

22
24'



*Universidad Nacional Autónoma
de México*

FACULTAD DE INGENIERIA

*Análisis de las Causas que Originan
la Depositación de Asfaltenos en
Pozos Productores de Aceite Volátil*

T E S I S

*Que para obtener el título de
INGENIERO PETROLERO
presenta:*

Norma López Alcalá



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

México, D. F.

1989



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

| | Pag. |
|--|------|
| RESUMEN | i |
| I. GENERALIDADES | 1 |
| I.1 DESCRIPCION DE LOS CAMPOS | 2 |
| I.2 TERMINACION DE LOS POZOS EN LOS CAMPOS AFECTADOS | 3 |
| I.3 MECANISMOS DE DEPOSITACION DE LOS ASFALTENOS | 3 |
| II. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO | 8 |
| III. POSIBLE RELACION ENTRE LA PRESION DE SATURACION DEL ACEITE-LOCALIZACION DE LOS DEPOSITOS ASFAL- TICOS EN LOS POZOS | 15 |
| III.1 REVISION DE LA LITERATURA | 15 |
| III.2 CORRELACIONES PRELIMINARES ENTRE LA LOCALIZACION DEL DEPOSITO Y LA PRESION DE SATURACION | 16 |
| IV. ESTABLECIMIENTO DE LA CORRELACION ENTRE LA PRO- FUNDIDAD A LA QUE SE FORMAN LOS ASFALTENOS Y A LA QUE OCURRE LA PRESION DE SATURACION DEL ACEITE | 26 |
| IV.1 METODO DE MINIMOS CUADRADOS UTILIZANDO VALORES MEDIOS (MCM) | 26 |
| IV.2 METODO DE MINIMOS CUADRADOS CON FACTOR DE PESO (WLS) | 30 |
| IV.3 ANALISIS DE VARIANZA | 34 |
| IV.4 VALIDACION DE CORRELACIONES MEDIANTE PRUE- BAS DE SIGNIFICANCIA | 35 |
| CONCLUSIONES | 40 |
| BIBLIOGRAFIA | 42 |

RESUMEN.

En este estudio se presentan los resultados de un trabajo experimental de laboratorio, así como los obtenidos mediante la aplicación de métodos de regresión y modelos de análisis estadísticos, enfocados a la determinación de la(s) causa(s) que originan la depositación de material asfáltico en los aparejos de producción de los pozos del Area Cretácica Chiapas - Tabasco.

Los datos de campo fueron procesados con programas de computo para el análisis de caídas de presión en las tuberías de producción, así como también con programas de ajuste mediante la teoría de regresión lineal a través del uso de mínimos cuadrados.

Como resultado de lo anterior, se estableció una correlación, la cual se validó mediante pruebas de significancia. Esto permitió concluir que la causa fundamental de la depositación de asfaltenos es, con un alto índice de probabilidad, la liberación de los componentes ligeros del aceite crudo producido en dicha área, propiciando la desestabilización del material coloidal asfáltico presente en el aceite, dando lugar a la formación de los depósitos de asfaltenos en los aparejos de producción de los pozos.

INTRODUCCION

El estudio referente al problema de la depositación orgánica que experimentaban los pozos del área en estudio, se originó debido a que la zona manifestó una severa reducción - en la producción de aceite crudo ligero de los campos A y B; - esta situación causada por la depositación de material orgánico en los aparejos de producción de los pozos disminuyéndose el área de flujo, en algunos casos se llegaba al taponamiento total de las tuberías.

Los estudios que se habían realizado, permitieron la caracterización del material orgánico depositado, estableciendo que son asfaltenos; así como el establecimiento de técnicas de limpieza de los aparejos de producción.

Las técnicas de remoción desarrolladas son solamente métodos correctivos, sin considerar las causas que originan la depositación del material asfáltico. En este trabajo se presenta un estudio detallado de la identificación del mecanismo de depositación del material orgánico basado, principalmente, en modelos teóricos de regresión que permitieron ajustar los datos obtenidos de campo.

1. GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCION DE LOS CAMPOS.

Los dos campos de la Zona Sureste incluidos en este estudio, llamados desde ahora A y B, estan formados por dos zonas litológicas bien definidas^{1*}. La primera, perteneciente al Cretácico Inferior, se compone principalmente de calizas arcillosas. La segunda consiste de dolomías con intercalaciones de caliza o caliza ligeramente dolomitizada, corresponde al Cretácico Inferior y Jurásico Superior, la cual representa la zona productora de dichos campos.

La formación almacenadora de los campos está consti--tuida de trampas estructurales, principalmente anticlinales representadas por la deformación de las capas y por las fallas que cortan la estructura. Dicha formación se encuentra a profundidades de 6500 m. con un intervalo productor que varía desde 60 hasta 200 m. La presión original del yacimiento es de 702 kg/cm² y la de saturación varia de 265 a 380 kg/cm². La relación gas-aceite original tiene un rango de 102 a 225 m³/m³, la cuál está en función de la localización geográfica de los pozos en dichos campos. La densidad del aceite crudo en esta área tiene un valor promedio de 37.8°API.

* Referencias al final

I.2 TERMINACION DE LOS POZOS EN LOS CAMPOS AFECTADOS.

Un ejemplo típico de terminación se muestra en la fi gura 1. Los aparejos de producción se componen generalmente - de una combinación de tuberías de diámetros de 3 1/2 y 4 1/2 - pg., y son colocados con un empacador justo antes de la boca - del liner de 5 pg., con el cual se terminan los pozos de estos campos.

I.3 MECANISMOS DE DEPOSITACION DE LOS ASFALTENOS.

Los mecanismos de depositación de los asfaltenos han sido estudiados ampliamente². Una breve descripción de los -- mismos se presenta a continuación.

