinta a lo observado en arenas.
- En este estudio se establece que existe una mayor frecuencia en manifestación de irrupción de agua de tipo canalización acelerada del acuífero, debido a que en el estudio hubo una frecuencia del 59% respecto a otros tipos de avances de agua.
- En el gráfico especializado de patrones de comportamiento, se aprecia que existe comunicación vertical alta en este campo, lo cual indica que pozos estructuralmente más altos podrían manifestar altos cortes de agua, aunque estén alejados de los contactos-agua-aceite estimados, si se encontraran terminados cerca de una zona con alto grado de fracturamiento.
- Se define como parte de la estrategia de explotación del campo priorizar actividades sin equipo, y realizar actividad física con equipo en campos que ofrezcan mayor rentabilidad y menor riesgo estático-dinámico.
- El uso del **gráfico especializado de patrones de comportamiento identificados vs profundidad del intervalo más profundo (mvbnm) versus Fwi (%)**, considerando la tendencia inicial de incremento del corte de agua, **presenta resultados confiables** respecto a la correlación del ascenso del acuífero en el yacimiento, **verificado con análisis complementarios**.
- Se ha demostrado que es posible realizar un diagnóstico integral de la problemática de irrupción de agua en YNF altamente complejos, mediante el planteamiento de **estrategias prácticas nuevas que coadyuvan en el enriquecimiento de la caracterización dinámica de este tipo de yacimientos**.

## Recomendaciones

- En este trabajo no se incluyeron registros de producción con los que cuentan algunos pozos, así como análisis de facies; secciones de atributos Ant-tracking, correlaciones petrofísicas y estructurales; no obstante, esta información se consideró para sustentar las observaciones principales de este estudio.
- El diagnóstico de irrupciones de agua debe verificarse por medio de un análisis multidisciplinario con una integración de la caracterización estática relevante.
- Existen eventos geológicos que afectan el fracturamiento natural de la formación productora, encontrándose en ocasiones que la dimensión de algunos rasgos que afectan la conductividad es menor a la resolución sísmica, por lo que es importante contar con innovaciones tecnológicas que permitan a los especialistas visualizar con mayor detalle a los yacimientos.

## Nomenclatura

NDA :	Nivel de Agua
CAA:	Contacto Agua Aceite
YNF:	Yacimientos naturalmente fracturados
JSK:	Jurásico Superior Kimmeridgiano
PT:	Profundidad total
Qo:	Gasto de aceite
Fw:	Flujo fraccional de agua
Bd:	Barriles por día
mvbnm:	metros verticales bajo nivel del mar
Wp:	Producción acumulada de agua
MMb:	Millones de barriles de agua

## Agradecimientos

A los Ingenieros Alfonso Espinosa González, Sergio Vazquez Nolasco, Jesús Cruz Gutiérrez, Angel Carbajal Loredó, Dr. Fernando Samaniego Verduzco, Edgar Alonso Nava Cu, Laura Estrada Maya, por sus relevantes aportaciones en este estudio.

Un agradecimiento especial a la Ing. Blanca Estela González Valtierra por la motivación que nos brinda para analizar con

mayor detalle nuestros campos, al Ing. Gerardo Echavez Ross por su apertura y retroalimentación, así como al equipo de especialistas que conforman las áreas de Yacimientos, Productividad y Geociencias del APBJ.

