



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

01153

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PROYECTO TERMINAL

**"FACTIBILIDAD TÉCNICA –ECONOMICA PARA LA  
INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN POZOS DE LA  
PLATAFORMA BATAB GENERADO IN-SITU A  
TRAVÉS DE MEMBRANAS"**

QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE  
SISTEMAS ARTIFICIALES DE PRODUCCIÓN PETROLERA

PRESENTA:

JUAN CRUZ VELÁZQUEZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ABRIL 2005

M. 344721

Cruz Velazquez, Juan 2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.

---

---

## FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA PARA LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN POZOS DE LA PLATAFORMA BATLAB GENERADO IN-SITU A TRAVÉS DE MEMBRANAS

### RESUMEN

En el presente trabajo se comparan los beneficios económicos que se obtienen al incrementar la producción de crudo, en pozos de la Plataforma Batab, inyectando nitrógeno generado en la misma con equipo de separación a través de membranas, distribuyendo la producción de nitrógeno de manera diferente, considerando diferentes volúmenes de inyección.

La producción de nitrógeno en la plataforma está restringida por el espacio disponible en ésta y por el peso del equipo generador por lo que sólo es posible producir 2 MMPCD, de acuerdo a lo anterior se plantaron tres opciones para la distribución del nitrógeno generado. La primera opción considera la inyección del nitrógeno a cuatro pozos, batab 11, 13, 21D y 23, inyectando en cada uno de ellos 0.5 MMPCD de nitrógeno, en la segunda alternativa se inyectará 0.75 MMPCD nitrógeno en tres pozos, batab 13, 21D y 23; en la tercera alternativa se inyectará 1.0 MMPCD en dos pozos batab 11 y 21D.

De acuerdo a las proyecciones realizadas, la alternativa de inyectar el nitrógeno a cuatro pozos presenta la mayor producción, con 9946 BPD en el año uno, y 8421 BPD en el año dos; la alternativa dos presentó 8512 BPD en el año uno y 7317 BPD en el año dos, mientras que la tercera presenta una producción de 6503 y 5634 BPD para los años uno y dos respectivamente.

De acuerdo a los resultados del estudio económico, la alternativa de inyectar 0.5 mmpcd de nitrógeno a los pozos Batab 11, 13, 21D y 23, resulta ser la más atractiva por su mayor VPN generado, con un monto de 1,023 MM\$, esto debido a su mayor incremento de producción, requiriendo una inversión total de 111.39 MM\$ en un periodo de dos años, incluyendo el servicio de arrendamiento y costos de operación. El tiempo de recuperación de la inversión es de 48 días.

---

---

---

---

## CONTENIDO

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 REVISIÓN DE LITERATURA
  - 2.1 PROCESO DE SEPARACIÓN DE NITRÓGENO.
    - 2.1.1 PROCESOS CRIOGÉNICOS
    - 2.1.2 PROCESO DE SEPARACIÓN CON MEMBRANAS
  - 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEMBRANAS
  - 2.3 TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS
    - 2.3.1 COMPAÑÍA WEATHERFORD
    - 2.3.2 COMPAÑÍA NITROPET-PRAXAIR
  - 2.4 ANTECEDENTES DE PRUEBAS REALIZADAS EN LA REGIÓN SUR
  - 2.5 DISEÑO DE UNA SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO
    - 2.5.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO
- 3.0 INFRAESTRUCTURA DEL CAMPO BATAB
  - 3.1 ESPACIO DISPONIBLE EN PLATAFORMA
  - 3.2 REQUERIMIENTO DE EQUIPO
  - 3.3 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPO EN LA PLATAFORMA BATAB A
- 4.0 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE LOS POZOS A LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN LA PLATAFORMA BATAB A
  - 4.1 HISTORIAL DE LOS POZOS
  - 4.2 CONDICIONES ACTUALES
  - 4.3 COMPORTAMIENTO DE LOS POZOS A LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO
- 5.0 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA GENERACIÓN E INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN EL CAMPO BATAB.
  - 5.1 CONSIDERACIONES Y BASES ECONÓMICAS
    - 5.1.1 EROGACIONES
    - 5.1.2 BENEFICIOS DEL PROYECTO
    - 5.1.3 PARÁMETROS DE RENTABILIDAD
- 6.0 CONCLUSIONES
- 7.0 RECOMENDACIONES

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

---

---

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades Físicas del Nitrógeno.....	4
Tabla 2.2. Características de compresores Booster.....	11
Tabla 3.1. Equipo para la generación de nitrógeno.....	23
Tabla 4.1 Condición actual de los pozos.....	40
Tabla 4.2. Producción de aceite esperada en BPD en la plataforma Batab A.....	55
Tabla 4.3. Pozos con mayor producción a diferentes condiciones de inyección.....	55
Tabla 5.1. Costos de arrendamiento.....	58
Tabla 5.2. Costos de operación.....	59
Tabla 5.3. Costos de transporte.....	60
Tabla 5.4. Beneficio económico.....	61
Tabla 5.5. Parámetros de rentabilidad.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de bombeo neumático.....	3
Figura 2.2. Planta criogénica para obtención de N <sub>2</sub> .....	5
Figura 2.3. Diagrama de proceso de separación de N <sub>2</sub> con membranas.....	6
Figura 2.4. Membrana individual (cortesía Weatherford).....	7
Figura 2.5. Múltiples membranas (cortesía Weatherford).....	7
Figura 2.6. Flujo de la mezcla de aire en una membrana (cortesía Weatherford).....	8
Figura 2.7. Proceso de separación de N <sub>2</sub> con membranas, compañía INS (cortesía Weatherford).....	9
Figura 2.8. Módulo de separación de N <sub>2</sub> con membranas, compañía INS (cortesía Weatherford).....	9
Figura 2.9. Unidad de membranas NPU-1500, Weatherford – INS 15.....	10
Figura 2.10. Unidad de membranas NPU-3000, Weatherford – INS 15.....	10
Figura 2.11. Compresores primarios Quincy 1500/200, e Ingersoll-Rand XHP 900/350.....	11
Figura 2.12. Esquema del material de las membranas; Cía. Nitropet Praxair.....	12
Figura 2.13. Arreglo compresor primario – NPU.....	13
Figura 2.14. Arreglo de compresor booster con medición de flujo.....	13
Figura 2.15. Punto de inyección.....	15
Figura 2.16. Presión de fondo fluyendo.....	16
Figura 2.17. Determinación de la producción de un pozo.....	17
Figura 2.18. Método universal de espaciado de válvulas.....	18
Figura 3.1. Ubicación del campo Batab.....	21
Figura 3.2. Área disponible en las plataformas Batab A y 1A.....	22
Figura 3.3. Distribución del equipo Weatherford en la plataforma Batab A.....	24
Figura 3.4. Distribución del equipo Praxair en la plataforma Batab A.....	25
Figura 4.1. Ubicación de pozos en el campo.....	26
Figura 4.2. Presión promedio de la formación Brecha del Paleoceno.....	27
Figura 4.3. Presión promedio de la formación Jurásico.....	27
Figura 4.4. Historia de producción del pozo Batab-11.....	28
Figura 4.5. Estado Mecánico del pozo Batab 11.....	29

---



---

Figura 4.6. Historia de producción del pozo Batab 13.....	30
Figura 4.7. Estado mecánico del pozo Batab 13.....	31
Figura 4.8. Historia de producción del pozo Batab 21D.....	32
Figura 4.9. Estado mecánico del pozo Batab 21D.....	33
Figura 4.10. Historia de producción del pozo Batab 23.....	34
Figura 4.11. Estado mecánico del pozo Batab 23.....	35
Figura 4.12. Historia de producción del pozo Batab 210.....	36
Figura 4.13. Estado mecánico del pozo Batab 210.....	37
Figura 4.14. Historia de producción del pozo Batab 21.....	38
Figura 4.15. Estado mecánico del pozo Batab 21.....	39
Figura 4.16. Comportamiento del gasto de aceite, inyectando gas natural y nitrógeno....	41
Figura 4.17 Comportamiento de afluencia del pozo Batab 11, para 8,10 y 20% de agua.	43
Figura 4.18. Respuesta del pozo Batab 11 con el sistema de BN, para 8% de agua.....	43
Figura 4.19. Respuesta del pozo Batab 11 con el sistema de BN, para 10% de agua.....	44
Figura 4.20. Respuesta del pozo Batab 11 con el sistema de BN, para 20% de agua.....	44
Figura 4.21. Comportamiento de afluencia del pozo Batab 13 para 0,10 y 20% de agua.	45
Figura 4.22. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 0% de agua.....	45
Figura 4.23. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 10% de agua.....	46
Figura 4.24. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 20% de agua.....	46
Figura 4.25. Comportamiento de afluencia del pozo Batab 21D, para 3, 10 y 20% de agua.....	47
Figura 4.26. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 3% de agua.....	47
Figura 4.27. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 10% de agua...	48
Figura 4.28. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 20% de agua...	48
Figura 4.29. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-23, para 3.5, 10 y 20% de agua.....	49
Figura 4.30. Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 3.5% de agua...	49
Figura 4.31 Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 10% de agua.....	50
Figura 4.32. Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 20% de agua.....	50
Figura 4.33. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-210, para 10 y 20 % de agua.....	51
Figura 4.34. Respuesta del pozo Batab-210 con el sistema de BN, para 10% de agua...	51
Figura 4.35. Respuesta del pozo Batab-210 con el sistema de BN, para 20% de agua...	52
Figura 4.36. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-21, para 5 10 y 20 % de agua.....	53
Figura 4.37. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 5% de agua.....	50
Figura 4.38. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 10% de agua.....	54
Figura 4.39. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 20% de agua.....	54

---

---

**FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA PARA LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN  
POZOS DE LA PLATAFORMA BATAB GENERADO IN-SITU A TRAVÉS DE  
MEMBRANAS**

---

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante el año de 1999 el Grupo de Sistemas Artificiales de Explotación del IMP, Delegación Zona Sur, realizó diversos estudios enfocados a incrementar la producción de los pozos que constituyen el campo Batab, tanto los que están en operación como los que se encuentran con presiones igualadas.

Entre los estudios realizados está el bombeo multifásico superficial, bombeo electrocentrífugo y bombeo neumático; de éstos, el que mostró los mejores beneficios técnico-económicos fue el bombeo neumático, lo anterior debido a la baja relación gas líquido de los pozos, lo cual, aunado a la baja permeabilidad y presión de fondo, ha sido la causa de que dichos pozos no puedan fluir a las condiciones actuales de operación.

Debido a que actualmente no se dispone de gas y red de inyección de bombeo neumático (BN), el personal técnico del activo han elegido documentar un proyecto de BN (red de distribución y acondicionamiento de pozos), solicitando el presupuesto necesario para el desarrollo de la ingeniería correspondiente, para los campos de Chuc y Batab.

Dada la magnitud del presupuesto requerido para dicha proyecto y el tiempo necesario para su ejecución y puesta en operación, lo cual se estima optimistamente en por lo menos dos años y, debido a que existen algunos pozos fuera de operación por presiones igualadas; se ha decidió analizar, en términos técnicos y económicos, la alternativa de generar e inyectar nitrógeno en los pozos del campo Batab.

En este trabajo se describen las actividades realizadas, enfocadas a analizar la factibilidad técnico-económica, de generar nitrógeno in-situ, mediante el PROCESO DE MEMBRANAS, para su inyección en pozos del campo Batab en sustitución del gas natural y aprovechar el potencial de los pozos abatidos.



---

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA

Estudios realizados durante 1998 y 1999, mostraron que el sistema de bombeo neumático, es el que aportó los mayores incrementos de producción en el campo Batab<sup>9</sup>; El bombeo neumático es el Sistema Artificial de Explotación que más se parece al proceso de flujo natural. Consiste en suministrar gas a alta presión, con la finalidad de airear o aligerar la columna de fluidos, reduciendo la presión en el fondo del pozo, generando con ello una diferencial de presión frente a la formación.

Existen dos tipos de bombeo neumático:

Bombeo Neumático Continuo (Caso de interés).

Bombeo Neumático Intermitente

Los componentes de un sistema de bombeo neumático, son los siguientes y se muestran en la figura 2.1.

- Estación de compresión.
- Múltiple de distribución para la medición y control de la inyección de gas.
- Mandriles y válvulas de inyección.
- Múltiple de producción.

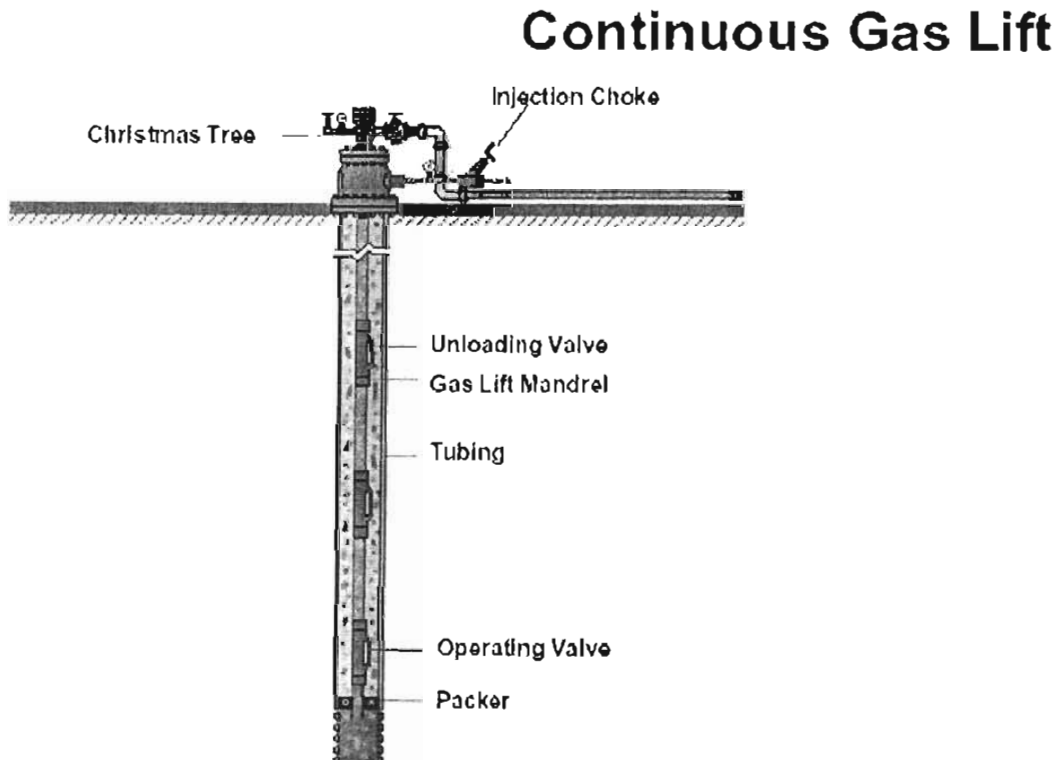


Figura 2.1. Sistema de bombeo neumático (TULSA)

En este trabajo se analizará la utilización de nitrógeno como sustituto del gas natural en el proceso de bombeo neumático, por lo que se analizan los procesos para obtenerlo.

## 2.1 PROCESO DE SEPARACIÓN DE NITRÓGENO.

El aire atmosférico, en promedio, está compuesto de 78% de nitrógeno (N<sub>2</sub>), 21% de oxígeno (O<sub>2</sub>) y 1% de otros gases, de los cuales el más abundante es el argón. El nitrógeno es un gas inerte de uso común en la industria petrolera en labores de inducción y reparación de pozos, inertizado, purga y limpieza de líneas, perforación bajo balance, etc.

Tabla 2.1 Propiedades Físicas del Nitrógeno <sup>1</sup>

Parámetro	Observaciones	Sistema Métrico	Sistema US
Formula química		N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Masa Molar	u.m.a.	28.01	28.01
Fase Líquida (a punto ebullición)	Gravedad específica (agua=1)	0.808 @ 1.013 bar	0.808 @ 1 atm
	Capacidad calorífica específica	2.042 kJ / kg °C	0.4877 BTU / lb °F
Punto Ebullición	Temperatura	-195.8 °C @ 1.013 bar	-320.4 °F @ 1 atm
	Calor latente de vaporización	199.1 kJ / kg	85.6 BTU / lb
Fase Gaseosa	Gravedad específica (Alre=1)	0.9737	0.9737
	Capacidad calorífica específica	1.04 kJ / kg °C	0.249 BTU / lb °F
	Densidad	1.2506 kg / m <sup>3</sup>	0.0780 lb / cu. Ft
Punto Triple	Temperatura	-210 °C	-346.0 °F
	Presión	12.5 kPa abs	1.81 psia
Punto Crítico	Temperatura	-146.9 °C	-232.4 °F
	Presión	3399 kPa abs	493 psia
	Densidad	314.9 kg / m <sup>3</sup>	19.6 lb / cu. Ft
Conductividad Térmica		0.026 W / m °K @ 300 °K	0.01503 BTU / Ft h °F @ 80 °F

Existen dos medios para obtener nitrógeno de la atmósfera, uno es el proceso CRIOGÉNICO, el otro es un método físico mecánico de separación a través de MEMBRANAS.

### 2.1.1 PROCESOS CRIOGÉNICOS

Tomando en cuenta la composición del aire, un proceso criogénico para obtención de nitrógeno es en esencia un proceso termodinámico que consiste en reducir la temperatura de un volumen de aire hasta su temperatura de ebullición; oxígeno, argón, y nitrógeno; -184, -186 y -196 °C, respectivamente. Posteriormente las fases líquidas se separan a través de una columna fraccionadora. <sup>3</sup>

---

Existe una variante en este proceso y ésta es que solamente se licuan los componentes de  $O_2$  y Ar,  $-184$  y  $-186^\circ C$ , respectivamente, éstos se ventean o almacenan. El  $N_2$  que queda en fase gaseosa en la torre fraccionadora se recircula para calentamiento y compresión.<sup>3</sup>

En la figura 2.2 se ilustra el esquema de una planta criogénica de separación de  $N_2$ . Los sistemas criogénicos requieren de una inversión elevada, por la infraestructura necesaria así como de un gran espacio. La pureza del  $N_2$  obtenido de una planta criogénica es de 99.9 %.

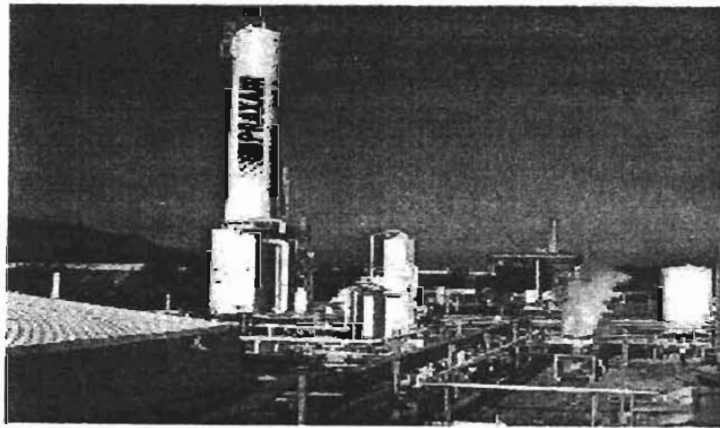


Figura 2.2. Planta criogénica para obtención de  $N_2$  (Cortesía de Praxair)

## 2.1.2 PROCESO DE SEPARACIÓN CON MEMBRANAS<sup>2</sup>

La tecnología de membranas es un proceso de separación de gases reciente y de bajos costos que se está desarrollando en la industria petrolera.

Las membranas consisten en películas de polímero ultra delgada colocada en la superficie de un sustrato poroso delgado. El diseño de las membranas depende de la capa o control de la velocidad del sustrato de permeación. Existen dos configuraciones básicas: espirales enrolladas y fibras cóncavas.

La separación de gases en las membranas se realiza por la diferencia en las velocidades de difusión del gas sobre la película. Los gases "rápidos" fluyen a través de la membrana y es expulsado a la atmósfera, mientras que el gas más lento es adsorbido por la membrana.

La separación de  $N_2$  por membranas consiste en comprimir un volumen determinado de aire atmosférico hasta una presión de alrededor de 200 lb/pg<sup>2</sup> man., de ahí se conduce al sistema de separación de membranas, en éstas se separa el oxígeno, argón y nitrógeno. Los dos primeros se ventean de manera controlada a la atmósfera, el nitrógeno separado, con una pureza que varía de 95 a 98%, según información técnica de algunas compañías productoras, se conduce a un sistema de compresión para de ahí ser analizado, medido y enviado a las condiciones de compresión requeridas.<sup>2</sup>

En la figura 2.3, se muestra de manera general el proceso de separación de nitrógeno con membranas.