Un alto porcentaje de aceites crudos contiene sustan - cias asfálticas en forma coloidal. El material asfáltico se - compone principalmente de³:

- a) Asfaltenos - Son sustancias sólidas no cristali - nas de color negro, con alto peso molecular, de - fuerte acento aromático e insolubles en destila - dos del petróleo.

| FORMACION | PROF. |
|-----------------|--------|
| PARAJE SOLO | AFLORA |
| CONCEPCION SUP. | 1835 |
| ENCANTO | 2265 |
| DEPOSITO | 2800 |
| OLIGOCENO | 3550 |
| EOCENO | 3950 |
| (SAN FELIPE) | 4852 |
| CRETACICO INF. | 4985 |
| KIMMERIDGIANO | 5345 |

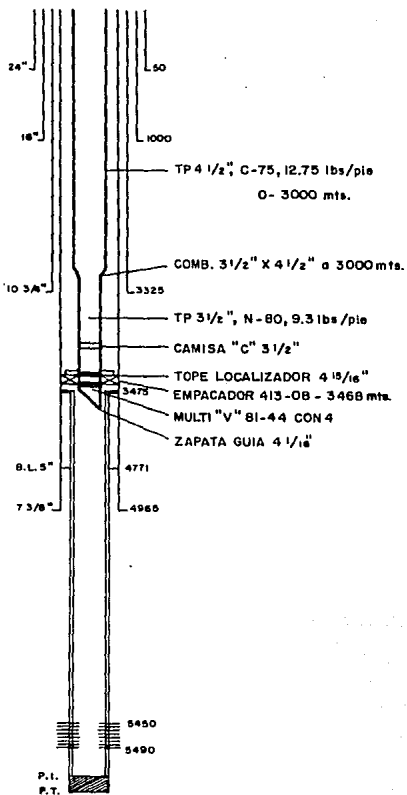


FIGURA 1. TERMINACION TIPICA EN LOS CAMPOS A Y B.

- b) Resinas Neutras - Son hidrocarburos aromáticos con alto peso molecular. Estas resinas son insolubles en soluciones alcalinas y ácidas, pero -- son miscibles en derivados del petróleo.

- c) Acidos Asfaltogénicos - Sustancias solubles en soluciones alcalinas y en benceno.

Es generalmente aceptado que los asfaltenos, los cuales se encuentran dispersos y en equilibrio con el aceite crudo, tienen propiedades asociadas con suspensiones coloidales. Esta dispersión coloidal, comunmente llamada peptización, es estabilizada por resinas e hidrocarburos policíclicos pesados. Cualquier acción de naturaleza química, eléctrica o mecánica - que desestabilice estas partículas, conducirá a la floculación y precipitación de los asfaltenos. En consecuencia, la temperatura, presión, composición química del crudo, efectos eléctricos y posiblemente la turbulencia del flujo, pueden tener efecto en la precipitación del material asfáltico.

La literatura ha mostrado que los asfaltenos pueden precipitarse por⁴:

- 1) Solventes - Los solventes tales como n-heptano, iso-hexano, iso-octano y acetona, provocan que el material asfáltico se precipite. Es decir, -

estos solventes desestabilizan las partículas -- coloidales en el aceite crudo y, en consecuencia ocurre la precipitación.

- 2) Presión y Temperatura - Las modificaciones en - presión y temperatura pueden provocar la precipitación del material asfáltico. Como se verá más adelante, cuando se alcanza la presión de saturación, entonces se produce la liberación de los - componentes ligeros del aceite crudo y como se - aumenta la concentración de pentano y más pesados en la mezcla de hidrocarburos, entonces puede ocurrir la precipitación y depositación de dicho material.

- 3) Segregación Gravitacional - Si el equilibrio -- existente entre el aceite crudo y las partículas de asfalto se rompe de alguna manera, entonces la aglomeración de partículas asfálticas ocurrirá debido a la diferencia de densidades; es decir, la depositación sucederá por segregación -- gravitacional.

- 4) Electrodepositación - Este es otro de los mecanismos usados para explicar la precipitación de partículas coloidales. Es conocido que la neu--

neutralización de la carga negativa que tienen las partículas asfálticas al hacer contacto con cargas positivas, causa la desestabilización de la mezcla de asfalto y, por lo tanto, ocurre la floculación y precipitación de asfaltos del aceite crudo.

- 5) Potencial de Corriente - Este mecanismo de deposición es similar al mecanismo de electrodeposición, ya que la neutralización de la carga del material coloidal debida a cualquier acción eléctrica, desestabiliza o depeptiza la mezcla de asfalto.

Otra de las formas en que se puede precipitar el material coloidal asfáltico, es mediante el contacto del aceite de formación con el ácido inyectado durante los tratamientos de estimulación. Lo anterior es conocido como lodo asfáltico y resulta más sencilla su prevención que su remoción, puesto que ya formado, es muy difícil conseguir un contacto íntimo entre el solvente y las partículas de asfalto. La cantidad de lodo asfáltico que puede ser generada, dependerá del tiempo de contacto entre el ácido inyectado a la formación y el aceite almacenado en ésta. Entre mayor sea el tiempo de contacto entre ambos, mayor será el volumen de lodo asfáltico generado.

11. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

Se realizó un estudio experimental mediante pruebas de electrodeposición con diferentes muestras de crudos tomadas de los campos A y B. Las pruebas se ejecutaron utilizando volúmenes de crudo de 250 ml., y aplicando una diferencia de potencial de 230 volts. En la tabla 1, se muestra la relación de crudos analizados, así como los resultados obtenidos. En dicha tabla se observa que este mecanismo solo genera trazas o muy ligera depositación de asfaltenos.

También como se muestra en los resultados de la tabla 2 a la 5, las pruebas de compatibilidad del aceite de formación con ácidos e inhibidores inyectados normalmente en operaciones de estimulación, no presentan ninguna manifestación de la formación de material coloidal asfáltico. Estas pruebas confirman los resultados presentados por Silva y García⁵, en donde establecen que la inyección de ácido con inhibidor no genera la formación de lodos asfálticos.

Por otro lado, no se consideró necesario efectuar pruebas de temperatura debido a que los pozos en el área de estudio tienen temperaturas altas y, no se tienen cambios radicales de este parámetro durante el flujo de fluidos en la tubería de producción.

TABLA 1.

PRUEBAS DE ELECTRODEPOSITACION CON MUESTRAS DE CRUDOS
CAMPOS A Y B

| MUESTRA DE ACEITE CRUDO | ASFALTENOS DEPOSITADOS (mg) |
|-------------------------|--------------------------------|
| POZO A-3 | 129.8 (trazas) |
| POZO A-8 | 143.7 (trazas) |
| POZO A-9 | 157.5 (trazas) |
| POZO B-2 | 118.3 (trazas) |
| POZO B-4 | 158.9 (trazas) |
| POZO B-5 | 822.8 (trazas) |

En todas las pruebas, el depósito se concentró en la lámina anódica. Las muestras de aceite crudo se filtraron antes y después de cada prueba, encontrándose la presencia de -- sólidos en ambos casos.