## Referencias

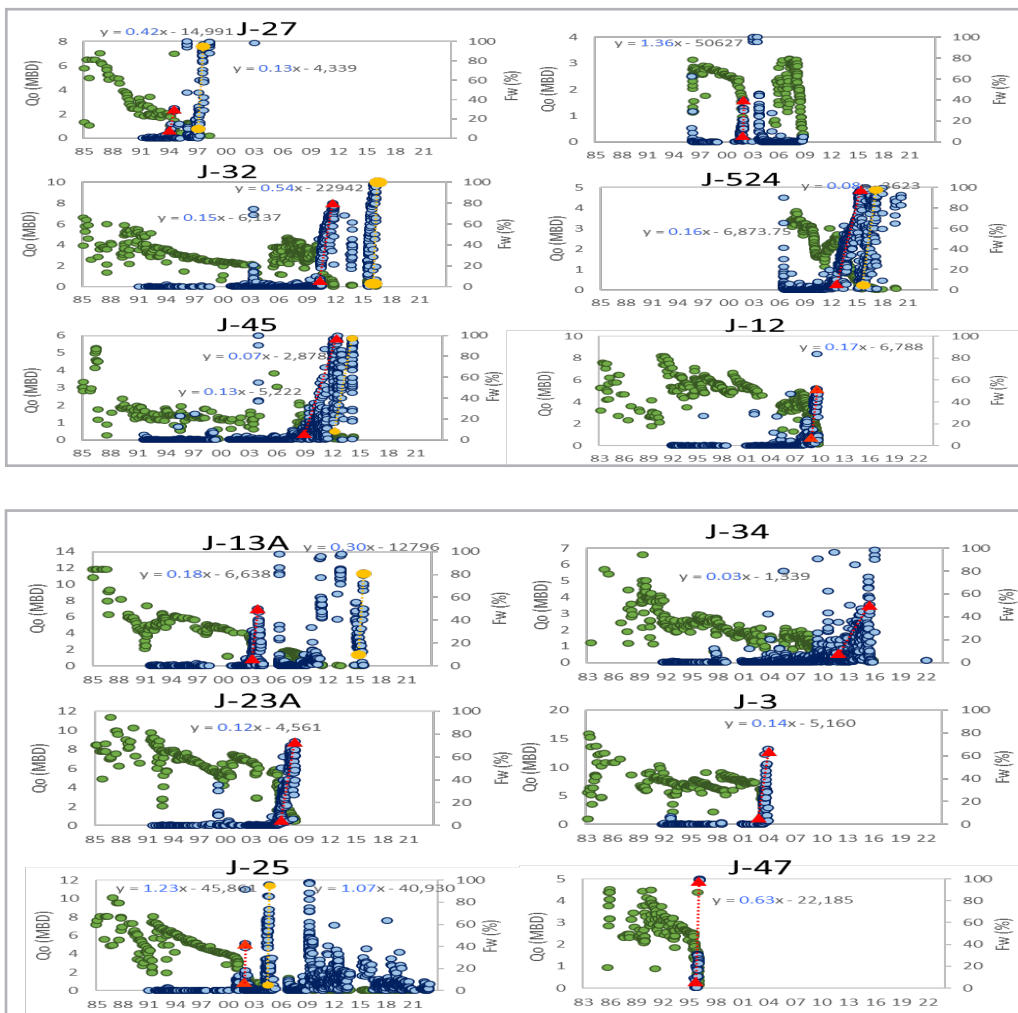
1. Ahmed, T. H. y McKinney, P. D. 2005. *Advanced Reservoir Engineering*. Burlington, Massachusetts: Gulf Professional Publishing.
2. Ahmed, T. H. 2019. *Reservoir Engineering Handbook*, fifth edition. Cambridge, Massachusetts: Gulf Professional Publishing.
3. Chan, K. S. 1995. Water Control Diagnostic Plots. Artículo presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, EUA, octubre 22-25. SPE-30775-MS. <https://doi.org/10.2118/30775-MS>.
4. Cosentino, L. 2001. *Integrated Reservoir Studies*. Paris: Editions Technip.
5. Nava Cu, E. A., Echávez Ross, G. y Pérez Hernández, L. 2022. Principio de Canalización Estable en Yacimientos Naturalmente Fracturados: Aplicación de Pozos Cercanos a Fallas, o Zonas con Alta/Media Intensidad de Fracturas. *Ingeniería Petrolera* **62** (1): 22-34. <https://biblat.unam.mx/hevila/Ingenieriapetrolera/2022/vol62/no1/3.pdf>.
6. Olmos Montoya, A., Samaniego Verduzco, F., Beltrán Jiménez, V. et al. 2019 Identificación de Oportunidades Mediante el Análisis de Entrada de Agua en YNF Altamente Complejos. *Ingeniería Petrolera* **59** (2): 76-91.
7. Pemex. 2017. Estudio Integral Campo de Estudio del Bloque Sur.
8. Pemex. 2018. Cuarto de Datos del Campo de Estudio del Bloque Sur.
9. Pemex. 2018. Revisión de la Interpretación de Pruebas de Presión del Campo en Estudio del Bloque Sur, Histórico.
10. Pemex. 2021. Caracterización Estática y Dinámica del Campo de Estudio del Bloque Sur.
11. Yortsos, Y. C., Choi, Y., Yang, Z. et al. 1999. Analysis and Interpretation of Water/Oil Ratio in Waterfloods. *SPE J.* **4** (04): 413-424. SPE-59477-PA. <https://doi.org/10.2118/59477-PA>.