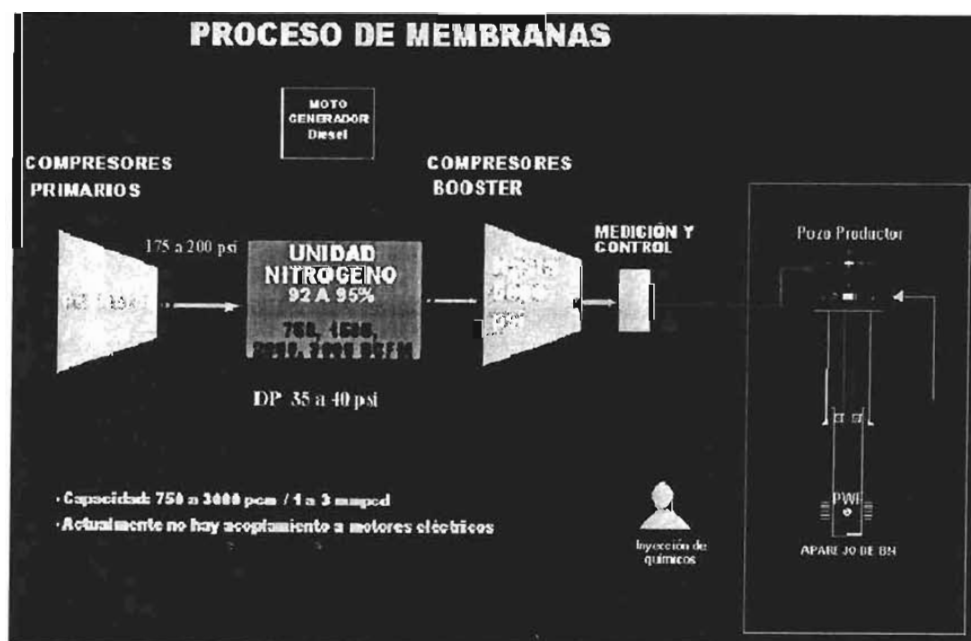


Figura 2.3. Diagrama de proceso de separación de  $N_2$  con membranas

---

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEMBRANAS

Las membranas son fibras poliméricas; una membrana es un tubo hueco con diámetros muy homogéneos, de fracciones de micra, semejante a un cabello humano. En una unidad de producción de nitrógeno, NPU por sus siglas en inglés, el módulo de membranas lo constituyen miles de fibras poliméricas las cuales envuelven a un núcleo<sup>2</sup>. En la figura 2.4 se ilustra una membrana individual. En la figura 2.5 se muestra un agrupamiento de múltiples membranas, las cuales en conjunto son el corazón de una NPU.

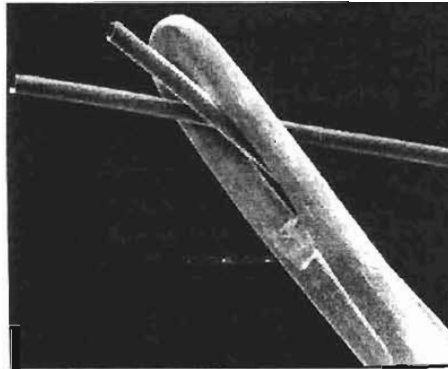


Figura 2.4. Membrana individual (cortesía Weatherford)



Figura 2.5. Múltiples membranas (cortesía Weatherford)

La mezcla de aire que entra a la unidad de membranas, NPU, muestra diferentes velocidades de flujo, las impurezas constituidas por el  $O_2$  y vapores de agua, alcanzan mayores velocidades de flujo que el  $N_2$ ; asimismo debido a sus diámetros, diferentes respecto al del  $N_2$ , éstos permean o se separan hacia el exterior de las membranas, no así el  $N_2$  el cual fluye a menor velocidad siempre por el interior de la membrana hasta la salida de la misma, saliendo con una pureza final que varía en promedio de 95 a 98%.<sup>2</sup>

En la figura 2.6 se muestra el flujo de aire a través de una membrana. En ésta se observa el flujo de la mezcla de aire y la permeación de los vapores de agua (color azul) y de oxígeno (color rojo), así como la salida final del nitrógeno.



Figura 2.6. Flujo de la mezcla de aire en una membrana (cortesía Weatherford)

Debido a la composición del aire, las impurezas residuales en el  $N_2$  están constituidas mayormente por  $O_2$  y en mínimo grado por vapor de agua y Argón.

Para mejorar la pureza o incrementar la capacidad de separación, según las necesidades, se pueden operar unidades en serie o en paralelo. Una baja pureza puede ser de 92% y una alta pureza (operando en serie) es del 99.5%, (Catálogo de la International Nitrogen Services, INS).<sup>2</sup>

En sus inicios, el  $N_2$  obtenido por el proceso de membranas se destinó principalmente al área de perforación, donde generalmente no se dispone de energía eléctrica, por tal motivo los accionadores de que disponen las unidades de membrana NPU, para comprimir el aire, son con base en motores de combustión interna, con las limitantes y ventajas que ello implica respecto al uso de motores eléctricos.<sup>2</sup>

## 2.3 TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS

En el ámbito internacional de la producción de nitrógeno líquido existen básicamente dos compañías importantes:

- Compañía weatherford
- Compañía nitropet-praxair

### 2.3.1 COMPAÑÍA WEATHERFORD

La tecnología de membranas de la compañía Weatherford, es la International Nitrogen Services, INS. Esta empresa ha estado suministrando este tipo de servicios, originalmente para perforación bajo balance, y a últimas fechas para el área de producción para coadyuvar al suministro de energía en el sistema de bombeo neumático, sustituyendo el gas natural por nitrógeno a partir del uso de membranas.

Esta compañía dispone de diversos arreglos para separación y suministro de  $N_2$  con membranas para instalaciones terrestres y marinas. Los arreglos, de acuerdo con el catálogo de equipos de INS son: Wolf Pack I, Wolf Pack II y Sea Wolf.<sup>4</sup>

Las capacidades de separación de  $N_2$  de las unidades de la compañía INS, van desde los 750 hasta los 3000 scf/min (1.08 a 4.32 MMPCD). Es importante tomar en cuenta

que, en promedio la relación de aire-N<sub>2</sub> es de 2 a 1, en otras palabras; por cada unidad de N<sub>2</sub> separado, se requiere de 2 unidades de aire. El proceso de separación de N<sub>2</sub> de esta compañía se ilustra en la siguiente figura. <sup>2</sup>

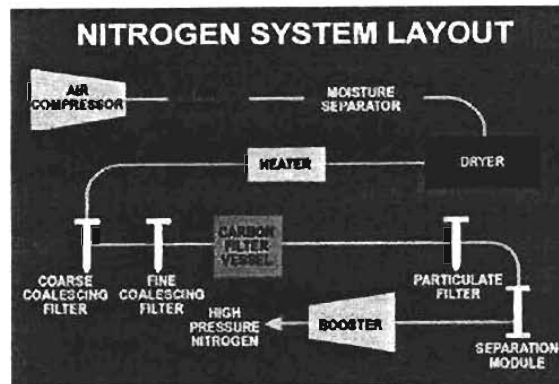


Figura 2.7. Proceso de separación de N<sub>2</sub> con membranas, compañía INS (cortesía Weatherford).

Un módulo de separación de membranas GENERON, de la compañía INS muestra más a detalle el proceso de separación de N<sub>2</sub> en la figura siguiente. En ésta se muestra la entrada del aire de alimentación, la cubierta del módulo, el arreglo de las membranas, la salida del oxígeno e impurezas y la salida de nitrógeno rico. <sup>2</sup>

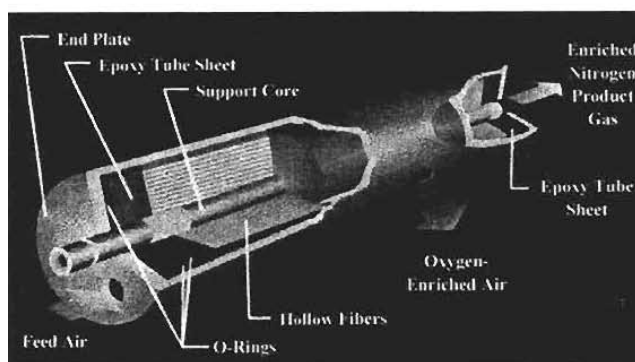


Figura 2.8. Módulo de separación de N<sub>2</sub> con membranas, compañía INS (cortesía Weatherford).

#### CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE LOS EQUIPOS <sup>4, 5</sup>

Con base en información de compañía Weatherford, así como en la página Web de la compañía INS (International Nitrogen Services, LLC), a continuación se resumen brevemente las características, capacidades, marca y dimensiones de la unidad de separación de nitrógeno in-situ y compresores de la compañía Weatherford.

En las siguientes figuras 2.9 y 2.10 se ilustran algunas unidades de membrana y paquetes de compresores de la compañía Weatherford. Unidades de membrana NPU: 1500 y 3000 pie<sup>3</sup>/min de N<sub>2</sub> @ 95% pureza promedio.



## NPU 1500



### Weights & Dimensions

Height: 8'  
 Width: 8'  
 Length: 20'  
 Weight: 24,000 #

### Inlet Air Requirements

Max. Air Inlet Flow: 3,000 scfm  
 Max. Air Temp: 125° F  
 Max. Air Pressure at Unit Inlet: 200 - 240 psi  
 Min. Air Pressure at Unit Inlet: 150 psi

### Performance Specification

Max. N<sub>2</sub> Flow Rate @ 3% O<sub>2</sub>: 1,500 scfm  
 Max. Inlet Pressure: 240 psi  
 Max. Outlet Pressure: Inlet pressure less unit P  
 Purity Range: 99% - 90% N<sub>2</sub> with O<sub>2</sub> Balance

Figura 2.9. Unidad de membranas NPU-1500, Weatherford - INS



## NPU 3000



### Weights & Dimensions

Height: 10' 9"  
 Width: 8' 6"  
 Length: 40'  
 Weight: 53,000 #

### Inlet & Specifications

Max. Air Inlet Flow: 6,000 scfm  
 Max. Air Temp: 125° F  
 Max. Air Pressure at Unit Inlet: 240 psi  
 Min. Air Pressure at Unit Inlet: 160 psi

### Performance & Specifications

Max. N<sub>2</sub> Flow Rate @ 5% O<sub>2</sub>: 3,000 scfm  
 Max. Inlet Pressure: 240 psi  
 Max. Outlet Pressure: Inlet pressure less unit ΔP  
 Purity Range: 99% - 90% N<sub>2</sub> with O<sub>2</sub> Balance

Figura 2.10. Unidad de membranas NPU-3000, Weatherford - INS



A continuación se presentan esquemas de compresores primarios:

**Weatherford**

**Quincy QSS 1500/200 Primary Compressor**

**Features and Benefits:**

- Aftercooled, direct drive, single stage helical screw compressor
- Pneumatically-actuated mechanical controls, automatic flow down at engine shut down, engine speed synchronized with compressor suction.
- Powered by Cummins QSS 19, computer-controlled, turbo-charged, four-stroke diesel engine.
- Meets or exceeds current emission standards.
- Noise level at less than 100 An-dBels, less than 100 dBA.
- Approximate fuel consumption = 5.5 lbs./hour @ 100%.
- Oilfield tested, rugged, easy maintenance, easy and safe to use.
- Fully customizable address community.



**Compressor Specifications:**

Make and Model	Quincy QSS 1500/200
Type	Single Stage Helical Screw
Drive	Direct Drive
Rated Capacity	1500 CFM
Maximum Full Load	200 PSIG
Discharge Pressure	200 PSIG
Maximum No Load	210 PSIG
Discharge Pressure	210 PSIG
Number of Air Chambers	1
Type Air Chamber	1 Stage, Dry integral
Type Cooling System	Air to Oil Fan & Water Cool
Total Oil Capacity	Exchange
Method of Lubrication	40 Gallon U.S. Pneumatic-Mechanical Automatic Blow Down At Engine Shut Down, Manual No Load Shut.
Method of Throttling	Engine Speed Synchronized with Compressor Suction

**Engine Specifications:**

Make and Model	Cummins QSS 19
Type	4 Cycle Diesel, Turbocharged
Number of Cylinders	6
Bore and Stroke	4.124 in. x 4.64 in.
Displacement	1150 cu. in.
Rated Horsepower @ 2000 RPM	600 HP
Full Load Speed	2160 RPM
Idle Speed	1200 RPM
Compressor Oil Capacity	12.5 Gallon U.S.
Coolant System Capacity	40 Gallon U.S.
Starter	24 Volt
Alternator	24 Volt (25 amp)
Electrical	2 - 12 Volt in Series - conforms to SAE Standard J2112

**Weights and Dimensions:**

Shipping Weight Approx.	20,300 lbs.
Width	76 in.
Length	277 in.
Height	100 in.

Note: All systems specifications and weights are subject to change without notice. Please contact Weatherford for complete technical specifications and performance data.



**Weatherford**

Drilling & Intervention Services

**Ingersoll-Rand XHP 900 / 350 Primary Air Compressor**

- Aftercooled, Direct Drive, Two-Stage Helical Screw Compressor.
- Rated 900 SCFM @ 350 PSI @ STP, Rated 380 BHP @ 1800 RPM.
- De-Rated 3% per 1000 Ft. Elevation.
- 325 PSI Deliverable Following Aftercooling.
- Pneumatic-Mechanical Controls, Automatic Blow Down at Engine Shutdown
- Engine Speed Synchronized with Compressor Suction.
- Powered By Caterpillar 3406 TA, Four-Cycle, Turbocharged Diesel Engine.
- Oilfield Skid Mounted, "Whisperized" For Sound Reduction.
- Weight = 18,000 Lbs., Width = 7' 4", Length = 17' 4", Height = 8' 10".

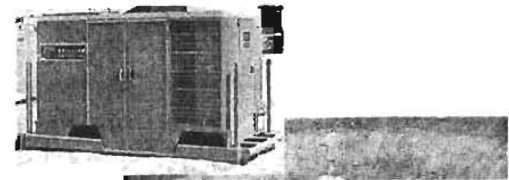


Figura 2.11. Compresores primarios Quincy 1500/200, e Ingersoll-Rand XHP 900/350

Tabla 2.2. Características de compresores Booster

Compresor Booster Joy WB-12, accionado por motor diesel, para comprimir N2 a la Pdesc requerida	Reciprocante Una etapa, dos etapas y simple o doble acción.	Psucc: 175 psi 3000 pie <sup>3</sup> /min @ 650 psi, descarga 2150 pie <sup>3</sup> /min @ 1400 psi, descarga 1550 pie <sup>3</sup> /min @ 1850 psi, descarga	585 hp @ 2100 rpm, consumo de comb. = .35 lb/hora/bhp	Peso = 12.7 ton tons. (28000 lbs), Ancho = 2.48 m (98 pg). Largo = 5.9 m (232 pg) Alto = 2.64 m (104 pg). (todo montado en patín) de 96" Alto x 96" Ancho x 240" largo
Compresor Booster Joy W-11, accionado por motor diesel, para comprimir N2 a la Pdesc requerida	Reciprocante Una etapa, dos etapas y simple o doble acción.	Psucc: 1500 psi 800 pie <sup>3</sup> /min @ 5000 psi, descarga	225hp @ 2100 rpm, rpm; 1800 combustible 12 gph @ 2100 rpm	Peso = 10 ton tons. (22000 lbs), Ancho = 2.18 m (98 pg). Largo = 5.9 m (232 pg) Alto = 2.9 m (114 pg). (todo montado en patín) de 96" Alto x 96" Ancho x 240" largo

Adicionalmente a los compresores primarios, unidad de membranas, compresores booster; es necesario disponer de una unidad de generación de energía eléctrica para servicios, un sistema de análisis y medición de flujo, además de sistema de control, tanque de almacenamiento de diesel, caseta para estancia de personal, caseta para herramientas, bomba contra incendio, etc.

### 2.3.2 COMPAÑÍA NITROPET-PRAXAIR

La compañía Praxair es una de las compañías de que suministran nitrógeno criogénico en México y su tecnología es reconocida a nivel mundial.

En el año de 1988 esta empresa con apoyo de su subsidiaria Nitropet ejecutaron un contrato de servicio de suministro de  $N_2$ , con el proceso de membranas para inyección a pozos depresionados del Activo de Producción Bellota Chinchorro en la Región Sur. Las unidades de membrana utilizadas en el contrato antes mencionado son marca NitroGEN.<sup>3</sup>

La tecnología de membranas de esta compañía, es en esencia la misma que la de Weatherford-INS. Se trata también de una fibra polimérica. Algunas diferencias que se observan entre las tecnología Weatherford y Nitropet-Praxair son por ejemplo que, ésta última solo se tiene equipo para instalaciones terrestres (no disponen de paquetes para ambiente marino) y los equipos son más voluminosos y de mayor peso que los de Weatherford.

La capacidad de producción y pureza (95% en promedio) del  $N_2$ , de igual manera, es similar a la de Weatherford, asimismo los accionadores de los compresores son también motores de combustión interna a diesel; la potencia requerida en el sistema depende del volumen de nitrógeno y de la presión de inyección requeridos; se pueden suministrar hasta 5000 psi de descarga. La pureza se puede mejorar operando unidades en serie.<sup>3</sup>

En las siguientes figuras se muestran las características del proceso de membranas de la compañía Nitropet-Praxair.



Figura 2.12. Esquema del material de las membranas; Cía. Nitropet Praxair.

---

---

## 2.4 ANTECEDENTES DE PRUEBAS REALIZADAS EN LA REGIÓN SUR

Con base en un contrato establecido entre PEP y la compañía NITROPET, en el año de 1998 se llevaron a cabo, en pozos de los campos Bellota (pozos 136, 138 y 158D) y Mora (pozo 41), una serie de pruebas de bombeo neumático inyectando nitrógeno in-situ, empleando equipo de separación de membranas. El equipo utilizado fue el siguiente. <sup>6</sup>

Dos compresores primarios de tornillo marca Dresser Rand con motores de combustión a diesel marca Caterpillar de 500 hp con un peso de 40 toneladas cada uno.

Unidades de membrana de película polimérica, de tres pasos, marca Praxair. Con peso de 7 toneladas cada una, con capacidades de 20 y 40 m<sup>3</sup> std/min (1.017 y 1.034 MMPCD).

Compresores recíprocantes (booster) marca Dresser Rand de 750 hp con motor de combustión a diesel marca Waukesha de 2500 psi., con un peso total de 50 ton., tanques de diesel, sistema de medición, sistema de comunicación, sistema de instrumentación, tuberías, válvulas, conexiones, equipo de seguridad y demás servicios auxiliares.

La prueba inició oficialmente el 21 de marzo de 1998 con la inyección de N<sub>2</sub> a los pozos Bellota 138, 138 y 158D, para lo cual fue necesario construir una red de inyección para interconectar dichos pozos. Con el equipo anterior se produjeron 2 MMPCD de N<sub>2</sub> para inyectarse a los pozos antes citados, a una presión de operación máxima esperada de 1600 psi; la presión disponible en el sistema era de 2000 psi. De acuerdo al diseño y la distribución de los 2 mmpcd de nitrógeno, se calculó un incremento de producción de 3725 bpd de aceite. <sup>6</sup>

El 30 de septiembre 1998 salen de operación el sistema de membranas por problemas en CPQ Cactus causado por la posible formación de azufre debido a las impurezas del nitrógeno, por la reacción del O<sub>2</sub> residual con H<sub>2</sub>S libre en el gas producido, sin embargo esto no se corroboró.

A continuación se muestran los arreglos de equipo utilizado en el cabezal Bellota <sup>3</sup>.



Figura 2.13. Arreglo compresor primario – NPU.

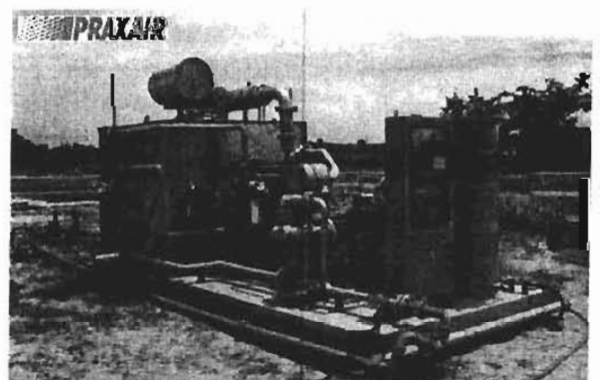


Figura 2.14. Arreglo de compresor booster con medición de flujo.