TABLA 2. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD POR EMULSION HCL AL 20%, CON INHIBIDOR DE CORROSION A.

| MUESTRA | CONCENTRACION DE INHIBIDOR DE CORROSION (% VOL) | RELACION ACIDO/ACEITE | % DE FASE ACUOSA LIBERADA | | | | PRECIPITACION ASFALTENICA |
|---------|---|-----------------------|---------------------------|--------|-------|--------|---------------------------|
| | | | 5 min. | 15 min | 30min | 60 min | |
| A-9 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-4 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-5 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-10 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-6 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-7 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-11 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-12 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-13 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-14 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-7 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-8 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-4 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-9 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-6 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLA 3. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD POR EMULSION ICL AL 20% , CON INHIBIDOR DE CORROSION B.

| MUESTRA | CONCENTRACION DE INHIBIDOR DE CORROSION (%VOL.). | RELACION ACIDO/ACEITE | % DE FASE ACUOSA LIBERADA | | | | PRECIPITACION ASFALTENICA |
|---------|--|-----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------------------------|
| | | | 5 min | 15 min | 30 min | 60 min | |
| A-9 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-4 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-5 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-10 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-6 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-7 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-11 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-12 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-13 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-14 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-15 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-7 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-8 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-4 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-9 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-6 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 44 | 0 |

TABLA 4. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD POR EMULSION HCL AL 15%, CON INHIBIDOR DE CORROSION B.

| MUESTRA ACEITE | CONCENTRACION DE INHIBIDOR DE CORROSION (% VOL) | RELACION ACIDO/ACEITE | % DE FASE ACUOSA LIBERADA | | | | PRECIPITACION ASFALTENICA |
|----------------|---|-----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------------------------|
| | | | 5 min | 15 min | 30 min | 60 min | |
| A-9 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-4 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-5 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-10 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-6 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 |
| A-7 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-11 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-12 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 |
| A-13 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| A-14 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 8 | 14 | 0 |
| A-15 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 54 | 0 |
| B-7 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 8 | 22 | 0 |
| B-8 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-4 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-9 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 |
| B-6 | 2 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 |

TABLA 5. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD POR EMULSION HCL AL 15% , CON INHIBIDOR DE CORROSION A.

| MUESTRA | CONCENTRACION DE INHIBIDOR DE CORROSION (% VOL) | RELACION ACIDO/ACEITE | % DE FASE ACUOSA LIBERADA | | | | PRECIPITACION ASFALTENICA |
|---------|---|-----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|---------------------------|
| | | | 5 min. | 15 min | 30 min | 60 min | |
| A-9 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-4 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-5 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-10 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-6 | 1.5 | 50/50 | 0 | 4 | 100 | - | TRAZAS |
| A-7 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-11 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-12 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-13 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-14 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A-15 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 |
| B-7 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-8 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-4 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-9 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B-6 | 1.5 | 50/50 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 |

Este estudio experimental permitió concluir que la -
deposición de asfaltenos no es propiciada por ninguno de los
mecanismos que se han mencionado.

III. POSIBLE RELACION ENTRE LA PRESION DE SATURACION DEL ACEITE-LOCALIZACION DE LOS DEPOSITOS ASFALTICOS EN LOS POZOS

III.1 REVISION DE LITERATURA.

La literatura⁶ presenta evidencias de que el problema de depositación de material asfáltico puede ser ocasionado por caídas de presión abajo de la presión de burbujeo del aceite.

Es conocido que la liberación de hidrocarburos de bajo peso molecular tales como pentano, causan la precipitación de asfaltenos, los cuales se encuentran dispersos coloidalmente en el aceite crudo. Los asfaltenos, como se vió anteriormente, se encuentran en equilibrio con el aceite debido a la presencia de resinas y aromáticos, los cuales permiten que dicho material orgánico sea peptizado o dicho de otra manera, estabilizado en el crudo. La presencia en exceso de componentes ligeros disuelven parcial o completamente los agentes peptizantes, dando como resultado la precipitación de los asfaltenos. Por lo anterior, se considera que cuando la presión a la que se encuentra sometido el aceite crudo cae por debajo de la presión de burbujeo, podría ocurrir la depositación del material asfáltico.

Partiendo de estas consideraciones, Haskett y colab^o

radores⁶ supusieron que la parte superior de los depositos -- que se formaban en los pozos de un campo de Argelia, estaban asociados con la presión de burbujeo del aceite crudo. Ellos analizaron los perfiles de la parte superior del depósito y el diámetro de la tubería que no se encontraba obstruido. -- Los autores concluyeron que la depositación de asfaltenos, -- ocurría justo abajo del punto en que se tenía la presión de burbujeo y que además ciertas condiciones no conocidas de presión y temperatura y, posiblemente, el tipo de flujo y grado de turbulencia, deberían de cumplirse para que se iniciará la depositación. También, cabe aclarar que Haskett y colaboradores establecen que la depositación de material asfáltico no ocurre en la región bifásica; es decir, el depósito no se genera después de que la presión cae por debajo de la de burbujeo del crudo.

III.2 CORRELACIONES PRELIMINARES ENTRE LA LOCALIZACION DEL DEPOSITO Y LA PRESION DE SATURACION.

Tomando como base el trabajo presentado por Haskett y colaboradores⁶, se hicieron mediciones de las profundidades en los pozos, a las cuales se detectaban los depósitos de asfaltenos. Posteriormente, a fin de reproducir las condiciones reales de flujo en los pozos mediante modelos analíticos, se hizo necesario recopilar información, tanto del área de producción como de la de yacimientos.

La información recabada consistió en lo siguiente:

- Producción:
- a) Gastos de aceite
 - b) Relaciones gas-aceite
 - c) Presiones de fondo fluyendo
 - d) Presiones estáticas
 - e) Presiones en la superficie
 - f) Temperatura del yacimiento
 - g) Temperatura en la superficie.