## Anexos

### Grupo 1. Canalización acelerada del acuífero

m (Fw%/días)		Tiempo de invasión
Mínimo	Máximo	
0.03	1.73	Menor a 3 años

Tabla 10. Características grupo 1.



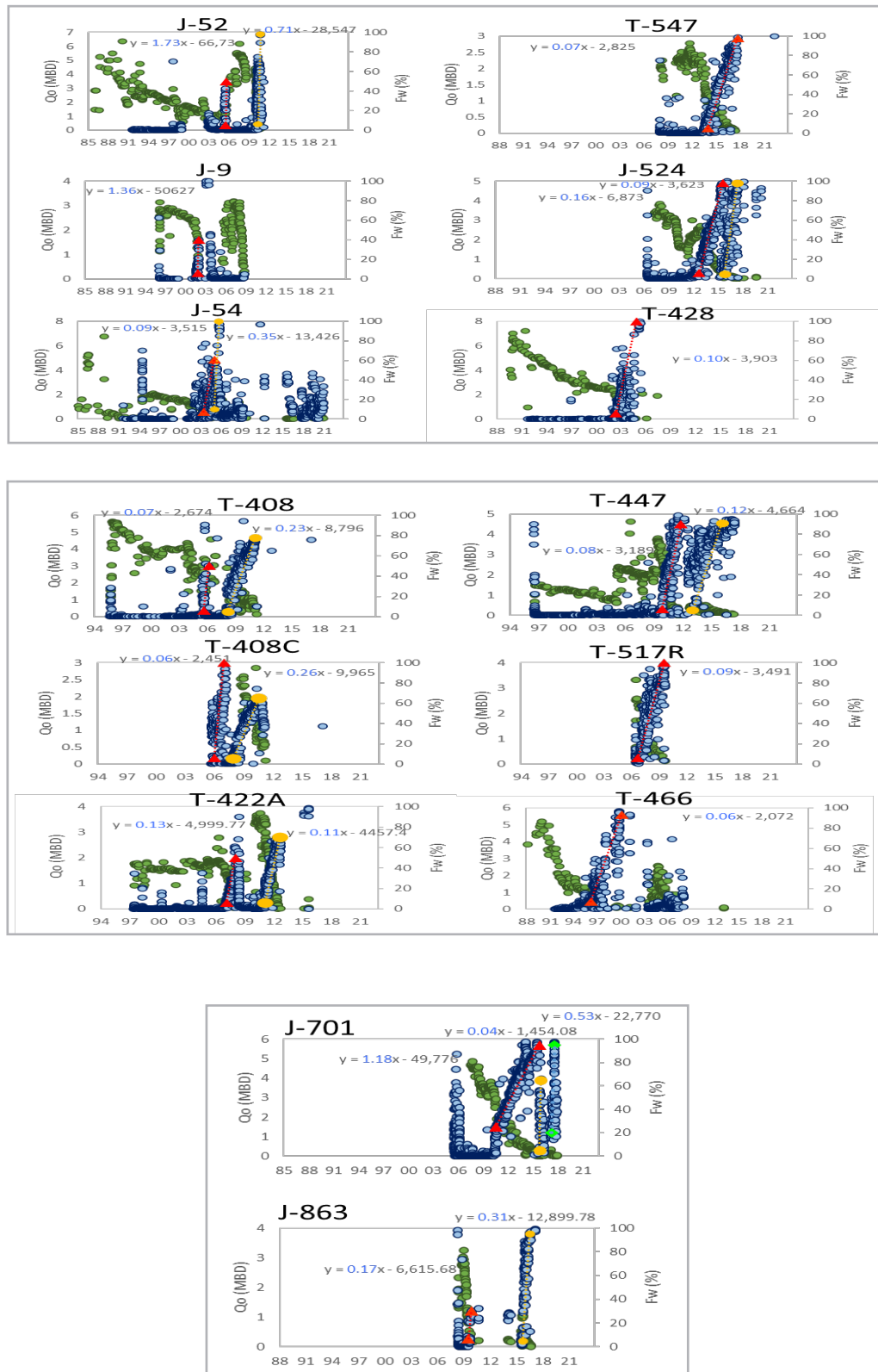


Figura 24. Estimación de pendientes “m” (%Fw/días) del grupo 1.