---

---

## 2.5 DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO NEUMÁTICO CONTINUO

Como se menciona anteriormente el bombeo neumático continuo (BNC), consiste en inyectar, gas a alta presión, en forma continua a la tubería de producción. Dicho gas al integrarse a la corriente de fluidos, provenientes de la formación productora, provoca una disminución en la densidad de la mezcla de los fluidos que fluyen a través de la tubería de producción. El efecto es un aligeramiento de la columna de fluidos, desde el punto de inyección hasta la superficie, ocasionando una reducción en la presión de fondo fluyendo. Como consecuencia de esta reducción de presión, la formación productora responde con una mayor aportación adicional de fluidos, dando como resultado un incremento en la producción del pozo.<sup>7</sup>

La operación de un pozo con bombeo neumático continuo es muy similar a la que tendría un pozo fluyente. La diferencia radica en que la relación gas líquido cambia en el punto donde se inyecta el gas a la tubería de producción.

El gas inyectado contribuye a mover los fluidos hasta la superficie por alguna de las siguientes causas, o su combinación:

- Reduciendo la presión que ejerce la carga de la columna de fluido sobre la formación, por la disminución de la densidad del fluido.
- Por la expansión del gas inyectado y el desplazamiento del fluido.

La inyección de gas puede realizarse a través de una perforación (Puncher) en la T.P., una válvula calibrada o una T.F. colgada. El uso de válvulas permite un mejor control del volumen de gas de inyección requerido, así como de la aplicación de la presión disponible. Por lo anterior, el uso de mandriles con válvulas de B.N es el método de mayor aplicación en el mundo.

### 2.51 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO<sup>8</sup>

El diseño de aparejos de bombeo neumático se realiza desarrollando los siguientes puntos básicos:

- a) Determinación del punto de inyección.
- b) Cálculo de la presión de fondo fluyendo.
- c) Espaciamiento de válvulas.
- d) Cálculos de diámetros de orificios de las válvulas.
- e) Presiones de calibración de las válvulas.

Cabe mencionar que se manejan dos métodos para el espaciamiento de válvulas:

- Método Universal.
- Método de gradiente de presión variable.

a).- Establecer la profundidad del punto de inyección en una instalación de bombeo neumático es de vital importancia, ya que en este punto quedará ubicada la válvula operante o válvula de inyección y, una vez descargado el fluido de control del pozo, deberá ser la única válvula que inyecte gas a la tubería de producción.

Después se obtiene con un método de flujo multifásico, el gradiente de presión fluyendo por la tubería de producción, a partir de la presión fluyendo en la cabeza del pozo y considerando en la relación gas-líquido, el volumen de gas inyectado.

La línea de gradiente del gas de inyección, se obtiene considerando el peso de la columna de gas, a partir de la presión de operación del gas de inyección en la cabeza del pozo.

Para llegar a determinar el punto de inyección se requiere primero establecer el punto de balance o el punto definido por la intersección de la línea de gradiente de gas de inyección y la línea de gradiente de presión fluyendo por la tubería de producción, para un gasto dado como se muestra en la figura 2.15.

El punto de inyección se localiza arriba del punto de balance al dejar una diferencia de presión entre el espacio anular y la tubería de producción. Según la literatura técnica, este valor puede variar entre 100 y 250 lb/pg2, diferencia que representa la caída de presión a través de la válvula de inyección en condiciones de operación.

Cuando existe alguna restricción física para colocar el punto de inyección a la profundidad de diseño, ya sea por un empacador permanente o una boca de liner, el programa fija la profundidad del punto de inyección, 20 m arriba de este límite.

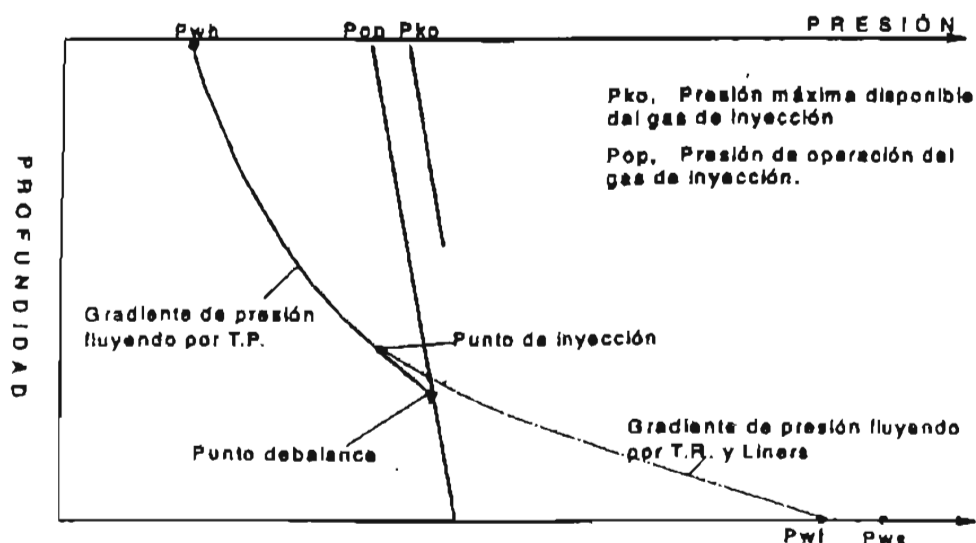


Figura 2.15. Punto de inyección

b).- Una vez determinada la profundidad del punto de inyección, se procede a calcular la presión de fondo fluyendo del pozo.

A partir del punto de inyección y considerando la relación gas líquido natural de la formación, se calcula con el método seleccionado de flujo multifásico el gradiente de presión fluyendo abajo de este punto, véase figura 2.15.

Para ello, es necesario considerar todos los cambios de diámetro que se presentan desde el punto de inyección hasta la profundidad del intervalo productor. A esta profundidad se tendrá la presión de fondo fluyendo del pozo para un gasto dado.

Para determinar el gasto que se producirá con el sistema de bombeo neumático, deberá recurrirse a los datos de una prueba de producción y al método de Vogel o de la Curva Generalizada, para generar la curva de comportamiento de flujo al pozo más conocida como IPR (Inflow Performance Relationship )

Se recalcula la presión de fondo fluyendo como se describió antes, empleando como primer gasto la décima parte del 70 % del potencial del pozo. Con incrementos constantes en el gasto se calculan las presiones de fondo fluyendo correspondientes. Véase la figura 2.16.

En la figura 2.17 se muestra un diagrama gasto-presión de fondo fluyendo, en donde se grafican los resultados anteriores, hasta intersectar la curva de comportamiento de flujo al pozo. Esta intersección representa la producción que aportará el pozo con el aparejo de bombeo neumático. Con este gasto se determina el punto de inyección definitivo, que será el que realmente se establece al operar dicho aparejo.

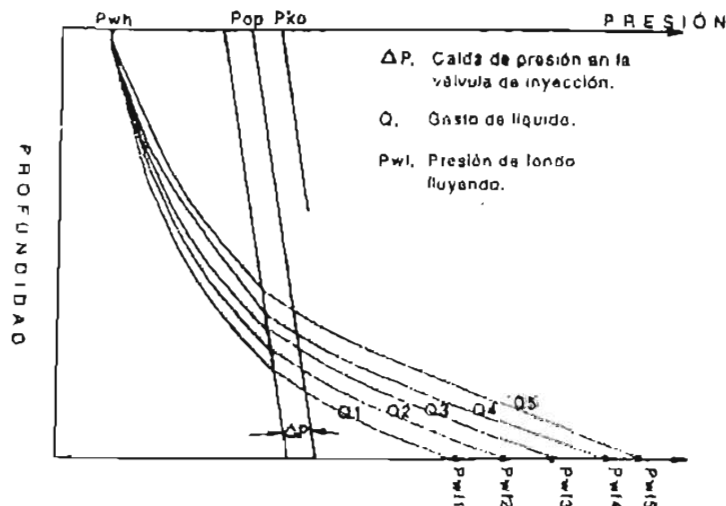


Figura 2.16 Presión de fondo fluyendo

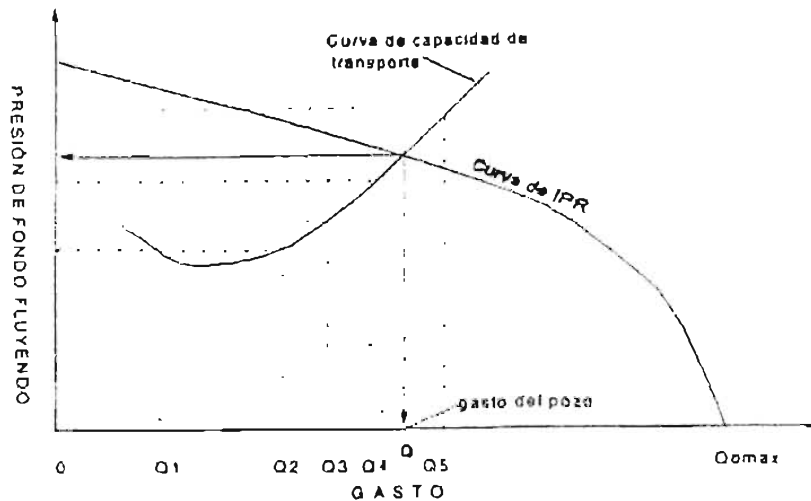


Figura 2.17 Determinación de la producción de un pozo con BN

c).- El paso a seguir será determinar el espaciamiento de válvulas, con un programa de cómputo, se selecciona uno de los métodos de diseño disponibles. Por ejemplo, el método de diseño universal, propuesto por el Dr. Kermit E. Brown, consiste en lo siguiente:

El método consiste en establecer tres líneas base, ver figura 2.18. Método universal de espaciamiento de válvulas de bombeo neumático.

1. Línea de gradiente del gas de inyección partiendo de la presión máxima disponible (Gr1).
2. Línea de gradiente del gas de inyección partiendo de la presión de operación (Gr2).
3. Línea de gradiente de diseño (Gr3)

Las dos primeras líneas se obtienen considerando el peso de la columna de gas. La línea de gradiente de diseño se obtiene al unir el punto que corresponde a la presión de descarga en la cabeza del pozo  $P_{wh}$  más 200 lb/pg<sup>2</sup> con el punto de inyección.

A partir de la  $P_{wh}$  y con el gradiente del fluido de control del pozo  $Gr_{fc}$ , se encuentra la intersección con Gr1; punto que corresponde a la profundidad de la primera válvula.

De esa profundidad, y a partir de esta línea de gradiente de diseño Gr3, con el gradiente de fluido de control se traza una línea hasta interceptar Gr2. Este punto corresponde a la profundidad de la segunda válvula.

Para determinar la profundidad de las demás válvulas, se repite el procedimiento descrito en el párrafo anterior hasta llegar al punto de inyección donde quedará ubicada la última

válvula. El método universal de espaciamento contempla que la distancia entre dos válvulas no sea menor de 250 pies, si esto sucede el programa hace un re-espaciamento de válvulas.

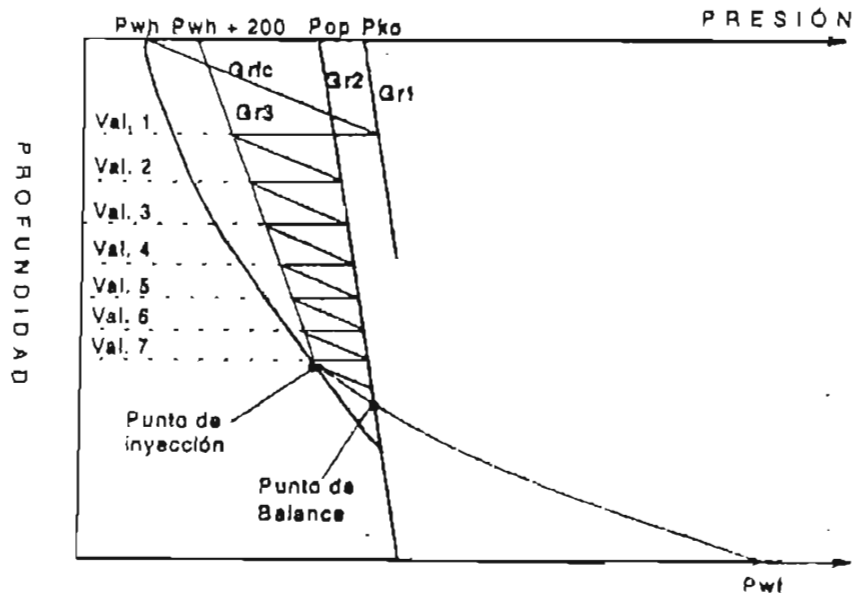


Figura 2.18 Método universal de espaciamento de válvulas de BN

d).- El diámetro de orificio que es necesario determinar, es el de la válvula de inyección, ya que este mismo diámetro se selecciona para el resto de las válvulas. Esto se hace con el propósito de evitar interferencia entre ellas, durante el proceso de descarga del fluido de control.

Para determinar el diámetro de orificio de la válvula de inyección se despeja la ecuación de Cook-Dotterweich, que se muestra a continuación:

$$q_g = \frac{155.5 C_d A p_1 \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \left( r^{2/k} - r^{(k+1)/k} \right)}}{\sqrt{\gamma_g T}}$$

Donde:

$k$ ,  $C_p/C_v$  es la relación de calores específicos.

$r$ ,  $p_2/p_1 \geq r_o$

$r_o$ ,  $(2/k + 1) k/k(k-1)$  es la relación de presiones para flujo crítico.

$T$ , temperatura en °F.



---

---

$A_p$ , área de la tubería en pie<sup>2</sup>

Cabe mencionar que el diámetro de orificio de la válvula de inyección es función entre otras variables del volumen de gas que se pretende inyectar, de la diferencia de presión que se establezca entre la tubería de revestimiento-producción y la temperatura a la profundidad del punto de inyección.

Por otra parte, debe señalarse que el diseño de una instalación de bombeo neumático, se hace para un determinado volumen de gas de inyección, por lo que si se inyectan volúmenes mayores de gas, puede provocarse la apertura de una o más válvulas superiores, en deterioro de la eficiencia de la instalación.

e).- Una vez determinada la profundidad de colocación de las válvulas y el diámetro de orificio de éstas, se procede a calcular la presión de calibración correspondiente.

Debe pensarse en aprovechar al máximo, la presión de inyección y al mismo tiempo, asegurar la apertura de las válvulas en la condición más crítica, con la presión del gas disponible. Para esto se establecerá el siguiente procedimiento:

1. - Determinación del peso de una columna estática de gas según Brown:

$$P_2 = P_1 \text{ Exp } [(0.01877 \gamma_g L) / T Z]$$

Como el factor de compresibilidad  $Z$  es función de presión y temperatura medias, la solución de la ecuación se convierte en un proceso iterativo.

- Siendo una primera aproximación de  $P_2$  la siguiente ecuación:

$$P_2 = P_1 [ 2.5 (P_1 / 100) (L/1000) ]$$

Considerando el peso de la columna de gas y la presión máxima disponible del gas de inyección, se calcula la presión a la profundidad de la primera válvula, tomando este valor como la presión de apertura de la válvula a condiciones de operación  $P_{v01}$  es decir:

$$P_{v01} = P_{ko} + \text{Peso de la columna de gas.}$$

2.- Tomando en cuenta las características de la válvula, se determina la presión de cierre a condiciones de operación  $P_{vc1}$ , usando la siguiente expresión:

$$P_{vc1} = P_{v01} [ 1 - (A_v/A_b) ]$$

3. Restando al valor anterior el peso de la columna de gas, se obtiene la presión superficial de cierre de la primera válvula  $P_{sc1}$ , lo que se representa como

$$P_{sc1} = P_{vc1} - \text{Peso de la columna de gas}$$

4. Restando 10 lb/pg<sup>2</sup> al valor anterior, se obtiene la presión superficial de cierre de la segunda válvula  $P_{sc2}$ .

---

---

---

---

$$P_{sc2} = P_{sc1} - 10$$

5. Considerando el peso de columna de gas y el valor anterior, se calcula la presión de cierre de la segunda válvula a condiciones de operación  $P_{vc2}$

$$P_{vc2} = P_{sc2} + \text{Peso de la columna de gas}$$

6. La presión superficial de cierre del resto de las válvulas se obtiene al restar 10 lb/pg<sup>2</sup> de la presión superficial de cierre de la válvula anterior.

$$P_{scn} = P_{sc(n-1)} - 10$$

donde:  $n = 1, 2, 3, \dots$

7. La presión de cierre a condiciones de operación se calcula considerando el peso por columna de gas.

$$P_{vcn} = P_{scn} + \text{Peso de la columna de gas}$$

8. La presión de cierre de las válvulas a condiciones de taller  $P_{cn}$  se obtiene corrigiendo por temperatura la presión de cierre a condiciones de operación  $P_{vcn}$ . Esto se hace exclusivamente para las válvulas con domo de nitrógeno:

$$P_{cn} = P_{vcn} \times Ct$$

Las válvulas con resorte no son afectadas por la temperatura, por lo tanto:

$$P_{cn} = P_{vcn}$$

9. Finalmente la presión de apertura de las válvulas a condiciones de taller se calcula con los valores obtenidos en el paso anterior, utilizando la siguiente expresión:

$$P_{on} = P_{cn} / (1 - [Av/Ab])$$

Si se sigue este procedimiento, se puede tener la seguridad de que no exista interferencia entre válvulas, durante el proceso de descarga del pozo, teniendo la seguridad de que éstas abrirán con la presión del gas disponible, aún sin carga en la T.P., e independientemente del diámetro de orificio que se esté empleando.

Actualmente existen programas de cómputo que permiten analizar y predecir el comportamiento de pozos fluentes, o con bombeo neumático, así como obtener el diseño de la instalación con el tipo y marca de válvula deseada.

En dichos programas, el diseño de BN se simplifica considerablemente, es necesario seleccionar un método de flujo multifásico, para el cálculo del perfil de presión y suministrar las propiedades de los fluidos a condiciones de flujo, las cuales se obtienen a partir de un análisis PVT o en su defecto con correlaciones.

### 3.0 INFRAESTRUCTURA DEL CAMPO BATAB

El campo Batab pertenece al Activo de Explotación Pol-Chuc de la Región Marina Suroeste. Su localización geográfica es sobre la plataforma continental del golfo de México, aproximadamente a 90 kilómetros al noreste de Dos Bocas, Tabasco. El tirante de agua es de 50 metros.

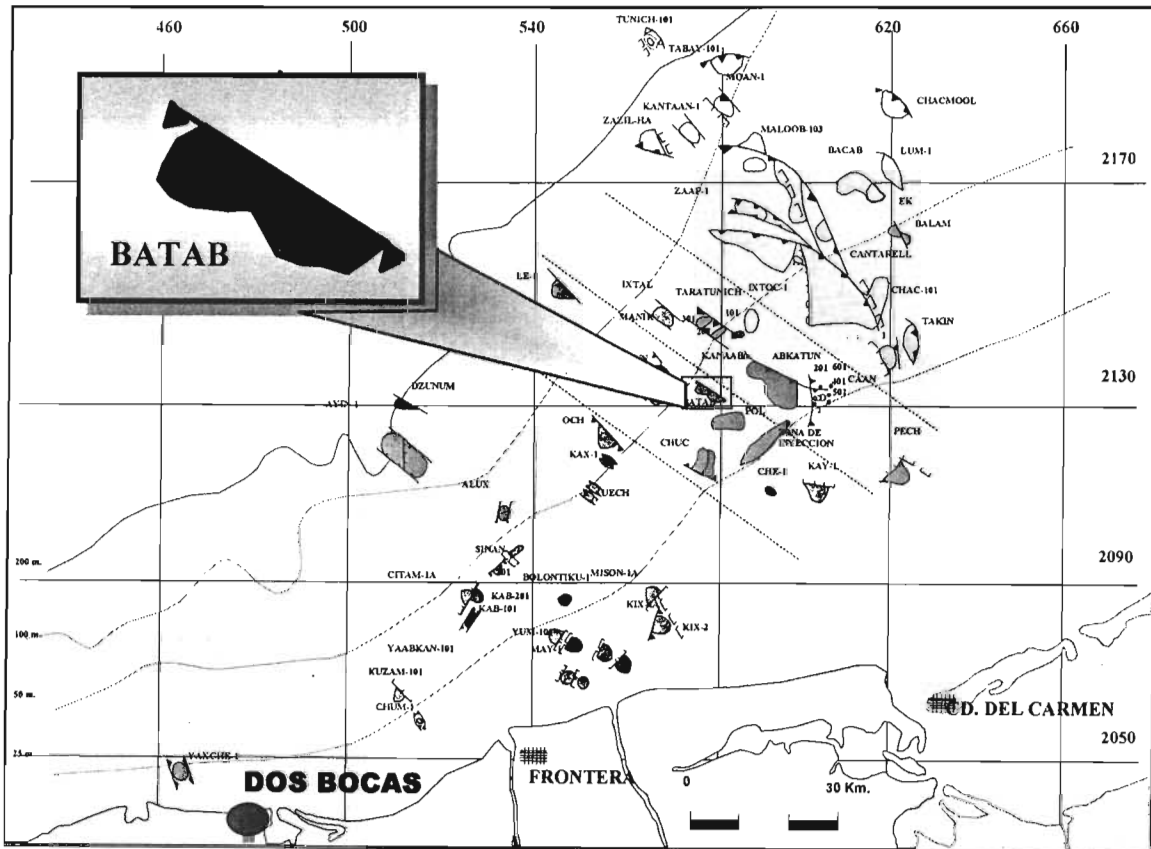


Figura 3.1. Ubicación del campo Batab (Pemex Activo Pol Chuc)

Las plataformas y pozos que conforman al campo Batab son:

Plataforma Batab-1A: Pozos-1A y 3

Plataforma Batab-A: Pozos-11, 13, 21, 21D, 23 y 210.