Yacimientos: A partir del análisis PVT se obtuvieron valores promedios de:

- a) Presión de burbujeo
- b) Densidad del aceite medida a condiciones de separación.
- c) Gravedad específica del gas.

De los estados mecánicos de los pozos se obtuvo:

- a) Longitud del intervalo productor
- b) Diámetro de la tubería de revestimiento.
- c) Diámetro de la tubería de producción.

Los datos de campo mencionados, fueron procesados mediante un simulador analítico de Flujo Multifásico⁷. Dicho modelo analiza la información a fin, de seleccionar, de manera -

automática, que método de caída de presión reproduce las condi ciones reales de los pozos. Este modelo selecciona además, -- las correlaciones apropiadas que permiten determinar las pro- piedades PVT de los fluidos fluyendo a través de la tubería de producción. De los siete métodos con que cuenta el simulador- analítico de flujo multifásico, se determinó que el método de Fancher-Brown reproducía muy adecuadamente las condiciones de los pozos en el área de estudio. En la tabla 6, se muestran - las presiones de fondo fluyendo medidas y las calculadas por - este simulador. Se puede observar que los valores de presión determinados en campo, son bastante bien reproducidos por el - método analítico de Fancher-Brown.

Una vez determinado el método más apropiado de cálculo de caídas de presión, se procedió a determinar, utilizando los datos de campo, la profundidad a la que se alcanzaba teóri- camente la presión de burbujeo en la tubería de producción. -- Para ello fue necesario hacer uso de otro simulador que anali- za el cálculo de caídas de presión en tuberías verticales^B, - utilizando para ello otra vez el método de Fancher-Brown deter- minado como el mas propio para las condiciones de los pozos en esta área. El modelo requiere, de manera global, de las pro- piedades físicas de los fluidos, los datos de producción y el estado mecánico de los pozos.

En la tabla 7, se presentan los valores de profundi- dad a la que se alcanza la presión de burbujeo, bajo las con-

TABLA 6. PRESIONES MEDIDAS Y CALCULADAS

| POZO | Pwf (medido) (kg/cm ²) | Pwf (calculado) (kg/cm ²) |
|------|---------------------------------------|--|
| A-3 | 474 | 472 |
| A-6 | 394 | 383 |
| B-5 | 321 | 330 |
| B-6 | 363 | 379 |

TABLA 7. PROFUNDIDAD Y PRESION DE BURBUJEO OBTENIDAS CON EL MODELO DE ANALISIS DE FLUJO MULTIFASICO.⁷

| POZO | PRESION DE BURBUJEO (kg/cm ²) | PROFUNDIDAD A LA Pb (mts) |
|------|--|------------------------------|
| A-1 | 264.96 | 5660 |
| A-2 | 327.40 | 5470 |
| A-3 | 307.25 | 4331 |
| A-4 | 380.00 | 5550 |
| A-5 | 219.50 | 1988 |
| A-6 | 352.72 | 5433 |
| A-7 | 307.63 | 6060 |
| B-1 | 377.40 | 5418 |
| B-2 | 320.90 | 4656 |
| B-3 | 295.40 | 2249 |
| B-4 | 357.50 | 4095 |
| B-5 | 279.30 | 5490 |
| B-6 | 234.90 | 5847 |

diciones reales de producción de los pozos. Estos valores - y los referentes a la profundidad a la que se localizaban -- los depósitos en el campo, fueron analizados mediante un programa de regresión lineal para observar una posible correlación entre dichos valores.

En la tabla 8, se presentan datos calculados (profundidad a la que ocurre la Pb) y medidos (profundidad de la localización del depósito) de los campos A y B, así como los - valores del gasto de aceite, q_o ; la relación gas-aceite, RGA y la presión en la cabeza del pozo, Pwh.

En la figura 2, se muestran los valores de profundi--dad a la que ocurre el depósito y los datos de profundidad - donde teóricamente ocurre la liberación de ligeros; es decir, la profundidad a la que se alcanza la presión de burbujeo. - En este análisis de regresión no se consideran las coordena--das (0,0) de la gráfica mostrada en la figura 2. El coefi--ciente de correlación obtenido con este análisis fue de --- 0.8117 y la ecuación ajustada para este grupo de valores fue:

$$DP_R = -216.68 + 0.9249 * DP_B \quad (1)$$

donde DP_R representa la profundidad a la cual ocurren los de depósitos de asfalteno y DP_B es la profundidad a la que teóri--camente se presenta la liberación de ligeros o dicho de otra

TABLA 8. COMPARACION DE LAS PROFUNDIDADES A LAS QUE OCURREN LOS DEPOSITOS Y LAS CORRESPONDIENTES A LA PRESION DE BURBUJEO

| POZO | PROF. MEDIDA (mts) | PROF. CALCULADA (mts) | Q _o (m ³ /d) | RGA (m ³ /m ³) | P _{wh} (kg/cm ²) |
|------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|--|
| A-1 | 5660 | 5660 | 105 | 225 | 52 |
| A-2 | 4200 | 5470 | 160 | 168 | 63 |
| A-3 | 3800 | 4331 | 477 | 139 | 68 |
| A-4 | 4000 | 5550 | 443 | 225 | 93 |
| A-5 | 2550 | 1988 | 895 | 102 | 98 |
| A-6 | 4350 | 5433 | 98 | 156 | 68 |
| A-7 | 5800 | 6060 | 180 | 225 | 56 |
| B-1 | 4650 | 5418 | 807 | 225 | 67 |
| B-2 | 5000 | 4656 | 457 | 185 | 70 |
| B-3 | 1000 | 2249 | 944 | 190 | 141 |
| B-4 | 3800 | 4095 | 355 | 220 | 110 |
| B-5 | 5000 | 5490 | 735 | 200 | 33 |
| B-6 | 5342 | 5847 | 136 | 230 | 28 |