Grupo 2. Canalización moderada del acuífero

m (Fw%/días)		Tiempo de invasión	Observaciones
Mínimo	Máximo		
0.003	0.027	mayor a 3 años	Los pozos pueden continuar operando en un t>3 años a partir de la irrupción de agua

Tabla 11. Características Grupo 2

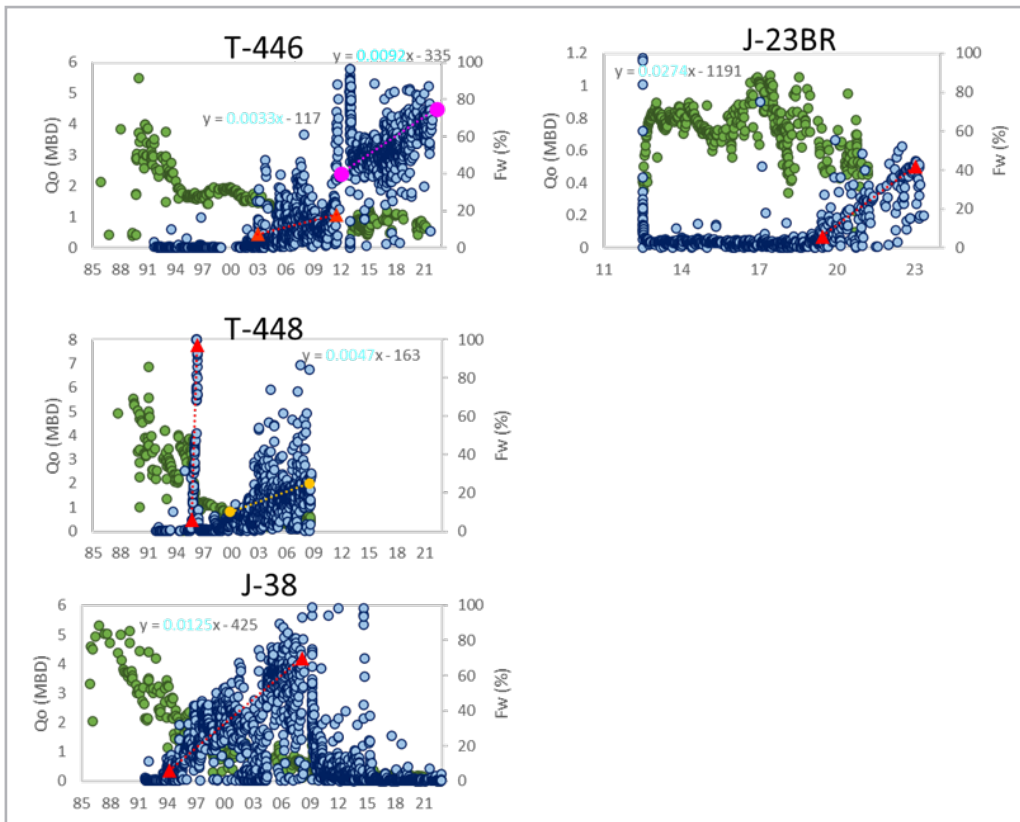


Figura 25. Estimación de pendientes “m” (%Fw/días) del grupo 2.



Grupo 3. Canalización de agua estable

m		Tiempo de invasión	Observaciones
Mínimo	Máximo		
0.0018	0.02	Mayor a 5 años posterior al cambio de tendencia	Presencia de dos tendencias de irrupción de agua, la primera puede ser acelerada o gradual y la segunda tendencia es estabilizada, <b>los valores de “m” están referidas a la tendencia estabilizada</b>

Tabla 12. Características grupo 3.