### 3.1 ESPACIO DISPONIBLE EN PLATAFORMA

Las plataformas cuentan con las siguientes distribuciones de espacio, los cuales se muestran continuación

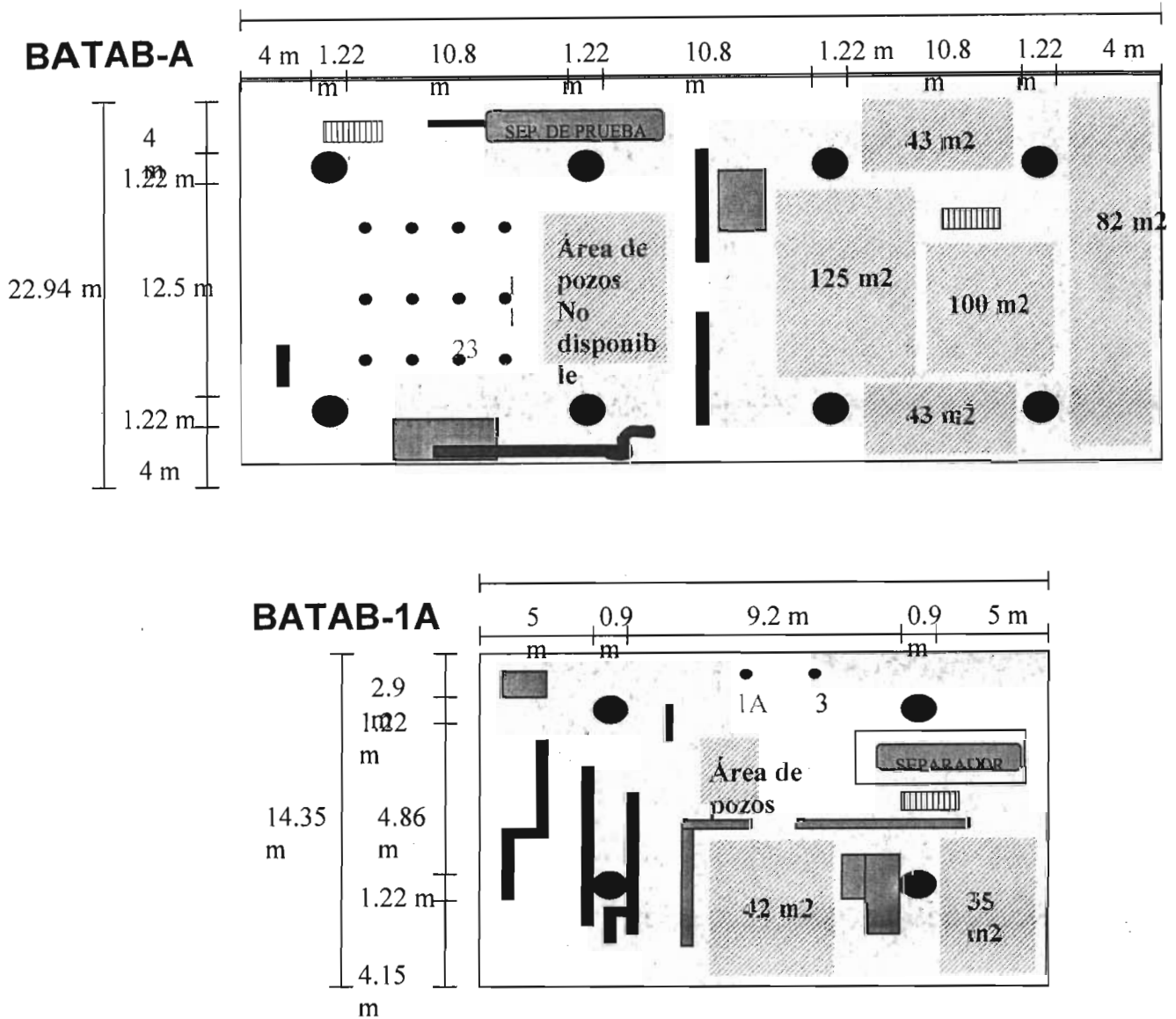


Figura 3.2. Área disponible en las plataformas Batab A y 1A

Como se observa en las figuras anteriores la plataforma batab A es la que cuenta con el mayor espacio disponible aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, y la plataforma Batab 1A cuenta solamente con 77 m<sup>2</sup> aproximadamente el 20% del espacio disponible en la plataforma Batab A.

Por tal motivo se considerara a la plataforma Batab A como la primera candidata para la instalación del sistema de generación de nitrógeno.

### 3.2 REQUERIMIENTO DE EQUIPO

Con base en el análisis de los espacios disponibles en la plataforma Batab A y Batab 1A y en los requerimientos de espacios y pesos del equipo para el sistema de generación e inyección de nitrógeno, se determinó que solo es posible generar un máximo de 2 MMPCD de nitrógeno, recordando que para esto es necesario comprimir en promedio 4 MMPCD de aire. Al considerar un equipo de mayor capacidad (3 mmpcd de nitrógeno) se requiere de 6 mmpcd de aire y no es factible distribuir e instalar los equipos en el espacio disponible en la plataforma Batab A.

A continuación se muestra una tabla donde se indica el equipo por cada una de las compañías Weatherford y Nitropet-Praxair; necesario para generar 2 MMPCD de N<sub>2</sub> así como la infraestructura mínima requerida para su operación en plataforma.

Tabla 3.1. Equipo para la generación de nitrógeno <sup>3, 4, y 5</sup>

EQUIPO Praxair	CAPACIDAD	POTENCIA REQUERIDA HP	DIMENSIONES DE AREA				PESO TON	PRESION SUCC. (PSI)	PRESION DESC. (PSI)
			LARGO M	ANCHO M	ALTO M	AREA M2			
2 Compresor Primario (505 hp/unidad)	2.15 mmpcd	1010	8	5.5	—	88.0	74	14.7	150
Compresor Boster	2.15 mmpcd	750	8	5.5	—	44.0	42	150	2200
NPU (Nitrógen Membrane Unit)	2.15 mmpcd		2.5	3	—	7.5	7	400	360
Generador de Energía	110-220 VCD	150	2.5	1	2	2.5	2		
Dog huose ( Herramientas)			6	2.5	—	15	10		
Area de personal			6	2.5	—	15	—		
Tanque de almacenamiento de diesel (estimado)	50000 lts			4 Ø	4	12.5	59		
Bomba contra incendio (estimado)			5	2.5	3	13	—		
<b>Total</b>		<b>1910</b>				<b>197</b>	<b>194</b>		

EQUIPO Weatherford	CAPACIDAD	POTENCIA REQUERIDA HP	DIMENSIONES DE AREA				PESO TON	PRESION SUCC. (PSI)	PRESION DESC. (PSI)
			LARGO M	ANCHO M	ALTO M	AREA M2			
4 Compresor Primario Ingersoll 900 (350 hp/unidad)	1.29 mmpcd	1520	5.4	2.24	2.7	48.4	32.8	14.7	350
2 Compresor WB-12Air Pressure Booster (585 hp/unidad)	2.23 mmpcd	585	6	2.5	2.64	30	17	165	1850
NPU 1500 (Nitrogen Membrane Unit)	2.16 mmpcd		6	2.5	2.35	15	18	200	175
Generador de Energía 110-220 V	440 VCD	100	2.5	1	2	2.5	2		
Dog huose ( Herramientas)			6	2.5	—	15	10		
Area de personal			6	2.5	—	15	—		
Tanque de almacenamiento de diesel (estimado)	60000 lts			4 Ø	4	12.5	67		
Bomba contra incendio (estimado)			5	2.5	3	13	—		
<b>Total</b>		<b>2205</b>				<b>161</b>	<b>147</b>		

De la tabla anterior se advierte que el equipo de Nitropet-Praxair es de mayor peso y requiere mayor área (no se consideran los espacios necesarios entre los equipos para su operación), respecto a la potencia requerida ésta es menor que la de Weatherford en 105 hp.

También se observa que el equipo que ocupa el mayor espacio, y tiene mayor peso, corresponde al sistema de compresión, tanto los compresores primarios, que comprimen el aire para alimentarlo a la unidad de membranas, como el de compresión booster que se utiliza para comprimir e inyectar el N<sub>2</sub> a los 120 kg/cm<sup>2</sup> que requieren los pozos.



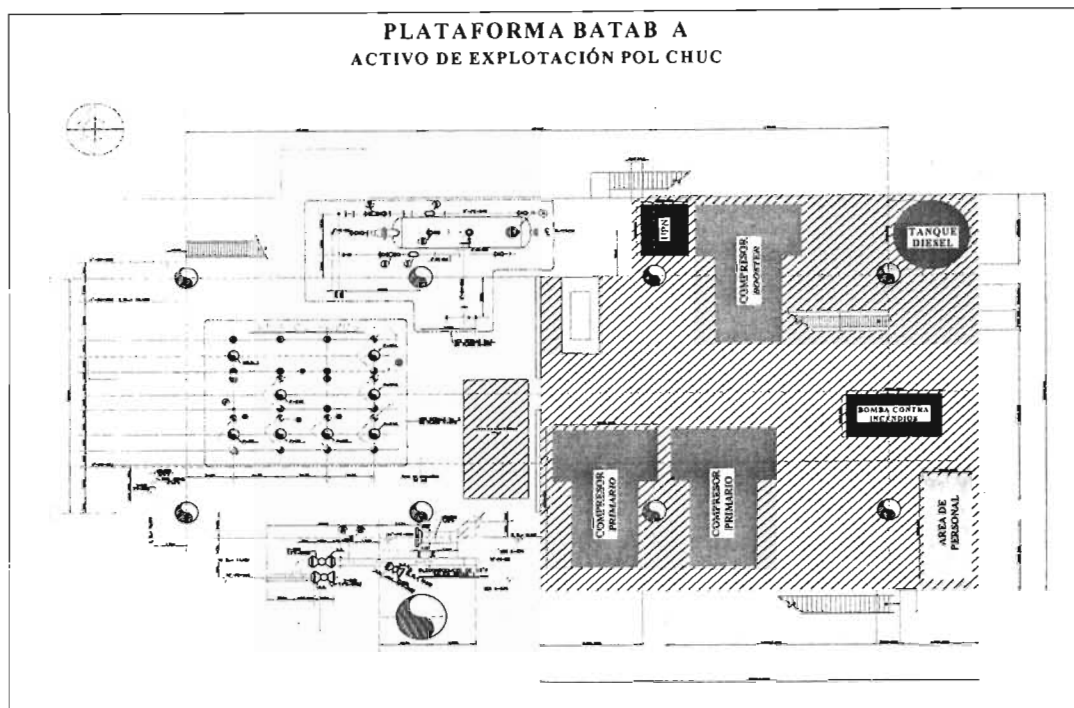


Figura 3.4. Distribución del equipo Praxair en la plataforma Batab A.

Debido a la gran cantidad de infraestructura requerida para la obtención del nitrógeno y las limitaciones de peso y espacio disponibles en plataforma, tan solo es posible disponer de un volumen de 2 mmpcd, con pureza de alrededor de 95%.

Lo anterior implica la necesidad de analizar el potencial productor de los pozos, simulando para condiciones actuales y futuras, la inyección de diferentes volúmenes de inyección de  $N_2$ . Con esto será posible determinar en que pozos y con que volumen de inyección se obtienen los mayores incrementos de producción para el periodo de análisis de dos años.

#### 4.0 ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE LOS POZOS A LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN LA PLATAFORMA BATAB A

El campo Batab Geológicamente se ubica en la provincia marina de Coatzacoalcos. Se divide en dos yacimientos cuyas edades pertenecen al jurásico superior Kimmeridgiano (JSK) y a la brecha del Paleoceno-Cretácico superior (BPKS) La roca almacenadora la constituyen calizas dolomitizadas del yacimiento del jurásico superior y una brecha de carbonatos del cretácico superior. Son yacimientos de aceite bajo saturado con mecanismo de empuje hidráulico que producen aceite ligero con una densidad de 32° API.<sup>9</sup>

El campo es un anticlinal alargado con orientación noroeste, que denota el estilo estructural de tipo compresivo, se encuentra afectado en sus flancos norte y sur por fallas inversas con orientación casi paralela al eje mayor de la estructura; y al noroeste por una intrusión salina.<sup>9</sup>

La extensión del campo es de 9.2 kilómetros cuadrados. Hasta la fecha se han perforado 11 pozos, con un espaciamiento de 800 metros. Todos han producido de forma intermitente, los que más han podido permanecer en operación son el Batab-1A y 3. Actualmente, después de realizar las conversiones de los pozos y aprovechando la infraestructura disponible se han realizado limpiezas e inducciones por el espacio anular, con el aparejo de BN, con lo cual algunos de ellos han vuelto a incorporarse a producción en forma natural.<sup>9</sup>

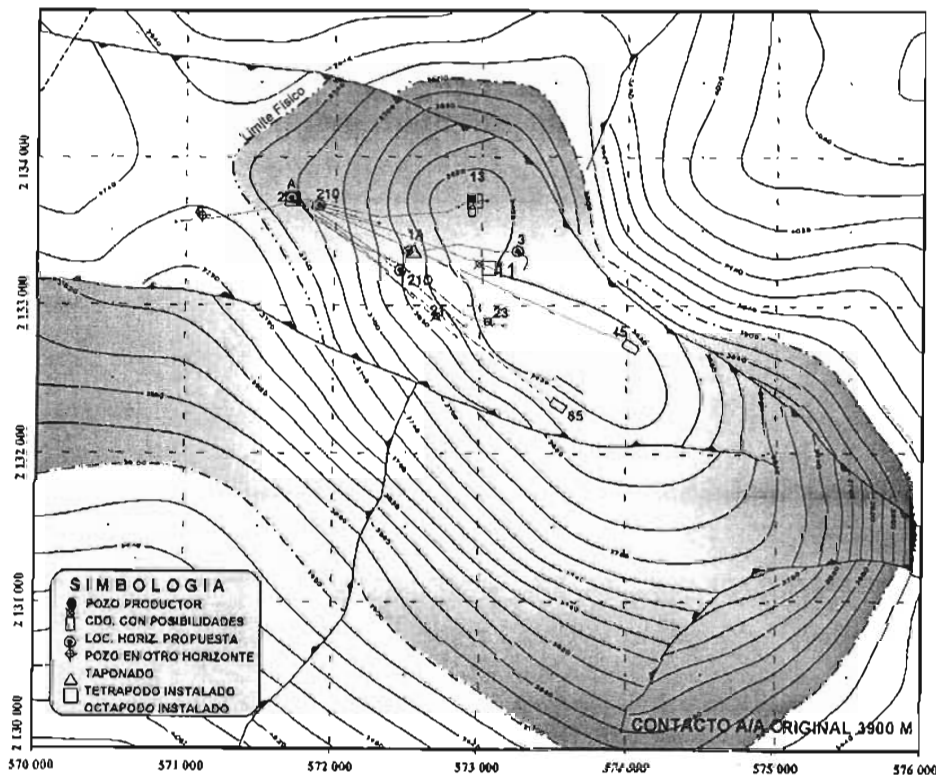


Figura 4.1. Ubicación de pozos en el campo: (Pemex Activo Pol Chuc)



A continuación se presentan las presiones promedio del campo.

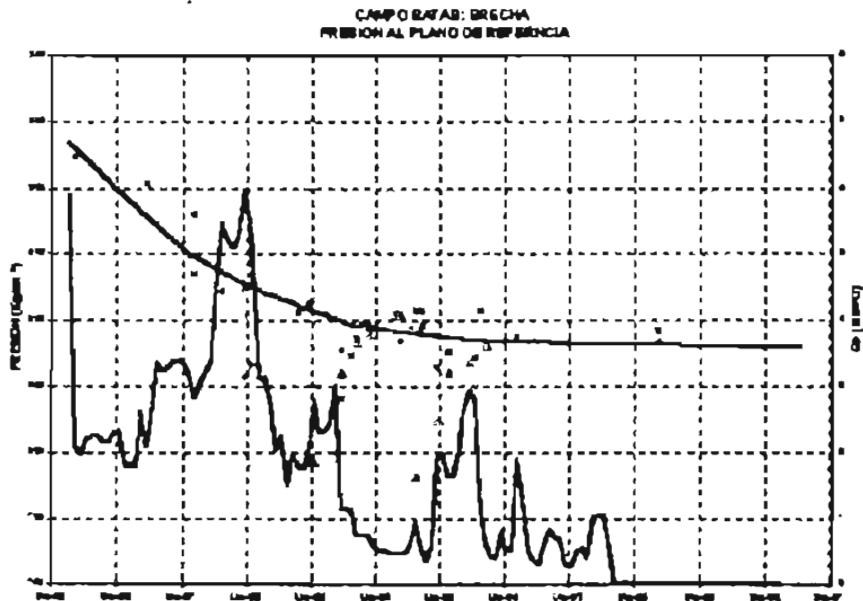


Figura 4.2. Presión promedio de la formación Brecha del Paleoceno (Pemex Activo Pol Chuc)

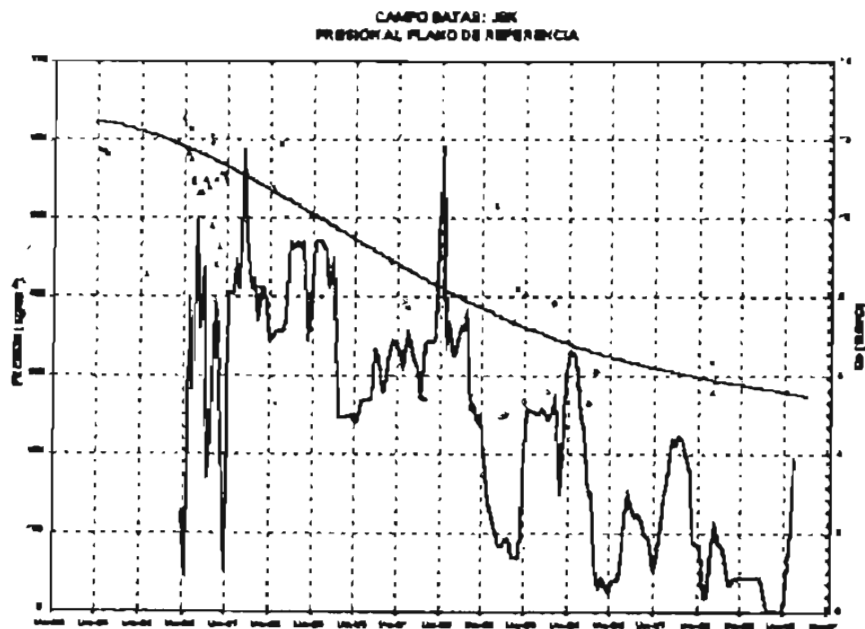


Figura 4.3. Presión promedio de la formación Jurásico (Pemex Activo Pol Chuc)

---

---

#### 4.1. HISTORIAL DE LOS POZOS <sup>9 y 10</sup>

##### BATAB 11

La perforación se inició el 23 de agosto de 1992 y culminó el 19 de noviembre del mismo año, efectuando la terminación del 21 de noviembre al 5 de diciembre de 1992, disparando el intervalo 4,165-4,190 m, perteneciente a la formación Brecha Paleoceno (BP).