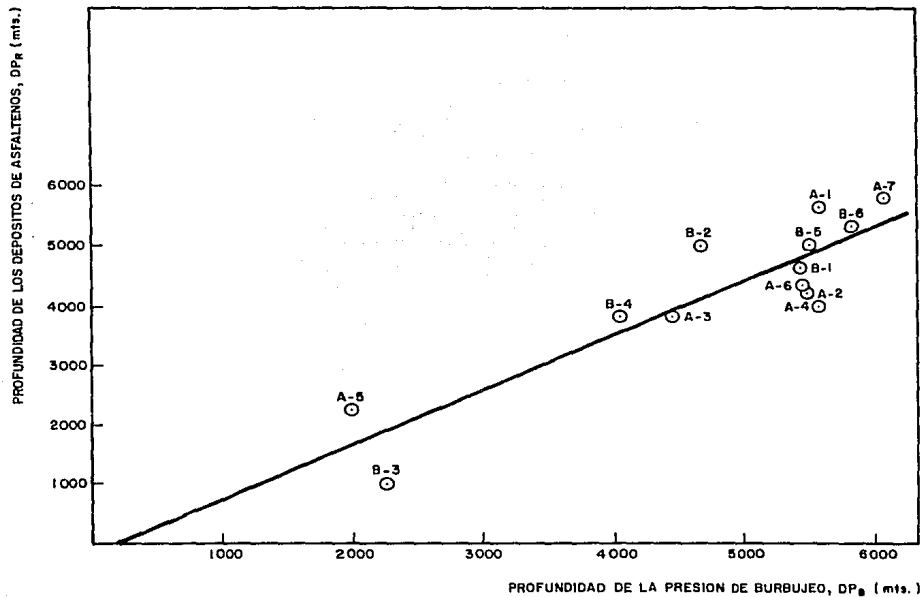


FIGURA 2. AJUSTE DE REGRESION DE LA PROFUNDIDAD MEDIDA Y LA CALCULADA SIN CONSIDERAR LAS COORDENADAS (0,0).

forma, la profundidad a la que se alcanza la presión de burbujeo. En la figura 3, se presentan los valores de profundidad, medidos y calculados considerando el punto (0,0). Aunque el ajuste de una línea recta pasando a través del origen no es necesariamente justificable, puede suceder que de acuerdo al número de datos que se tengan, el modelo de regresión pasando por el origen proporcione un ajuste de datos mucho más adecuado. Este fue el caso en esta parte del estudio, ya que se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.8918 y la ecuación de ajuste obtenida en este análisis está dada por:

$$DP_R = -99.18 + 0.902 * DP_B \quad (2)$$

Los resultados obtenidos en esta etapa mostraron la existencia de una buena correlación entre la profundidad a la que ocurren los depósitos de asfaltenos y la profundidad a la que se alcanza la presión de burbujeo. Lo anterior dió margen a que se efectuara un análisis más completo utilizando un método de regresión más confiable, el cual se presenta a continuación.

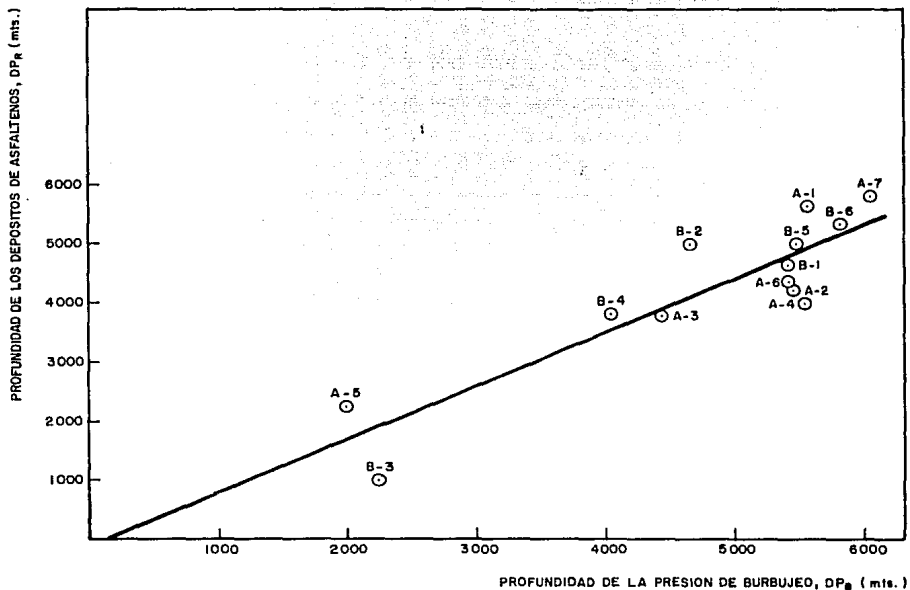


FIGURA 3. AJUSTE DE REGRESION DE LA PROFUNDIDAD MEDIDA Y LA CALCULADA CONSIDERANDO LAS COORDENADAS (0,0).

IV. ESTABLECIMIENTO DE LA CORRELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD A LA QUE SE FORMAN LOS ASFALTENOS Y A LA QUE OCURRE LA PRESION DE SATURACION DEL ACEITE.

Es muy importante en cualquier estudio en que se manejen valores variables, examinar el efecto que algunos de éstos ejercen o aparenten ejercer sobre otros. De esta forma, el establecer una solución funcional que involucre a las variables, es posible conocer más acerca de la relación entre ellas a fin de poder determinar los efectos que puedan producirse por cambios en dichas variables. Más aún, puede darse el caso que no exista una relación física aparente entre las variables y que éstas puedan relacionarse mediante algún tipo de ecuación matemática, aún cuando dicha ecuación no tenga ningún significado físico.

En esta parte, se presentan los métodos de análisis de regresión que junto con la información de campo, se utilizaron en este estudio estadístico con el propósito de establecer conclusiones significativas, acerca de la dependencia entre la profundidad a la que ocurren los depósitos de asfaltenos y a la que se alcanza la presión de burbujeo.

IV.1. METODO DE MINIMOS CUADRADOS UTILIZANDO VALORES MEDIOS (MCM).

Antes de establecer el método ordinario de mínimos-

cuadrados, utilizando el valor medio, es conveniente especificar como se empleó la información obtenida del campo y la generada mediante programas de análisis de caídas de presión en tuberías verticales. Se definió que los datos que tuviesen valores repetidos que fueran muy cercanos entre ellos, - podrían ser agrupados en intervalos determinados a fin de establecer los valores conocidos como pseudo-repeticiones, los cuales son definidos por Draper y Smith⁹. Una vez agrupados dichos valores, el análisis estadístico puede desarrollarse de manera similar al de un análisis común.