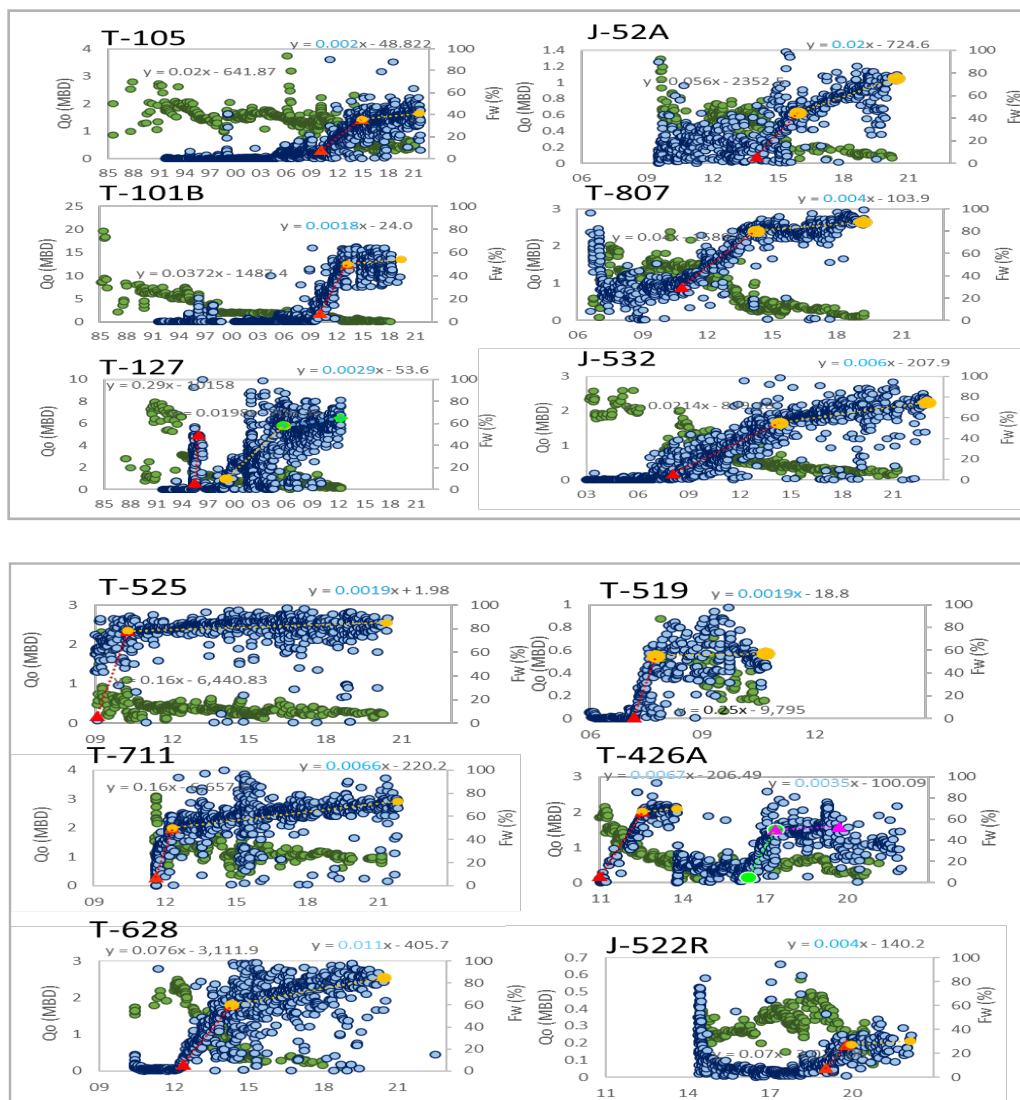
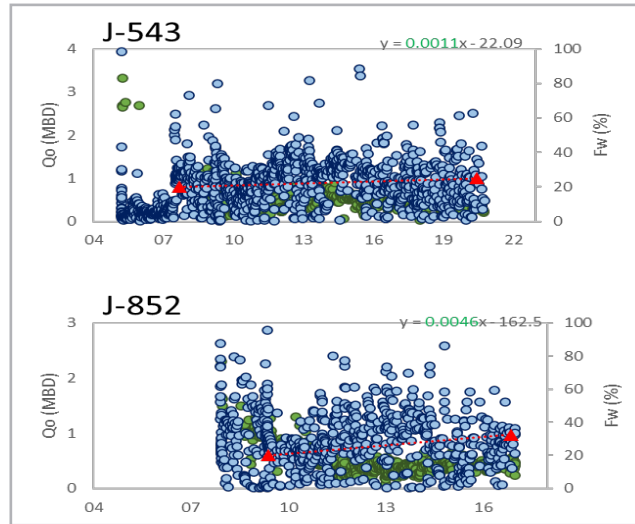


Figura 26. Estimación de pendientes “m” (%Fw/días) del grupo 3.