El 17 de enero de 1994 se le efectuó una estimulación con 40 m<sup>3</sup> de HCl al 15%.

Del 22 de julio al 3 de agosto de 1995 se redisparó el intervalo y estimuló con ácido PAD nitrogenado.

Del 5 al 19 de diciembre de 1995 se realizó cambio de aparejo a 3 1/2" – 2 7/8" y estimuló con ácido PAD nitrogenado.

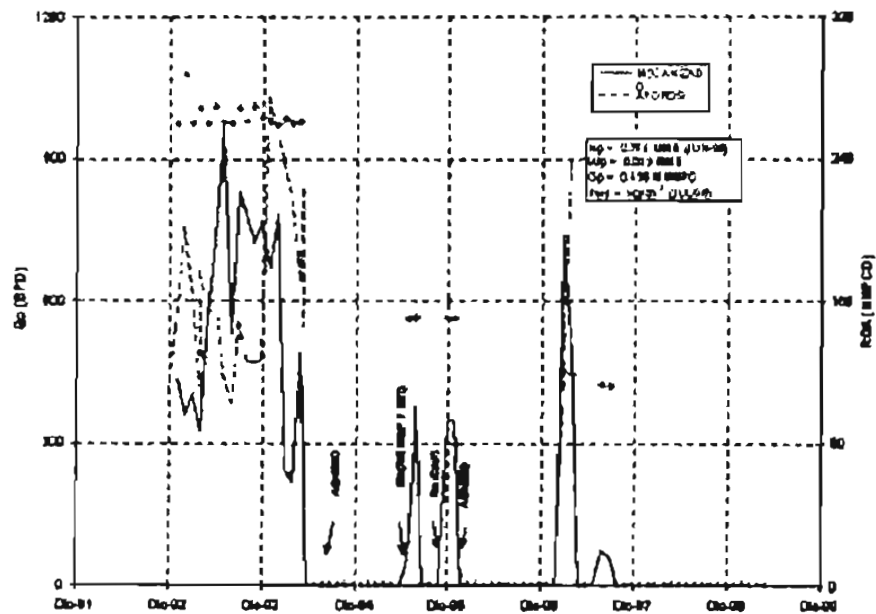


Figura 4.4. Historia de producción del pozo Batab-11. (Pemex Activo Pol Chuc)

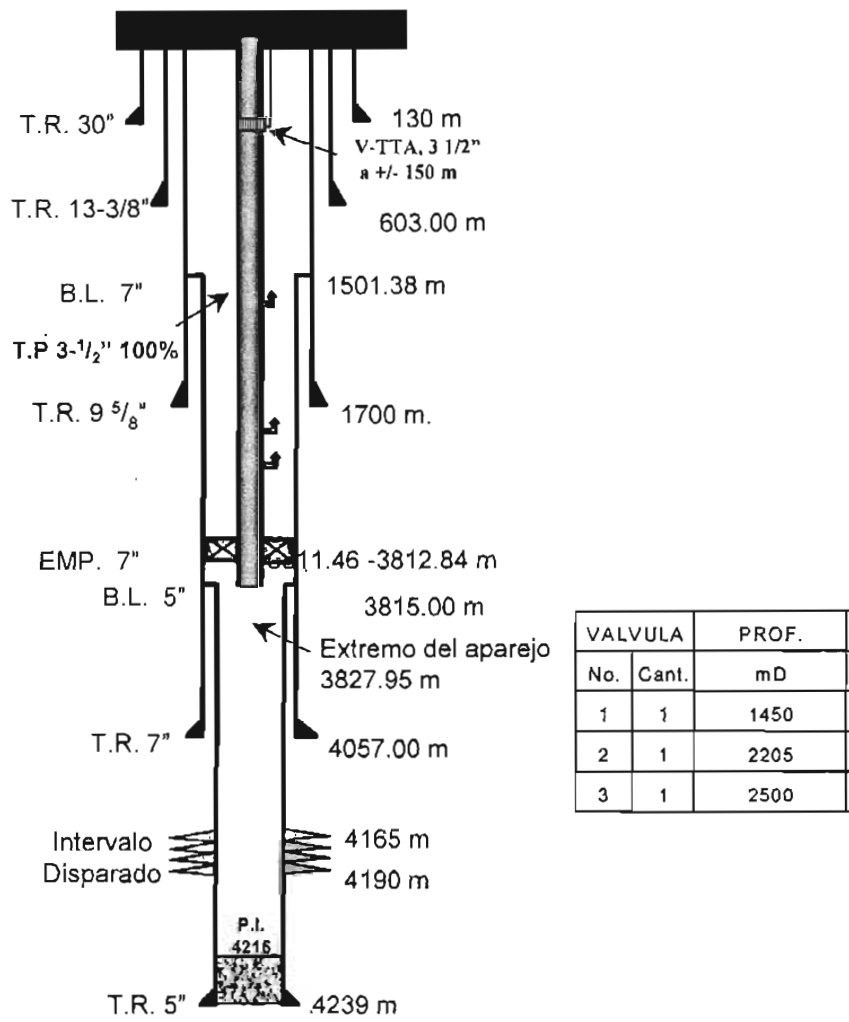


Figura 4.5. Estado mecánico del pozo Batab-11 (Pemex Activo Pol Chuc)

## BATAB-13

El 20 de octubre de 1991 se inició la perforación de este pozo y culminó el 15 de marzo de 1992, efectuando la terminación del 15 al 20 de marzo de 1992, disparando el intervalo 4,090-4,115 m, perteneciente a la formación Brecha Paleoceno (BP).

El 8 de mayo de 1994 se encontró el pozo abatido con último dato de producción de agua de 0.6% y con salinidad de 220,000 ppm.

El 9 de julio de 1995 se efectúan trabajos de línea de acero, para registros de presión por estaciones, encontrando a 161 m resistencia por depositación de material orgánico, bajando cortador hasta 4960 m.

El 16 de julio se realizó estimulación al intervalo 4,925-4,950 m, bombeó precolchón con 1,000 m<sup>3</sup> de nitrógeno más 10% de sistema OSA, más 5 m<sup>3</sup> de ácido PAD. Se abrió pozo a quemador desalojando productos de estimulación, gas y aceite, efectuando nuevamente registro de presiones de fondo cerrado por estaciones.

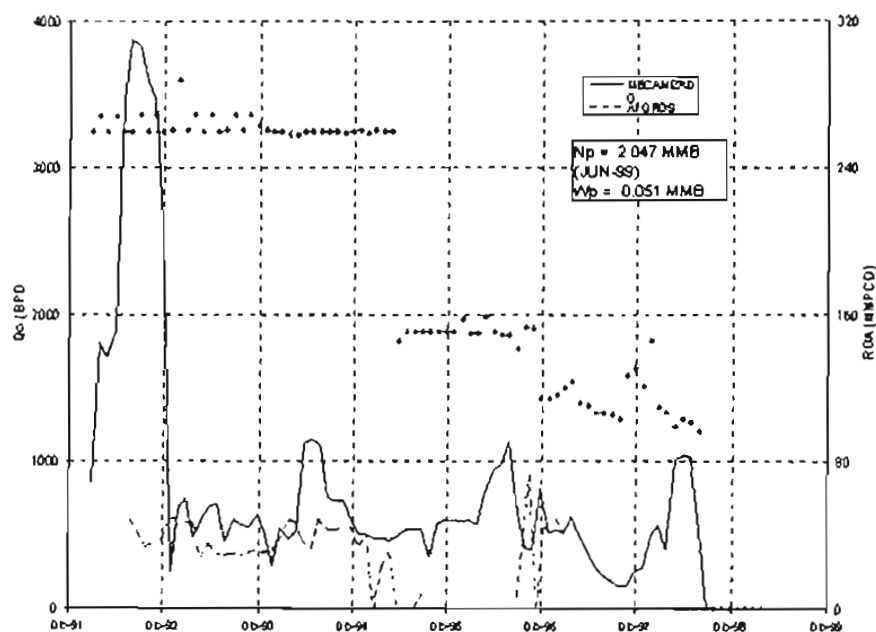


Figura 4.6. Historia de producción del pozo Batab-13 (Pemex Activo Pol Chuc)

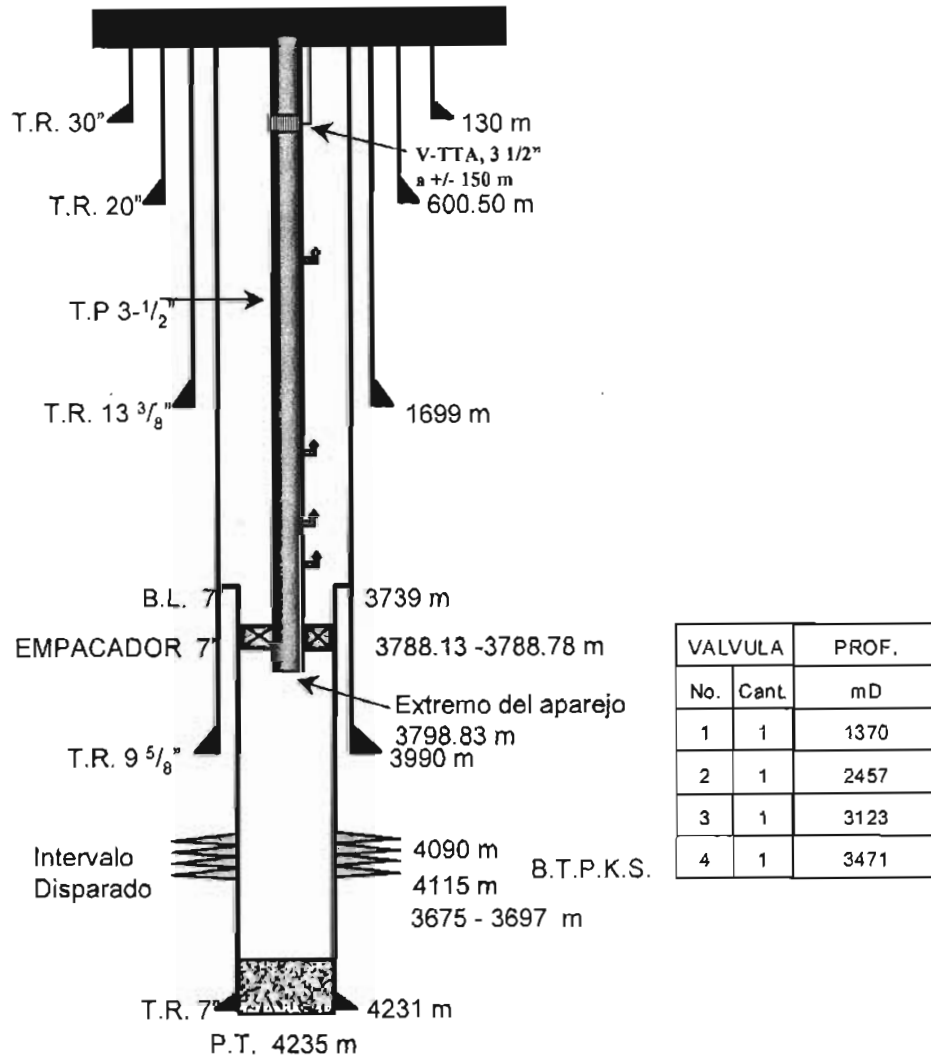


Figura 4.7. Estado mecánico del pozo Batab-13 (Pemex Activo Pol Chuc)

## BATAB 21-D

La perforación se inició el 23 de marzo de 1992 y se terminó el 14 de julio de 1992; la terminación se hizo del 14 al 28 de julio, con un intervalo disparado de 25 mts a la profundidad de 4,925-4,950 m desarrollados en el jurásico superior K resultando productor de gas y aceite; con un tirante de agua de 62 m. Las características del yacimiento son las siguientes: Porosidad de 6% y una  $S_w=24\%$ .

Se realiza estimulación matricial al intervalo 4,925-4,950. Con pozo a batería se realiza curva de decremento con  $P_{tp}=54 \text{ kg/cm}^2$  y  $Q_0=1793 \text{ BPD}$ , entregándose el pozo a producción. Del 9 al 12 de julio de 1995 se instaló unidad de línea de acero venciendo resistencias en varias ocasiones a 250 mts, se armó y bajó cortador de parafinas de  $2 \frac{1}{4}$ " y bajó hasta 4,960 m.

El 16 de julio de 1995 se efectuó estimulación al intervalo productor y el 18 de julio de 1995 toma de registro estático por estaciones de 0 a 4937 m. El 19 de agosto de 1996 se baja tubería flexible y se detectó resistencia a 4,957 m; se inicia la operación de limpieza del 20 al 25 de agosto de 1996.

El 29 de agosto de 1996 se estimula con  $100 \text{ m}^3$  de  $\text{N}_2$ ,  $9 \text{ m}^3$  de OSA nitrogenada,  $50 \text{ m}^3$  de diesel, se limpia el pozo, se alinea a batería con  $P_{tp}=33 \text{ kg/cm}^2$  y entrega el pozo a producción. El pozo es cerrado por baja presión a partir de 10 de mayo de 1999, con 0.5% de aportación de agua.

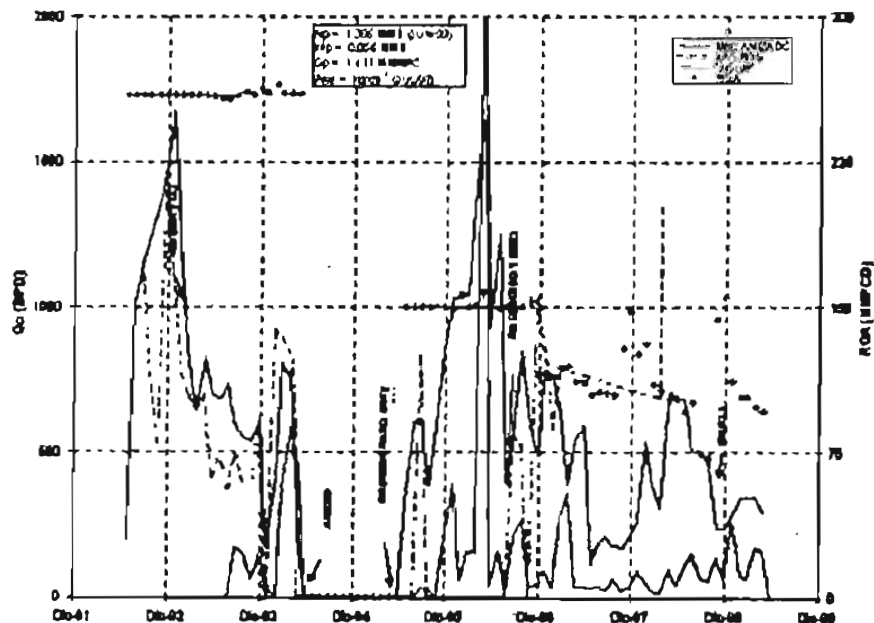


Figura 4.8. Historia de producción del pozo Batab-21D (Pemex Activo Pol Chuc)

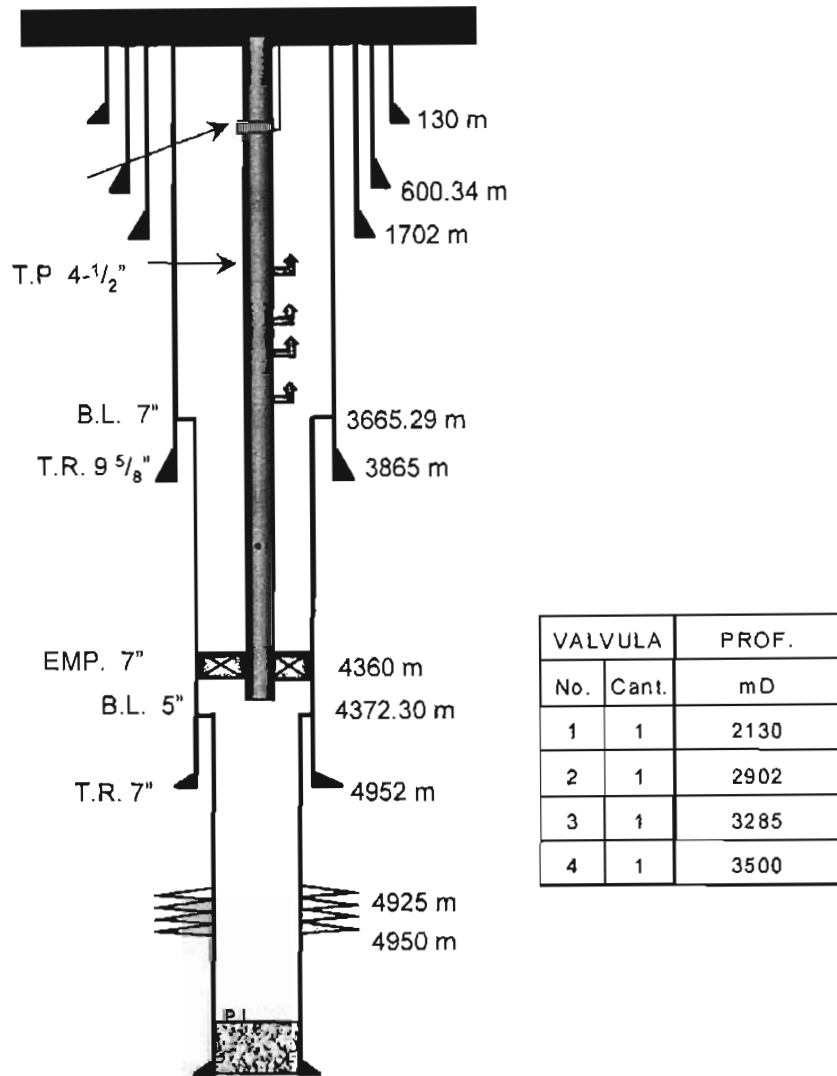


Figura 4.9. Estado mecánico del pozo Batab-21D (Pemex Activo Pol Chuc)

## BATAB-23

El 24 de mayo de 1989 se inició la perforación y se finalizó el 18 de abril de 1990 y la terminación se hizo del 18 al 30 de abril, con un intervalo disparado de 25 m. a la profundidad de 4,110-4,135 m desarrollados en la Brecha del Paleoceno, con un tirante de agua de 52 m. Las características del yacimiento son: Porosidad de 9% y una  $S_w = 32\%$ . A la profundidad de 4,185 m se suspendió la perforación para correr registro eléctrico por que empezó a salir asfalto en las temblorinas.

Se baja barril muestrero a 1,326 m donde se detectó resistencia por sedimentos, se presentó otra resistencia a 1,897 m, checo resistencia franca intentando pasar en varias ocasiones recuperando asfáltenos en una cantidad mínima; el 18 de mayo de 1994 se cambia aparejo de producción para re-disparar y estimular al pozo

El 11 de septiembre de 1995 se calibró con troquelador de 1 ½" hasta 4137 m. libre la base de los disparos, resultando, de esta prueba, aceite de 35°API, un porcentaje de agua de 10% de 60,000 PPM, no se tuvo medición en superficie.

El 22 de septiembre de 1995 se inició el cambio de aparejo a 4 ½ -3 ½ y redispara el intervalo 4,110-4,135, probándose sin éxito.

Alinea pozo a batería por ½" con presión de 30 kg/cm<sup>2</sup> y se observa abatimiento de presión a 24 kg/cm<sup>2</sup>. El pozo fue cerrado en diciembre de 1997 por abatimiento de presión.