El método ordinario de mínimos cuadrados utilizando el valor medio de cada uno de los grupos fue empleado en este estudio para el análisis de la información de los valores agrupados en pseudo-repeticiones. En la tabla 9, se presentan los valores medios de cada grupo. En la figura 4, se muestra la excelente correlación obtenida, entre la profundidad a la que se alcanza la presión de saturación en los aparejos de producción, y aquella donde ocurren los depósitos de asfaltenos. La ecuación que representa dicha correlación está dada por:

$$DP_R = -371.223 + 0.97254 \cdot DP_B \quad (3)$$

El coeficiente de correlación utilizando este método fue de 0.94896, comparado con el valor de 0.89184 obteni-

TABLA 9. DATOS AGRUPADOS PARA EL ANALISIS DE MINIMOS CUADRADOS
CON VALORES MEDIOS

| POZO | DP _B (mts) | DP _R (mts) | DP _{BM} (mts) | DP _{RM} (mts) |
|------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A-5 | 1988 | 2250 | 2118.5 | 1625.0 |
| B-3 | 2249 | 1000 | | |
| B-4 | 4095 | 3800 | | |
| B-2 | 4656 | 5000 | 4394.0 | 4200.0 |
| A-3 | 4431 | 3800 | 5472.2 | 4440.0 |
| A-2 | 5470 | 4200 | | |
| A-4 | 5550 | 4000 | | |
| A-6 | 5433 | 4350 | | |
| B-1 | 5418 | 4650 | | |
| B-5 | 5490 | 5000 | | |
| A-1 | 5660 | 5660 | 5855.7 | 5600.6 |
| B-6 | 5847 | 5342 | | |
| A-7 | 6060 | 5800 | | |

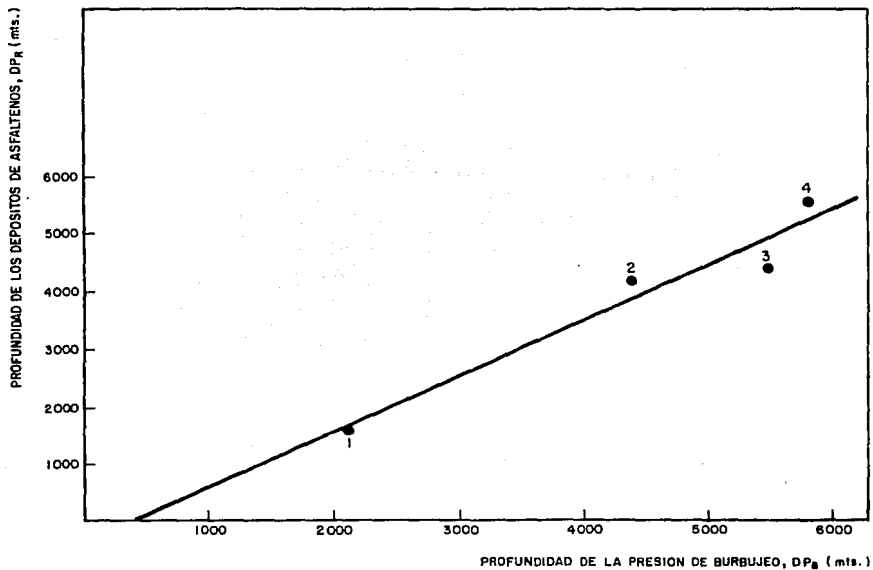


FIGURA 4. AJUSTE DE REGRESION CON VALORES MEDIOS DE LOS DATOS AGRUPADOS DE PROFUNDIDADES MEDIDAS Y CALCULADAS.

do con el método ordinario de mínimos cuadrados y con los valores no agrupados. Dicho coeficiente permite establecer -- que el 94.9 por ciento de esta información puede ser explicada; es decir, que existe una dependencia entre dichas profundidades, explicable en un 94.9 por ciento.

El valor de regresión permite determinar el grado - de asociabilidad o dependencia entre las variables involucra das, estableciéndose que entre más cercano a uno sea el va--lor de dicho coeficiente, mayor dependencia habrá entre di--chas variables. Cabe aclarar que cuando se utilizan valores repetitivos o pseudorepetitivos, como fué en este caso, el - valor del coeficiente de regresión no puede llegar a uno, -- aún cuando se observe un excelente ajuste, ya que ningún mo--delo puede explicar la variación en los datos debido a un er--ror puro¹⁰.

IV.1. METODO DE MINIMOS CUADRADOS CON FACTOR DE PESO (WLS).

La teoría de mínimos cuadrados con un factor de pe--so, es similar a la establecida para mínimos cuadrados¹⁴.

En la teoría ordinaria de mínimos cuadrados, se es--tablece que para obtener los estimadores β_0 y β_1 , se debe minimizar la función objetivo representada por⁹ :

$$Q = \sum (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2 \quad (4)$$

De una manera similar a la anterior, la expresión a minimizar en la teoría de mínimos cuadrados con un factor de peso es:

$$Q = \sum W_i (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2 \quad (5)$$

Las ecuaciones generales que se obtienen minimizando la ecuación (5), son:

$$\sum W_i Y_i = b_0 \sum W_i + b_1 \sum W_i X_i$$

$$\sum W_i X_i Y_i = b_0 \sum W_i X_i + b_1 \sum W_i X_i^2 \quad (6)$$

Del sistema de ecuaciones anterior, se puede obtener la estimación de b_0 y b_1 .