**Grupo 4. Avance estabilizado del acuífero**

m		Tiempo de invasión	Observaciones
Mínimo	Máximo		
0.0011	0.0046	Corte de agua bajo y estable por más de 7 años	Bajo corte de agua histórico

**Tabla 13.** Características grupo 4.



**Figura 27.** Estimación de pendientes “m” (%Fw/días) del grupo 4.

**Semblanza de los autores**

**Anel Olmos Montoya**

Ingeniera Petrolera egresada de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En 2011 participó como ayudante de Investigación en el desarrollo de modelos físicos experimentales para el desplazamiento de aceite remanente mediante la inyección de surfactantes en el Instituto Mexicano del Petróleo. En 2013 Ingresó a Petróleos Mexicanos, donde se ha desempeñado como Ingeniera de Yacimientos del APBJ, participando en la caracterización dinámica y la definición de la estrategia de explotación de los campos Jujo-Tecominoacán, Jacinto, Edén-Jolote, Chinchorro y Yagual. Autora y coautora de múltiples trabajos y publicaciones técnicas relacionados al área de Ingeniería de Yacimientos, presentados en distintos foros. A lo largo de su trayectoria ha colaborado como par técnico de la especialidad y ha contribuido con la integración de nuevas técnicas de diagnóstico de los YNF. En 2019 participó en el Diplomado en Dirección de Negocios. En 2022 concluyó estudios de Maestría en Administración de Negocios con Orientación en Finanzas. Actualmente es miembro activo del CIPM y SPE.

### **Jesús Cruz Gutiérrez**

Intérprete sísmico; en 2017 colaboró con la actualización del modelo estático del Terciario “Tintal”, en el cual realizó la interpretación de fallas y horizontes y el modelo geocelular. Posteriormente se integró al APBJ para realizar la actualización estática del campo Puerto Ceiba Mesozoico. En el 2018 inició en la compañía E3P, donde llevó a cabo la actualización del campo Rabasa Terciario para el Activo ACP, colaborando en el proceso de inversión sísmica simultánea, descomposición espectral, entre otros. De 2019 a la fecha, se encuentra trabajando en el APBJ, actualizando el modelo geológico-estructural de los campos Castarrical, Yagual, Jacinto y Paredón.

### **Ángel Carbajal Loredo**

Ingeniero Petrolero egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En 2013 Ingresó a Petróleos Mexicanos. A lo largo de su trayectoria se ha desempeñado como Ingeniero de Yacimientos del APBJ, participando en la caracterización dinámica y la definición de la estrategia de explotación de los campos Madrefil, Bellota, Bricol, Chinchorro, Edén-Jolote, Cárdenas, Mora, Paché, Yagual, entre otros. Autor y coautor de múltiples trabajos técnicos, cuenta con amplia experiencia en el análisis de YNF así como en estimaciones de volúmenes y reservas remanentes, pronósticos de producción, y documentación de planes de explotación. A lo largo de su trayectoria ha contribuido como par técnico de la especialidad, actualmente forma parte del “Grupo de detección de oportunidades de la Región Sur” y es miembro activo del CIPM y SPE.

### **Fernando Samaniego Verduzco**

Realizó sus estudios en la Especialidad de Ingeniería Petrolera de Licenciatura y Maestría en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, y Doctorado en la Universidad de Stanford, EUA.

Fue Investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo y el Instituto de Investigaciones Eléctricas; también trabajó en Petróleos Mexicanos. Actualmente es Profesor Emérito en la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Sociedades a las que pertenece: Society of Petroleum Engineers (SPE); Academia de Ingeniería; Colegio de Ingenieros Petroleros de México, Asociación de Ingenieros Petroleros de México; Academia Mexicana de Ciencias; Miembro Extranjero “Russian Academy of Natural Sciences”, Rusia.