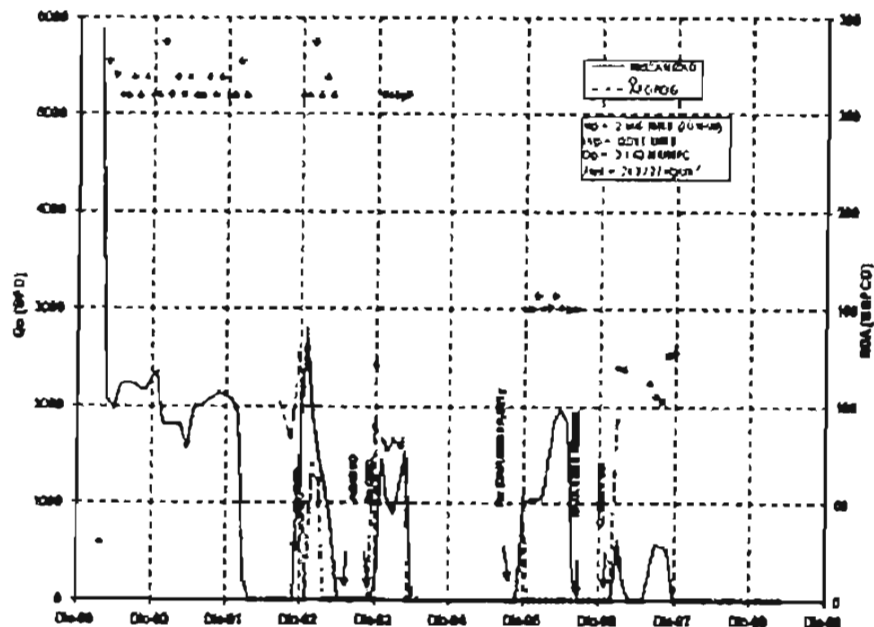


Figura 4.10. Historia de producción del pozo Batab-23 (Pemex Activo Pol Chuc)



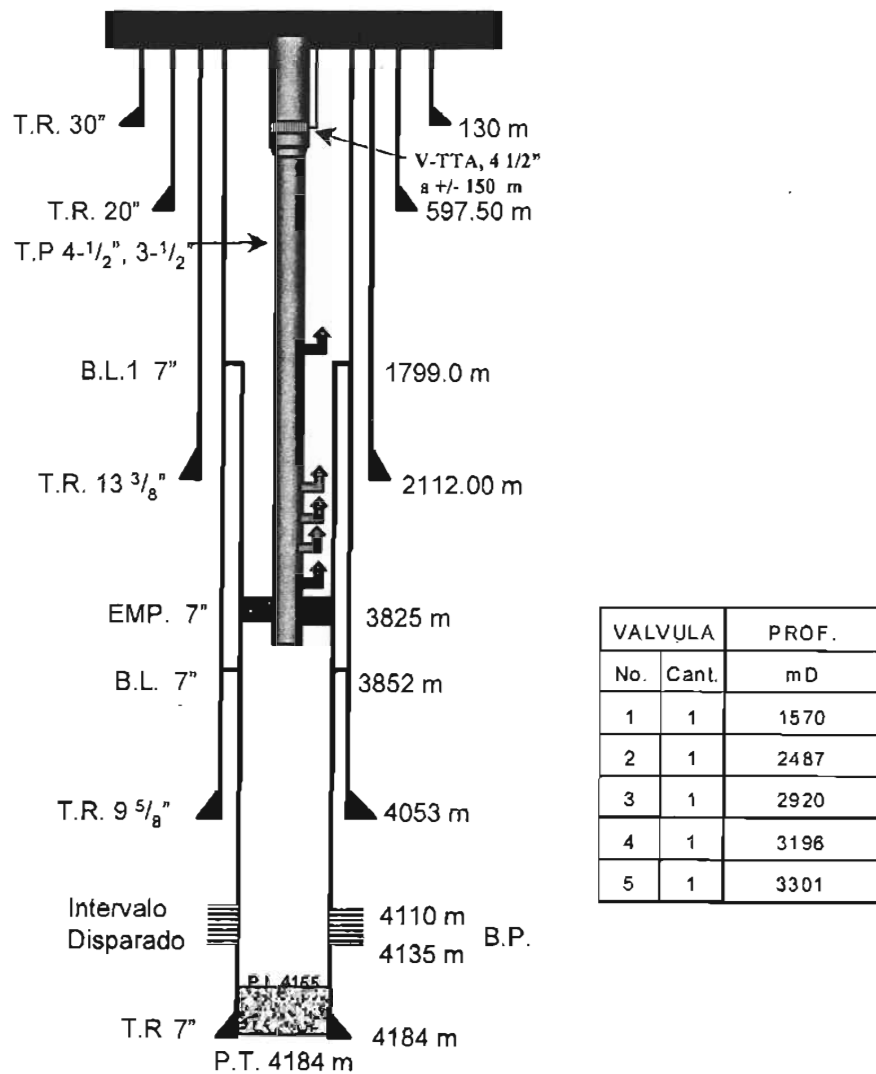


Figura 4.11. Estado mecánico del pozo Batab-23 (Pemex Activo Pol Chuc)

---

---

## BATAB-210

La perforación se inicio el 25 de junio de 1991 y se terminó el 17 de octubre del mismo año en la formación productora JSK. La formación posee las siguientes características:  $\phi=4\%$  y  $Sw=34\%$ , el intervalo productor se encuentra localizado a la profundidad de 4,670-4,700 m desarrollados.

Se metió troquelador de 1 15/16 a 4,702 m y saco a superficie, se metió doble amerada y se tomó registro por estaciones cada 500 m. Con amerada estacionada se toma registro de curva de decremento con aforo a batería, con el pozo fluyendo estrangulado por 1/2".

Este tratamiento trajo consigo un aumento de la permeabilidad provocando el avance del contacto agua-aceite a 4,638 m.

El 30 de junio de 1996 se calibró con barril muestrero de 2" a 4,679 m recuperando agua (1/4 litro) y sedimentos. Realizándose limpieza con 25 m<sup>3</sup> de solvente Paragon-Hyflo 4 Musol recuperándose el 50% de agua.

En marzo de 1997 se induce con N<sub>2</sub> con aportaciones del 10% de agua de 170,000PPM. El pozo es cerrado el 14 de septiembre de 1997 por alto porcentaje de agua y abatimiento de presión.

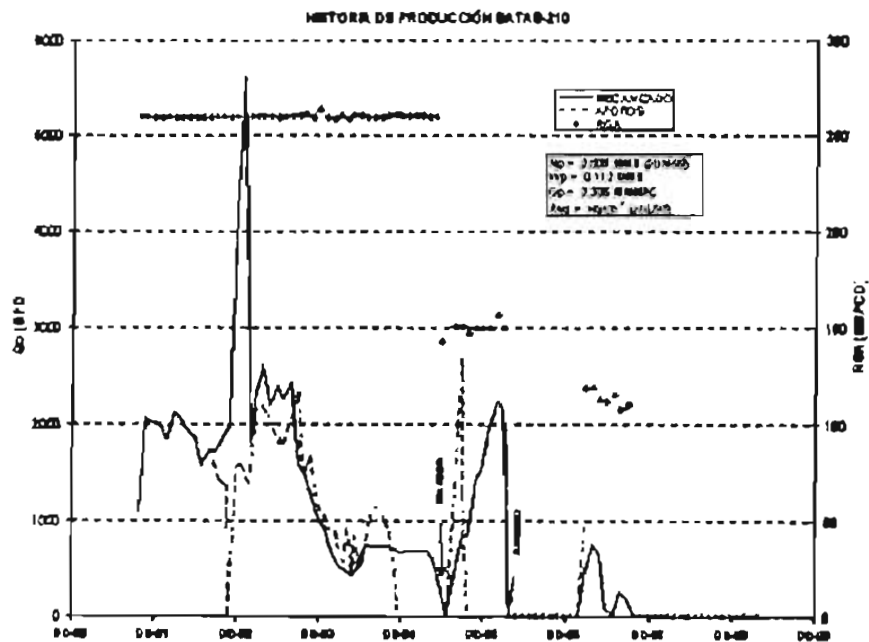


Figura 4.12. Historia de producción del pozo Batab-210 (Pemex Activo Pol Chuc)

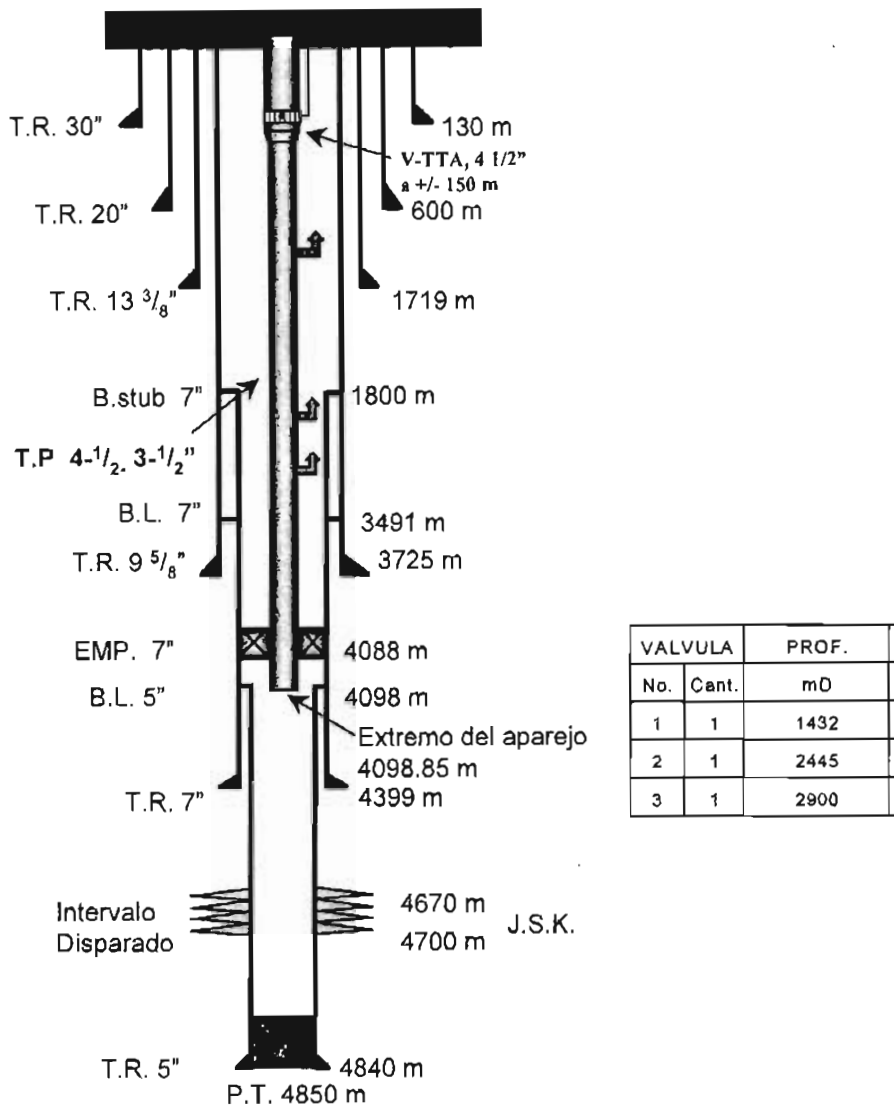


Figura 4.13. Estado mecánico del pozo Batab-210 (Pemex Activo Pol Chuc)

## POZO BATAB 21

La perforación se inició el 3 de mayo de 1990 y se terminó el 27 de abril de 1991; la terminación se hizo del 28 de abril de 1991 al 14 de mayo del mismo año, resultando como productor de aceite y gas en el intervalo productor disparado de 20 m. a la profundidad de 4,000-4,020 m desarrollados en el jurásico superior K Las características del yacimiento son las siguientes: Porosidad de 3%

En mayo de 1991 se redispara al mismo intervalo y estimula con 15 m<sup>3</sup> de ácido clorhídrico al 15 % y 1250 m<sup>3</sup> de nitrógeno, se alinea al quemador por 2" desalojando agua y aceite.

El pozo no fluye desde el 7 de mayo de 1994 por baja presión en la cabeza y baja RGA y fue cerrado el 28 de mayo de 1994 al producir 3.2 % de agua con una salinidad de 50000 PPM.

En septiembre de 1995 se instala equipo de tubería flexible y se efectúa tratamiento de limpieza con 10 m<sup>3</sup> de ácido sin éxito.

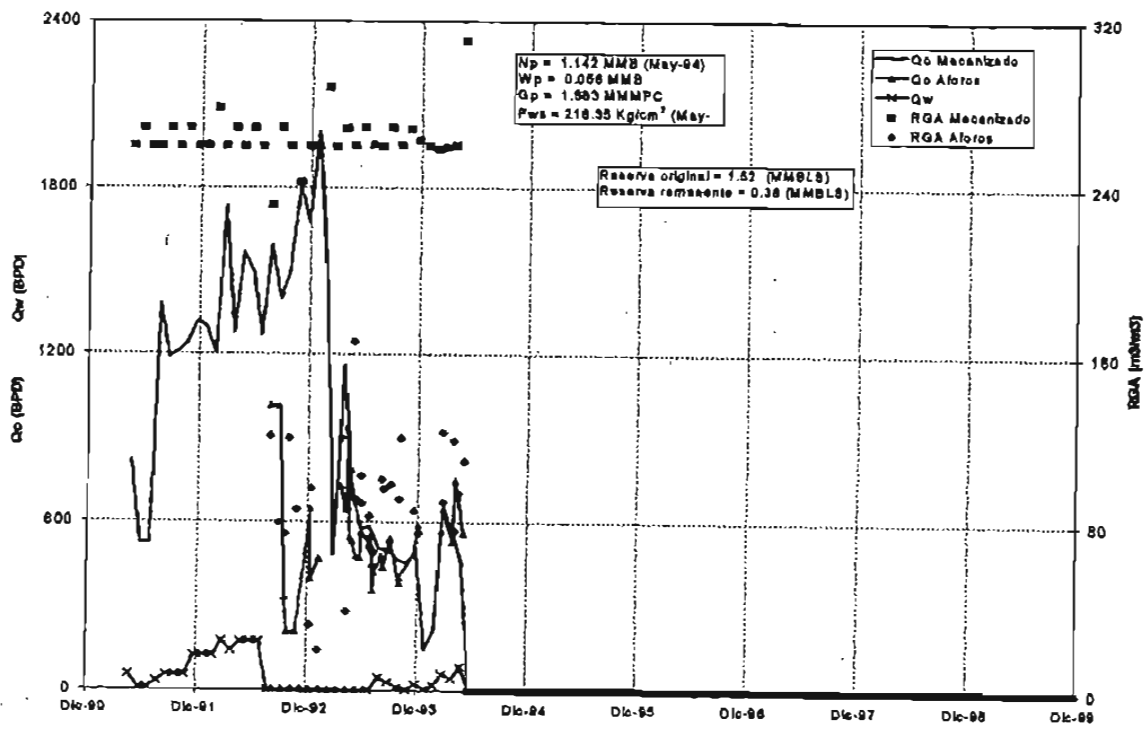


Figura 4.14. Historia de producción del pozo Batab-21 (Pemex Activo Pol Chuc)

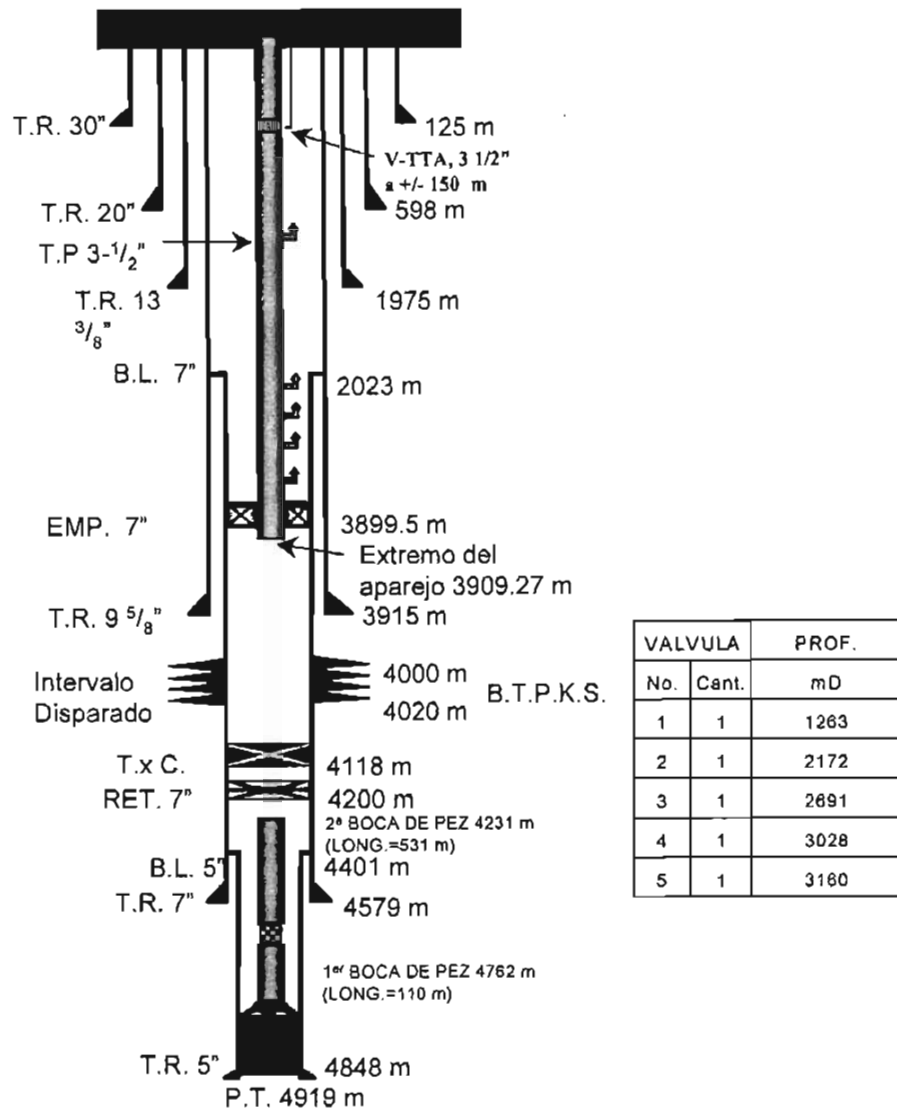


Figura 4.15. Estado mecánico del pozo Batab-210 (Pemex Activo Pol Chuc)

## 4.2 CONDICIONES ACTUALES

En la siguiente tabla se muestran las condiciones de aforo y actuales (noviembre 2002) de los pozos de la plataforma Batab A.

Tabla 4.1 Condición actual de los pozos

PLATAF.	POZO	FECHA ULTIMO AFORO	CONDICIONES DE AFORO					CONDICIONES ACTUALES				
			PWS	ESTRAN.	Qo(BPD)	Qg(MMPCD)	RGA(M3/M3)	PTP (KG7CM2)	Qo(BPD)	Qg(MMPCD)	%AGUA	Qo NETO BPD
BATAB - A	11	01-07-97	238	1/4	937	0.32	80.6	17.5	ABATIDO	ABATIDO	8%	ABATIDO
	13	20-04-98	239	3/4	1467	0.97	118.4	21.3	ABATIDO	ABATIDO	1%	ABATIDO
	21	07-05-94	269	1/2	562	0.34	109.2	17.5	ABATIDO	ABATIDO	5%	ABATIDO
	21D	24-04-98	280	1/2	661	0.09	60	22.7	661	0.09	3%	594
	23	01-07-97	238	1/2	1848	1.01	97.5	17.5	ABATIDO	ABATIDO	3%	ABATIDO
	210	01-07-97	307	1/4	786	0.16	35.6	18	ABATIDO	ABATIDO	10%	ABATIDO
TOTAL BATAB - A					6261	2.89	92.4		661	0.09		594

La mayoría de los pozos se encuentran abatidos, actualmente el pozo 21D esta produciendo aproximadamente 300 bpd de aceite y se espera, que para el próximo año se encuentre abatido (2004)

Condiciones:

RGA

Corte de agua

Para finas

Pws

Presión de separación

Grados API

### 4.3 COMPORTAMIENTO DE LOS POZOS A LA INYECCIÓN DE NITRÓGENO

Los análisis de factibilidad, de aplicación del sistema de bombeo neumático, realizado a los pozos Batab: 11, 13, 21, 21D, 23 y 210, empleando nitrógeno generado con el proceso de membranas tomaron como base la información y estudios realizados en el proyecto IMP-F.33560 (2001).<sup>10</sup>

- Estado mecánico
- Colocación de válvulas
- Porcentajes de agua
- Presiones de fondo

El ajuste de los pozos se llevó a cabo en el software especializado, para diseño de bombeo neumático, GLOP<sup>11</sup> se simuló el comportamiento de cada pozo, con diferentes gastos de gas de inyección. Los gastos considerados son: 0.5, 0.75 y 1.0 MMPCD, con el objeto de identificar y determinar los pozos con los mayores beneficios, dada la limitación de nitrógeno disponible de 2.0 MMPCD. Cabe mencionar que para la simulación del nitrógeno se considero una densidad relativa de 0.95

La correlación de flujo multifásico a la que se ajustaron todos los pozos, y que se empleó para el modelo de flujo vertical, fue la de Hagedorn & Brown, y la correlación PVT seleccionada fue la de Lasater, por acercarse más a las propiedades de fluidos (Pb, Rs y Bo).