Una vez establecido el método de análisis, se procedió al estudio de la información de las profundidades a las que ocurren los depósitos de asfaltenos y las profundidades a las que se alcanza la presión de burbujeo. En la tabla 10 se muestran los diferentes grupos de datos para este análisis, así como los resultados obtenidos aplicando el factor de peso. En la figura 5, se presenta un excelente ajuste de

TABLA 10. DATOS AGRUPADOS PARA EL ANALISIS DE MINIMOS
CUADRADOS CON FACTOR DE PESO.

| POZO | DP _B (mts) | DP _R (mts) | W _i | W _i *DP _B (mts) | W _i *DP _R (mts) | DP _{BMW} (mts) | DP _{RMW} (mts) |
|------|--------------------------|--------------------------|----------------|--|--|----------------------------|----------------------------|
| A-5 | 1988 | 2250 | 0.707 | 1405.5 | 1590.8 | 1148.9 | 1497.7 |
| B-3 | 2249 | 1000 | 0.707 | 1590.0 | 707.0 | | |
| B-4 | 4095 | 3800 | 0.577 | 2362.8 | 2192.6 | 2423.4 | 2535.3 |
| B-2 | 4656 | 5000 | 0.577 | 2686.5 | 2885.0 | | |
| A-3 | 4431 | 3800 | 0.577 | 2556.7 | 2192.6 | | |
| A-2 | 5470 | 4200 | 0.447 | 2445.1 | 1877.4 | | |
| A-4 | 5550 | 4000 | 0.447 | 2480.8 | 1788.0 | | |
| A-6 | 5433 | 4350 | 0.447 | 2428.5 | 1944.4 | | |
| B-1 | 5418 | 4650 | 0.447 | 2421.8 | 2078.5 | | |
| B-5 | 5490 | 5000 | 0.447 | 2454.0 | 2235.0 | 1974.7 | 2446.0 |
| A-1 | 5660 | 5660 | 0.577 | 3265.8 | 3265.8 | | |
| B-6 | 5847 | 5342 | 0.577 | 3373.7 | 3082.3 | | |
| A-7 | 6060 | 5800 | 0.577 | 3496.6 | 3346.6 | | |
| | | | | | | | |

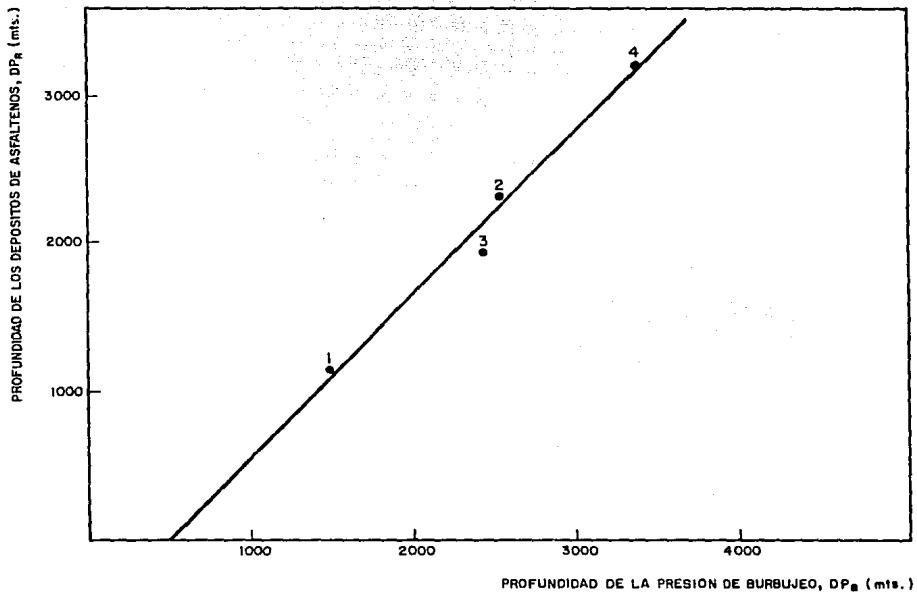


FIGURA 5. AJUSTE DE REGRESION POR EL METODO WLS DE LOS DATOS AGRUPADOS DE PROFUNDIDADES MEDIDAS Y CALCULADAS.

los datos con la aplicación de este método. El coeficiente de correlación para este caso fué de 0.9736, comparado con el valor de 0.8918 que se obtuvo utilizando el método ordinario de mínimos cuadrados. Es decir, el ajuste de regresión obtenido con el método WLS representa o explica el 97.36 por ciento del total de los datos analizados. La ecuación que representa el ajuste mostrado en la figura 5, está dada por:

$$DP_R = 544.77 + 0.8737 \cdot DP_B \quad (7)$$

IV.3 ANALISIS DE VARIANZA.

La técnica estadística aplicada a resultados experimentales se conoce comunmente como Análisis de Varianza (ANOVA).

El procedimiento de cálculo es sencillo y requiere de la evaluación de sumas de cuadrados para las diferentes fuentes de variación así como la cuantificación de los grados de libertad para cada fuente. Es decir, es necesario evaluar la suma de cuadrados totales, la suma de cuadrados de los experimentos y la suma de cuadrados para residuos. Además, se deben de determinar los grados de libertad de las sumas anteriores.

IV.4 VALIDACION DE CORRELACIONES MEDIANTE PRUEBAS DE --- SIGNIFICANCIA.

Una vez determinados los estimadores de las ecuaciones que permiten relacionar la profundidad a la que ocurren los depósitos de asfaltenos y la profundidad a la que se alcanza la presión de burbujeo, se procedió a establecer pruebas o hipótesis a fin de poder obtener conclusiones significativas. Una de las hipótesis que se plantean más comunmente, es la de establecer que alguna combinación de las variables involucradas sea igual a cero. Los procedimientos que involucran la distribución "t de Student" y "F de Snedecor" usan la suma de cuadrados de los residuos, explicando en detalle la aplicación de ANOVA.

Prueba "t de Student".

El procedimiento de prueba consiste en obtener el valor "t" calculado mediante:

$$t = \frac{\bar{D}}{S_D} \quad (8)$$

donde, $\bar{D} = \frac{D_i}{n}$ representa la media del experimento

con $D_i = DP_R - DP_B$

n = número de experimentos.

y

$$\bar{S}_D = \frac{S}{n} \quad (9)$$

con

$$S = \frac{\sum D_i^2 - \frac{(\sum D_i)^2}{n}}{n - 1} \quad (10)$$

siendo \bar{S}_D la desviación estándar del experimento.

Una vez que se determina el valor "t", se compara con un valor t^* obtenido de tablas para un cierto nivel de confianza. Con el propósito de obtener conclusiones significativas se establece que:

- 1) Si $t \leq t^*$, se acepta la hipótesis de que el valor al que se alcanza la presión de burbujeo en los aparejos de producción es igual al valor -- donde ocurren los depósitos de asfalteno.
- 2) Si $t > t^*$, se rechaza la hipótesis y se concluye que no existe dependencia real entre estas -- dos variables.