Para mostrar el efecto de la inyección de nitrógeno, en la producción de aceite de los pozos, se realizó una comparación entre los gastos de aceite obtenidos, inyectando gas natural e inyectando nitrógeno, en la siguiente grafica se muestra el comportamiento obtenido en los dos casos.

Qg Iny mmpcd	Qo Gas natural (BPD)	Qo Nitrógeno BPD	Diferencia %
0.05	1541	1470	5%
0.075	1704	1603	6%
0.1	1829	1714	6%
0.15	2014	1891	6%
0.225	2207	2084	6%
0.338	2463	2289	7%
0.506	2685	2492	7%
0.759	2960	2735	8%
1.109	3169	2981	7%
1.459	3383	3108	8%
1.809	3484	3204	8%
2.159	3551	3267	8%
2.509	3598	3309	8%
2.859	3628	3334	8%
3.209	3645	3347	8%
3.559	3652	3351	8%

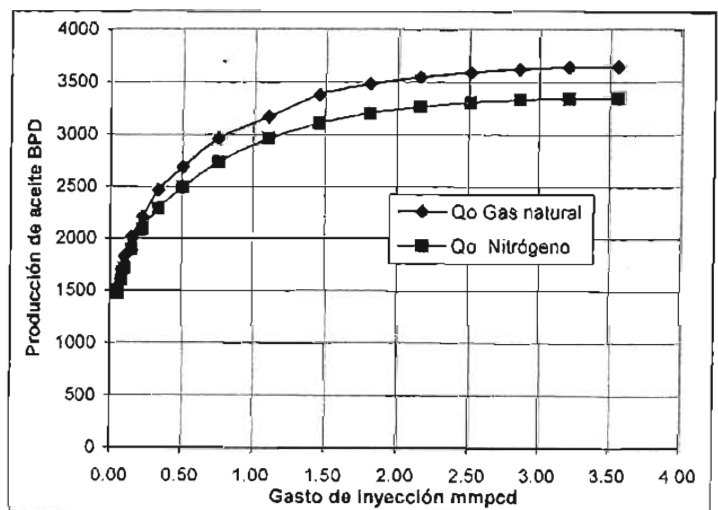


Figura 4.16 Comportamiento del gasto de aceite, inyectando gas natural y nitrógeno

---

---

Como se observa en la figura anterior los gastos de aceite obtenidos con la inyección de nitrógeno son menores entre un 5% y 8% con respecto a los considerados con la inyección de gas natural. Esta reducción no es tan significativa, lo que hace atractiva la inyección de nitrógeno. Es importante hacer mención que este comportamiento se presenta en todos los pozos analizados.

A fin de conocer el comportamiento de los pozos, para condiciones actuales y futuras, con el sistema de bombeo neumático, se sensibilizaron los siguientes escenarios de operación:

- Diferentes presiones de fondo
- Tres porcentajes de agua: actual, 10 y 20 %.

Se elaboraron gráficas y tablas de las producciones esperadas con la inyección de 0.5, 0.75 y 1.0 MMPCD de nitrógeno.

En las siguientes figuras se muestran las curvas de comportamiento de afluencia y la respuesta, de cada uno de los pozos, al sistema de BN para diferentes presiones de fondo, porcentaje de agua y gastos de inyección.



Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta del sistema de BN del pozo Batab 11

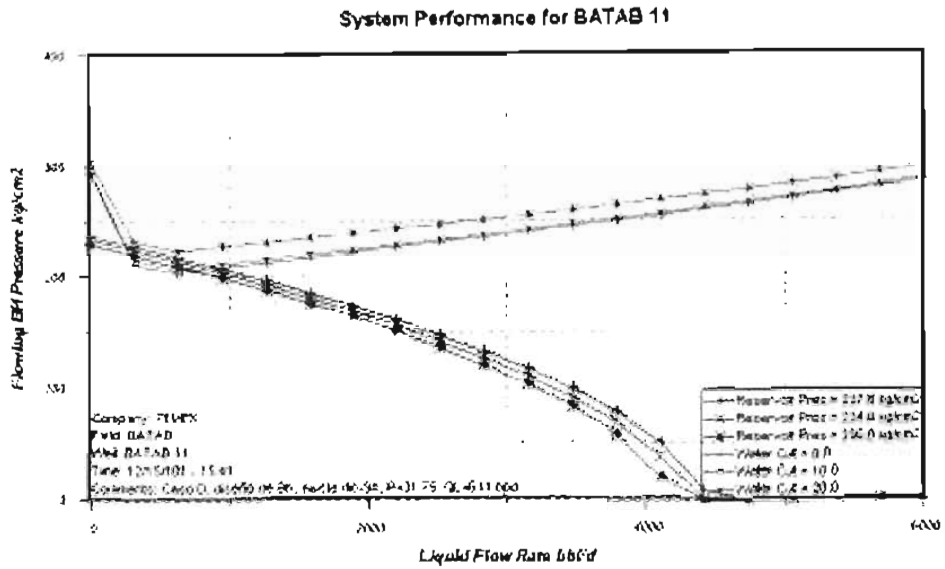


Figura 4.17. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-11, para 8, 10 y 20% de agua

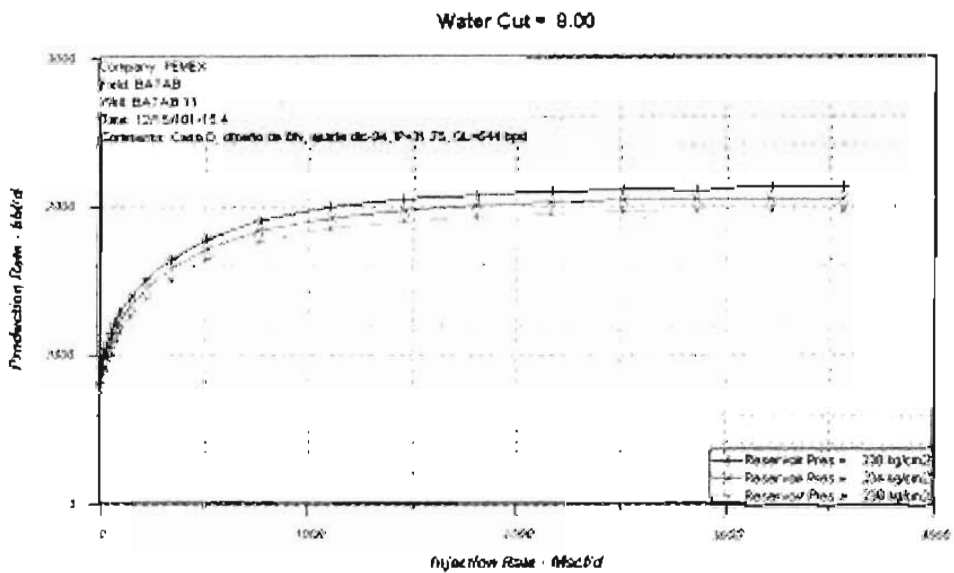


Figura 4.18. Respuesta del pozo Batab-11 con el sistema de BN, para 8% de agua

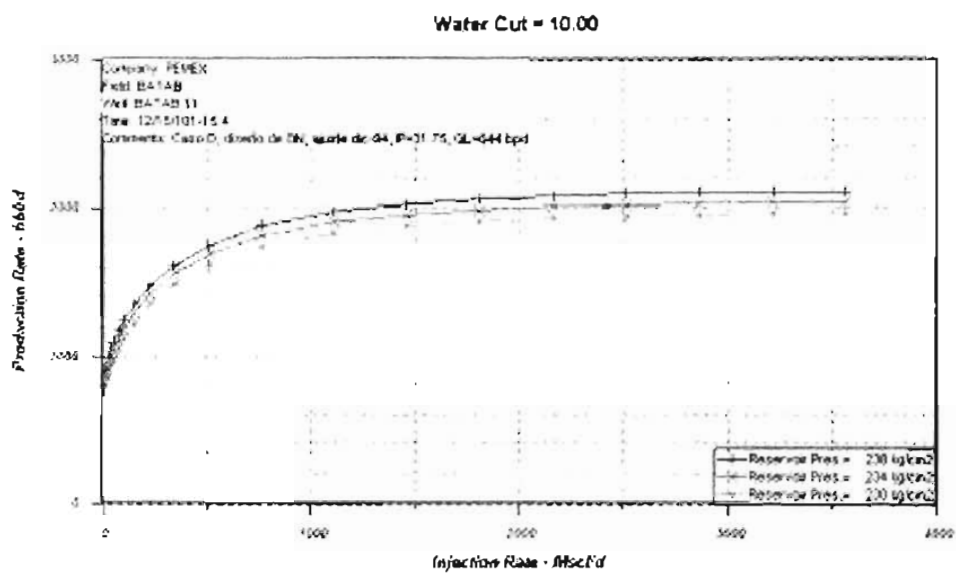


Figura 4.19. Respuesta del pozo Batab-11 con el sistema de BN, para 10% de agua

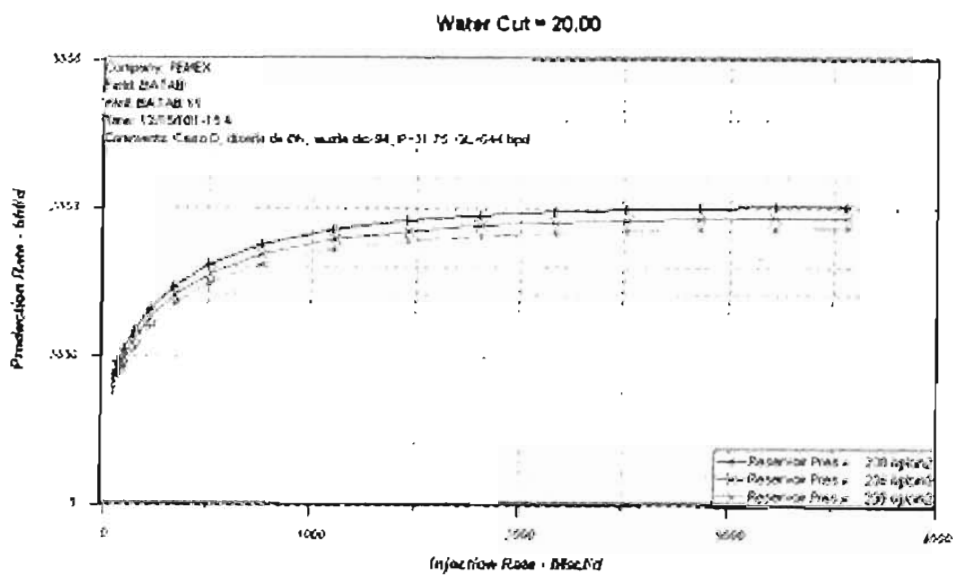


Figura 4.20. Respuesta del pozo Batab-11 con el sistema de BN, para 20% de agua

Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta al sistema de BN del Pozo Batab-13

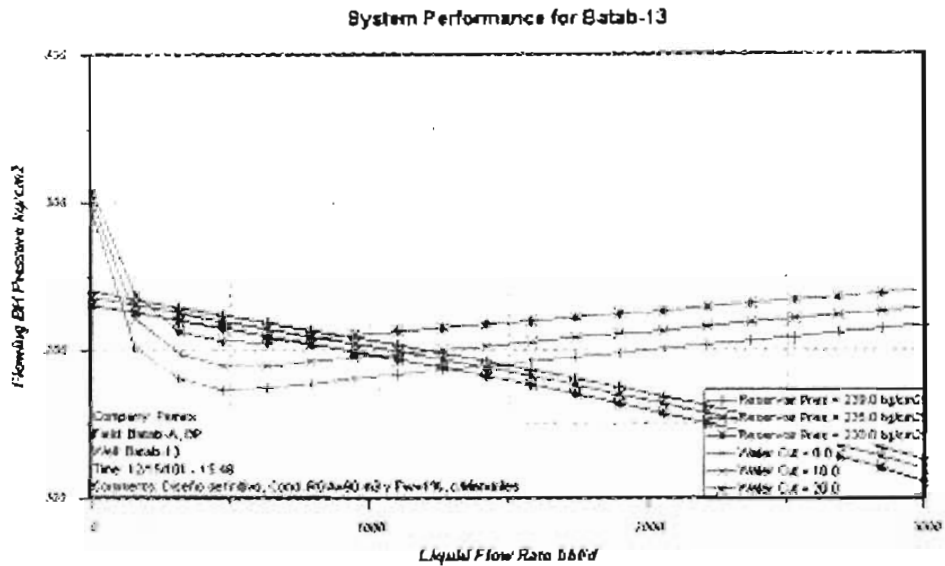


Figura 4.21. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 0, 10 y 20% de agua

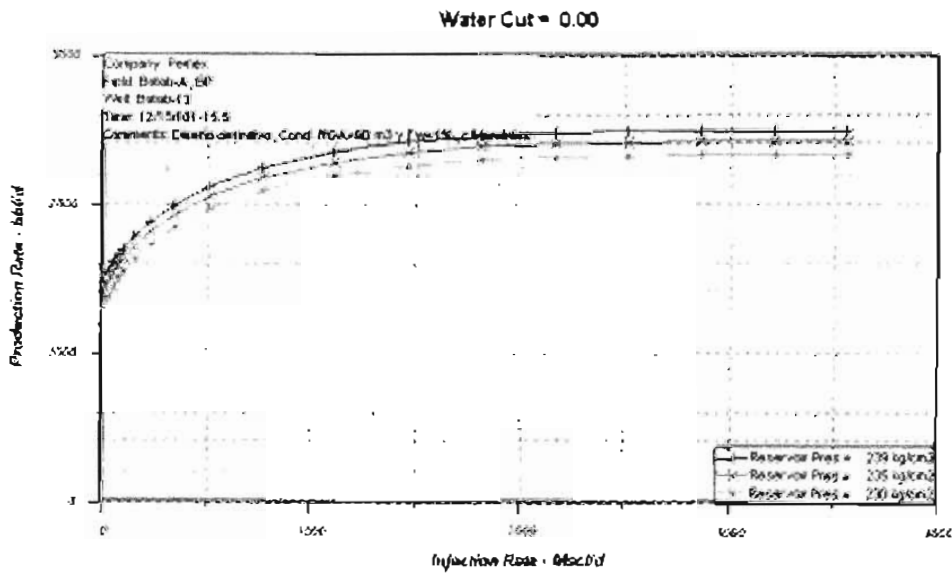


Figura 4.22. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 0% de agua

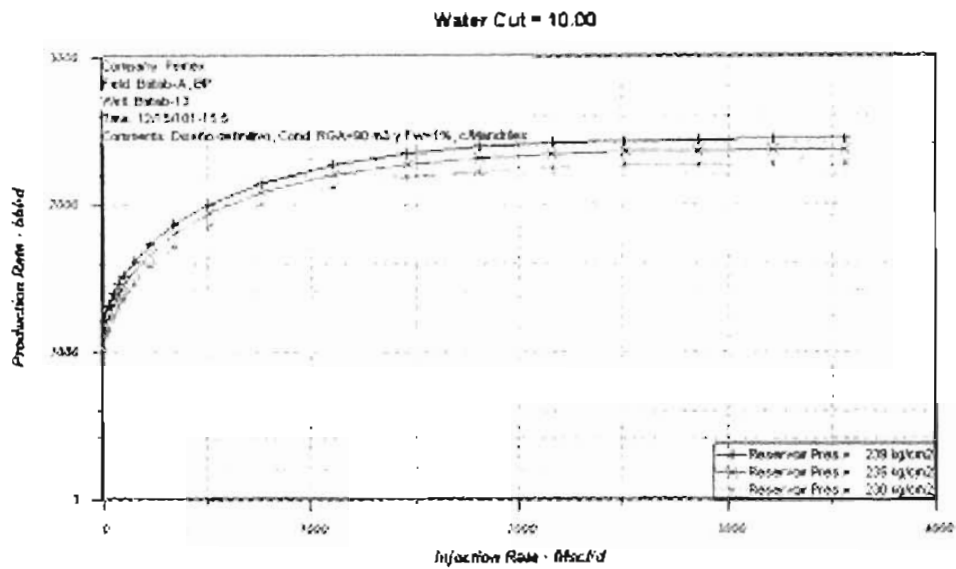


Figura 4.23. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 10% de agua

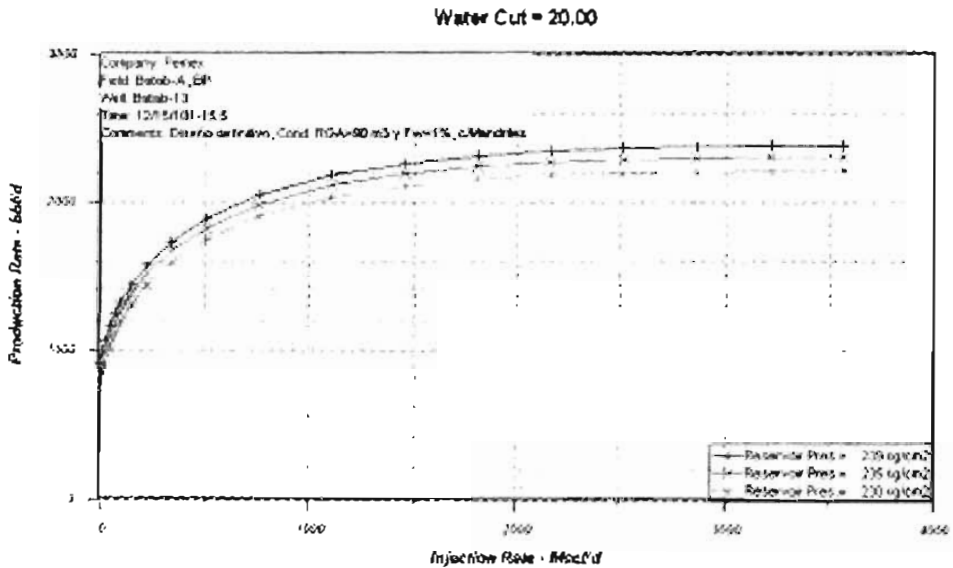


Figura 4.24. Respuesta del pozo Batab-13 con el sistema de BN, para 20% de agua

Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta al sistema de BN del pozo Batab-21D

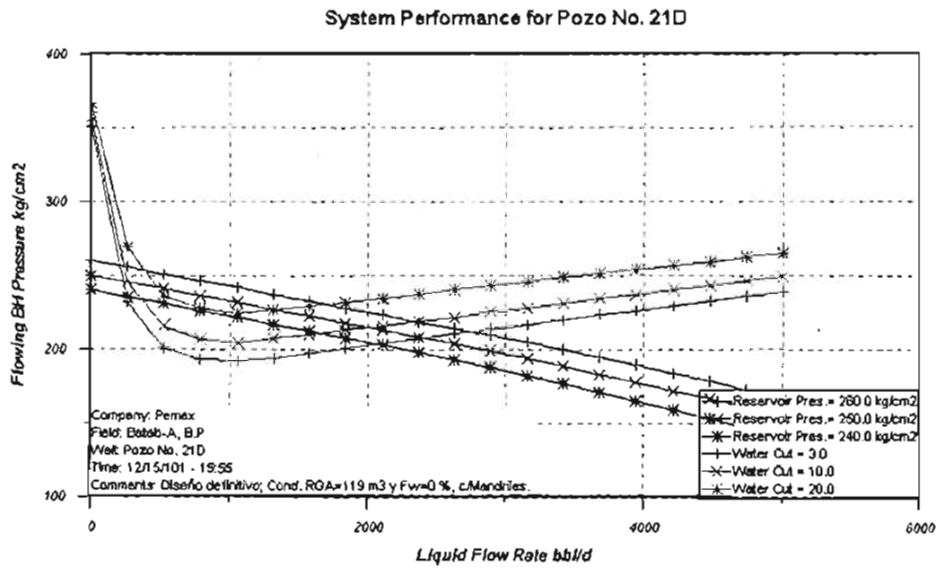


Figura 4.25. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-21D, para 3, 10 y 20% de agua