En la tabla 11, se presentan los valores calculados tanto para el método con valores medios MCM, como los valores que se obtuvieron para el método WLS, utilizando niveles de confianza del 95 y 99.5 por ciento.

TABLA 11. ANALISIS DE VARIANZA

| METODO | D_i | D_i^2 | $(D_i)^2$ | \bar{D} | S_D | t | t* |
|--------|--------|------------|-----------|-----------|--------|-------|-------|
| MCM | 1974.8 | 1411691.11 | 3899835 | 493.7 | 190.77 | 2.587 | 2.776 |
| WLS | 1059.2 | 368667.03 | 1143181.6 | 267.3 | 83.10 | 3.216 | 4.604 |

Del análisis de esta tabla, se observa que se cumple la hipótesis establecida y por lo tanto existe una dependencia real entre las profundidades a las que se encuentran los depósitos y aquellas donde se alcanza la presión de burbujeo.

Prueba "F de Snedecor".

El procedimiento que se realiza en este tipo de --- prueba, es similar al efectuado con la prueba "t de Student"; es decir, se determina "F" y se compara con el valor F* obtenido de tablas para un cierto nivel de confianza. Para obtener conclusiones significativas, se establece que:

4.- De acuerdo al análisis teórico realizado, utilizando información real de campo, se pudo establecer que la correlación más confiable entre la localización del depósito de asfaltenos en los pozos, DP_R , es:

$$DP_R = 544.77 + 0.8737 * DP_B$$

5.- Los resultados del estudio estadístico mediante la aplicación del método de Análisis de Varianza permiten concluir, con un alto índice de probabilidad, que la causa principal de la depositación de asfaltenos en los aparejos de producción de los pozos, es la liberación de componentes ligeros del aceite producido en el área de estudio.

- 1) Si $F \leq F^*$, se acepta la hipótesis y se concluye que existe una dependencia real entre las profundidades anteriormente mencionadas.
- 2) Si $F > F^*$, se rechaza la hipótesis y se concluye que existen diferencias reales con respecto a la dependencia de las profundidades.

Neter y Wassenrman¹⁰ establecen que para un nivel de confianza dado y la hipótesis de que la diferencia entre las variables involucradas es cero, la prueba "F" es equivalente a la prueba "t" de dos colas. Es decir que:

$$F = t^2 \quad (11)$$

La tabla 12, presenta el análisis de varianza para este tipo de prueba.

TABLA 12. ANALISIS DE VARIANZA

| METODO | t | F | TABLAS |
|--------|-------|--------|--------|
| WLS | 3.216 | 10.343 | 18.5 |
| MCM | 2.587 | 6.692 | 199.0 |

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

De los resultados presentados en esta tabla, observa que se cumple con la hipótesis establecida y, por lo tanto, se determina una dependencia real entre las profundidades definidas anteriormente.

CONCLUSIONES

Del análisis del trabajo experimental de laboratorio así como del estudio teórico presentado en este trabajo, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- 1.- El mecanismo de electrodepositación no es causa fundamental de la depositación de asfaltenos en el área de estudio.
- 2.- Los resultados experimentales de las pruebas de compatibilidad de los aceites crudos del área en estudio y los sistemas ácidos empleados comunmente en las operaciones de estimulación, no muestran ninguna formación de material coloidal asfáltico, por lo que este mecanismo no representa una causa de la formación de asfaltenos.
- 3.- Los valores obtenidos de los coeficientes de regresión mediante la aplicación del Método de Mínimos Cuadrados, incluyendo un factor de peso y empleando valores medios, permiten establecer una Dependencia Real entre la profundidad a la que ocurren los depósitos y la profundidad a la que se alcanza la presión de burbujeo.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Alva Morales, G.H.,: "ESTUDIO DEL AREA TECOMINOACAN-JUJO-EVALUACION DE LA FORMACION", (ACTUALIZACION), Proyecto -- D-5019, Div. Evaluación de Formaciones, Sub. de Tec. Explotación, IMP, Octubre, 1986.
- 2.- Ledezma Sánchez, A., Islas Silva, C. y Acuña Rosado, A.,: "Causas y Efectos de las Sustancias Asfálticas Presentes en el petróleo", Ingeniería Petrolera, Julio, 1972.
- 3.- Witherspoon, P.A. y Munir, Z.A.,: "Size and Shape of --- Asphaltic Particles in Petroleum", Producers Monthly. -- (August 1960), pgs. 20-31.
- 4.- Preckshot, G.W., De Lisle, N.G., Cottrell, C.E. and Katz, D.L.,: "Asphaltic Substances in Crude Oil", Trans. AIME -- (1943), pgs. 151, 188.
- 5.- Silva López, P. y García Hernández, F.,: "ESTUDIO SOBRE - EL CONTROL DE LA DEPOSITACION ORGANICA EN POZOS DEL AREA-CRETACICA CHIAPAS-TABASCO", Proyecto D-3124, Informe de - Avance, Div. Producción, Sub. de Tec. Explotación, IMP, - Septiembre, 1988.
- 6.- Haskett, C.E., and Tartera, M.,: "A Practical Solution to the Problem of Asphaltene Deposits Hassi Messoud Field, - Algeria", JPT, April, 1965, pgs. 387-391.
- 7.- González Chion, M.A.,: "DESARROLLO DE UN SIMULADOR NUMERI CO PARA ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCION DE -- POZOS", Proyecto D-3124, Div. Producción, Sub. de Tec. -- Explotación, IMP, Diciembre, 1985.

- 8.- Martínez Galván, J.L., Sánchez Arredondo, F. y Limón Hernández, T.,: "INSTRUCTIVO DEL PROGRAMA DE COMPUTO PARA - EL CALCULO DE CAIDAS DE PRESION EN TUBERIAS CON FLUJO -- MULTIFASICO", Proyecto D-3200, Div. Producción, Sub. de- Tec. Explotación, IMP, Agosto, 1980.
- 9.- Draper, N. and Smith, H.,: APPLIED REGRESSION ANALYSIS,- SECOND EDITION, John Wiley and Sons, Inc., (1981), PG.42
- 10.- Neter, J. and Wasserman, W.,: APPLIED LINEAR STATISTICAL MODELS, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, I ll., (1974),- pg. 135.