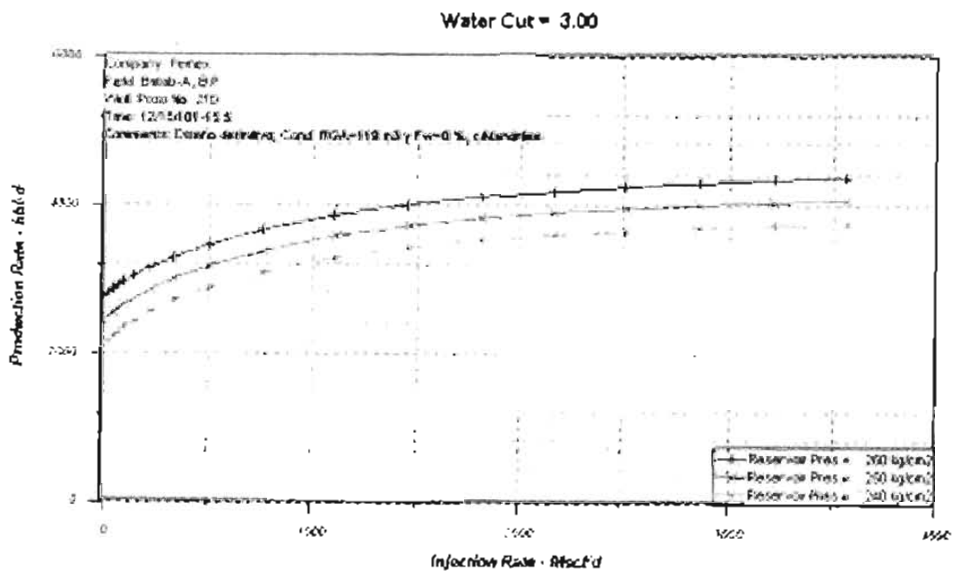


Figura 4.26. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 3% de agua

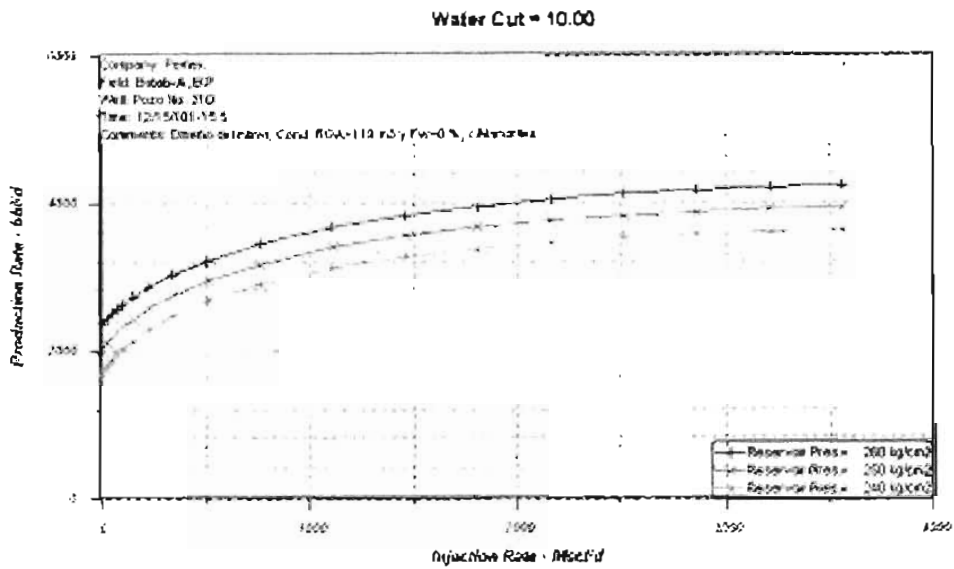


Figura 4.27. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 10% de agua

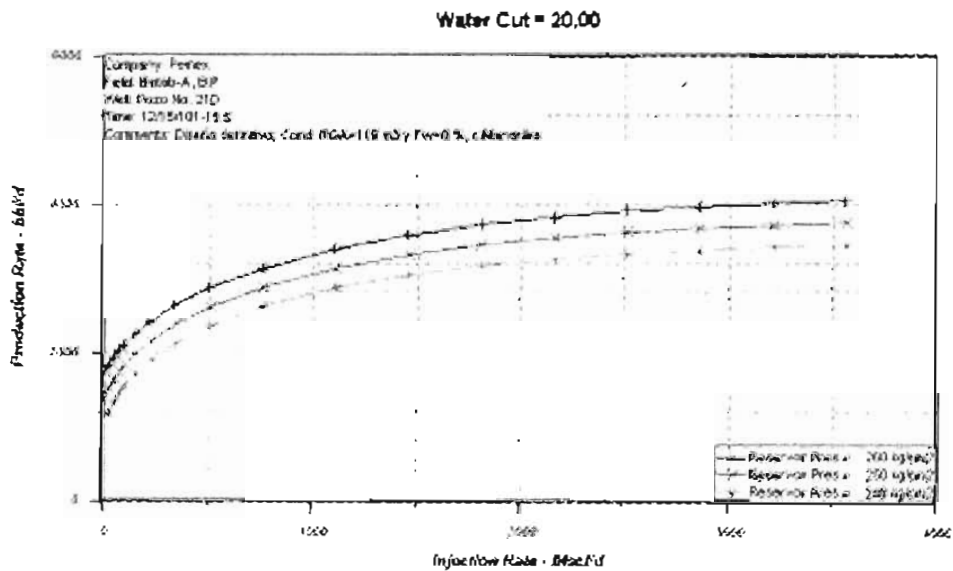


Figura 4.28. Respuesta del pozo Batab-21D con el sistema de BN, para 20% de agua

Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta al sistema de BN del pozo Batab-23

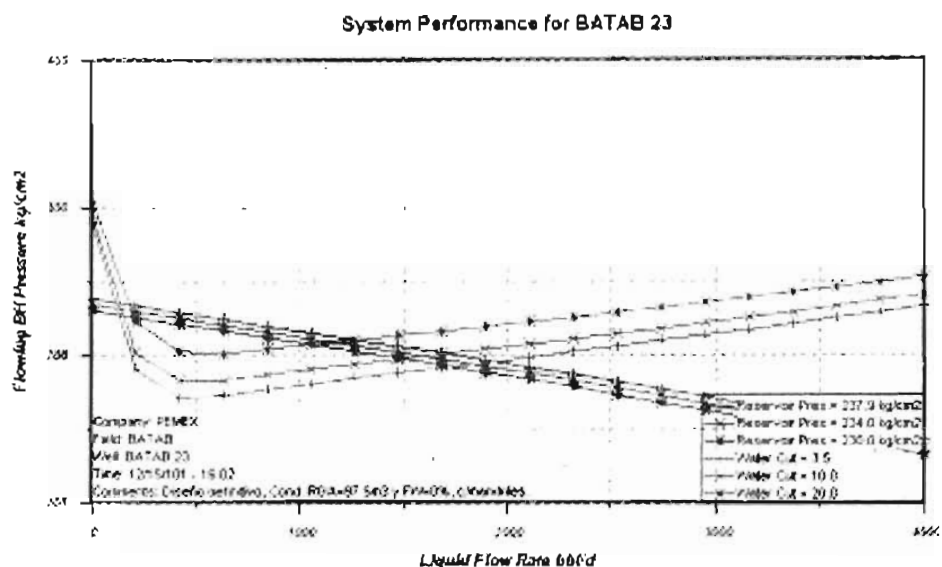


Figura 4.29. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-23, para 3.5, 10 y 20% de agua

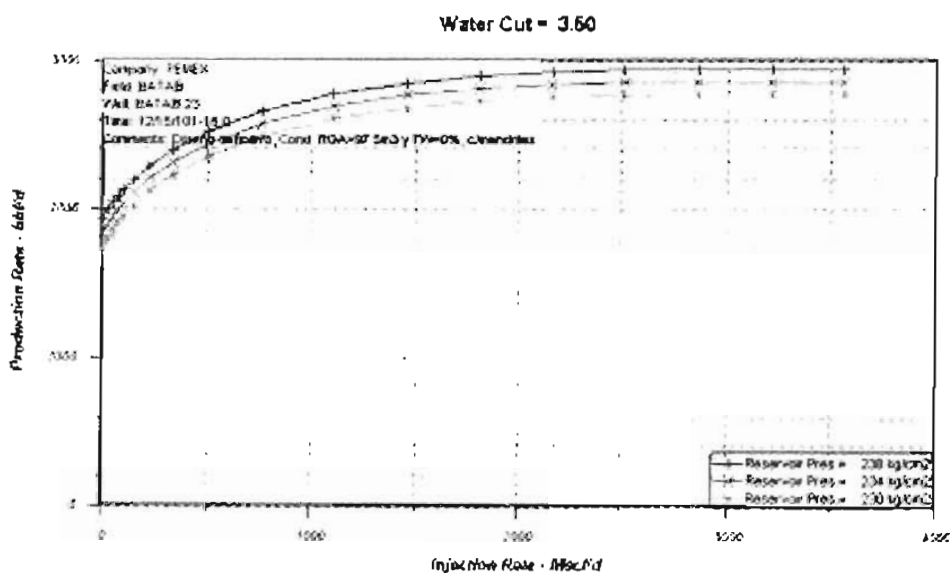


Figura 4.30. Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 3.5% de agua

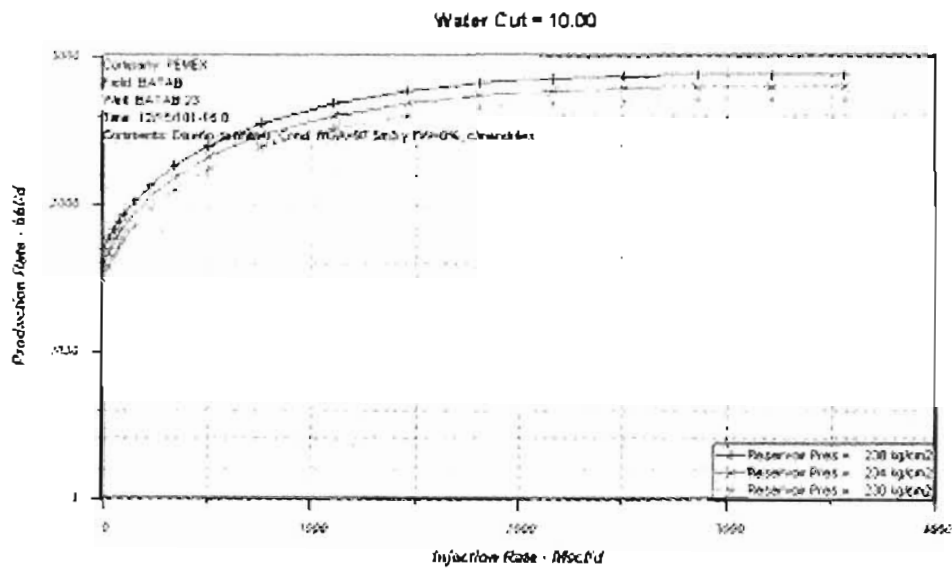


Figura 4.31. Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 10% de agua

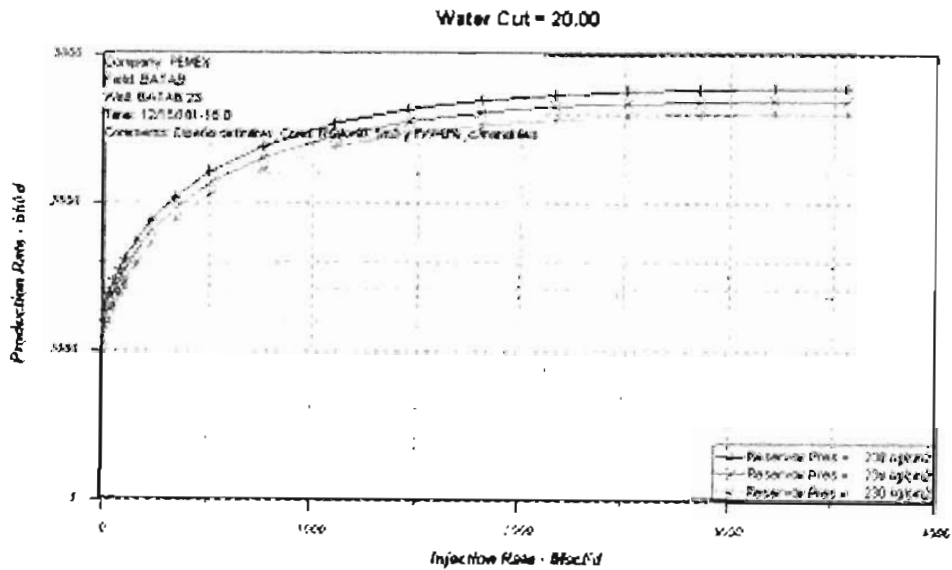


Figura 4.32. Respuesta del pozo Batab-23 con el sistema de BN, para 20% de agua



Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta al sistema de BN del pozo Batab-210

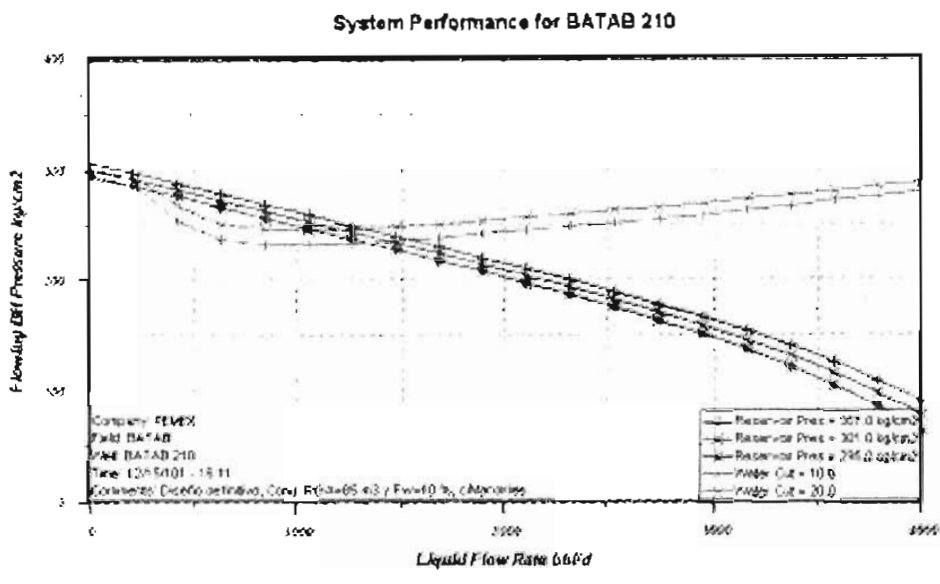


Figura 4.33. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-210, para 10 y 20 % de agua

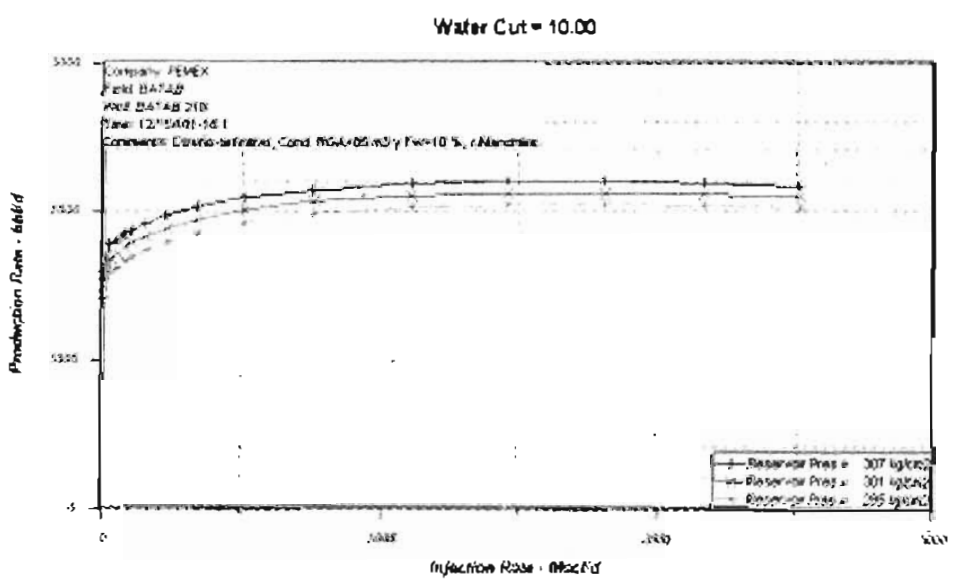


Figura 4.34. Respuesta del pozo Batab-210 con el sistema de BN, para 10% de agua

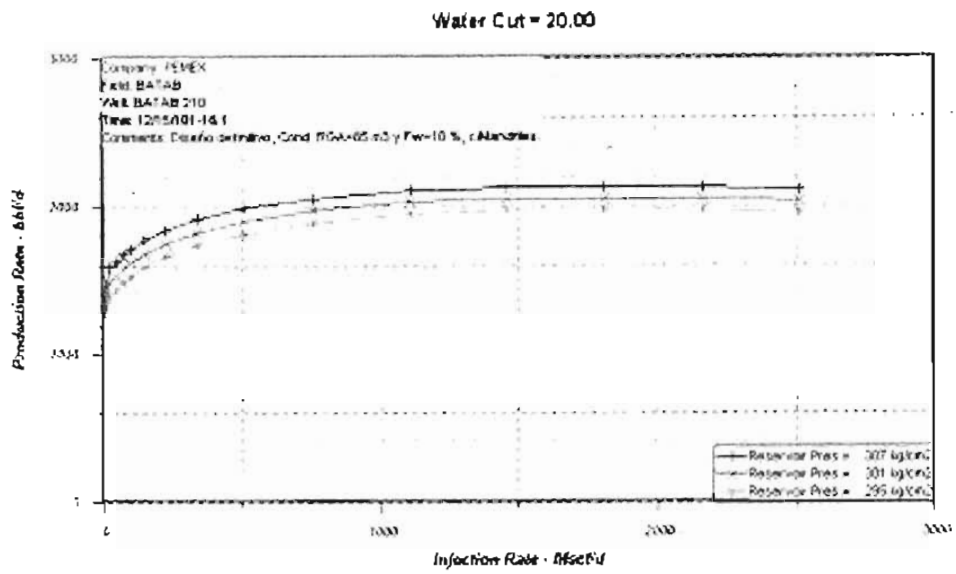


Figura 4.35. Respuesta del pozo Batab-210 con el sistema de BN, para 20% de agua

Curvas de comportamiento de afluencia y respuesta al sistema de BN del pozo Batab-21

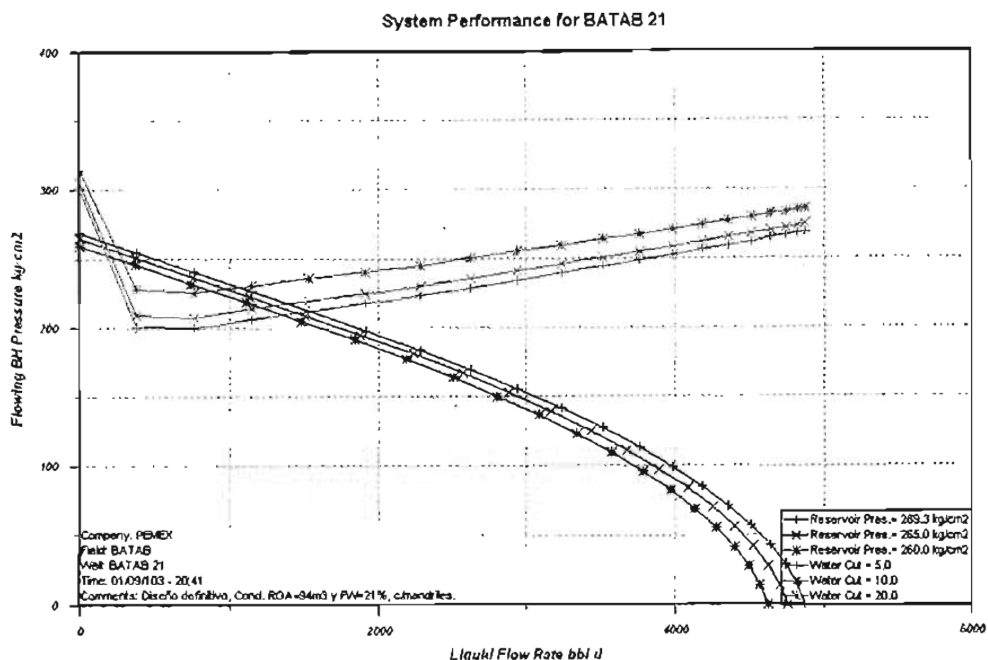


Figura 4.36. Comportamiento de afluencia del pozo Batab-21, para 5 10 y 20 % de agua

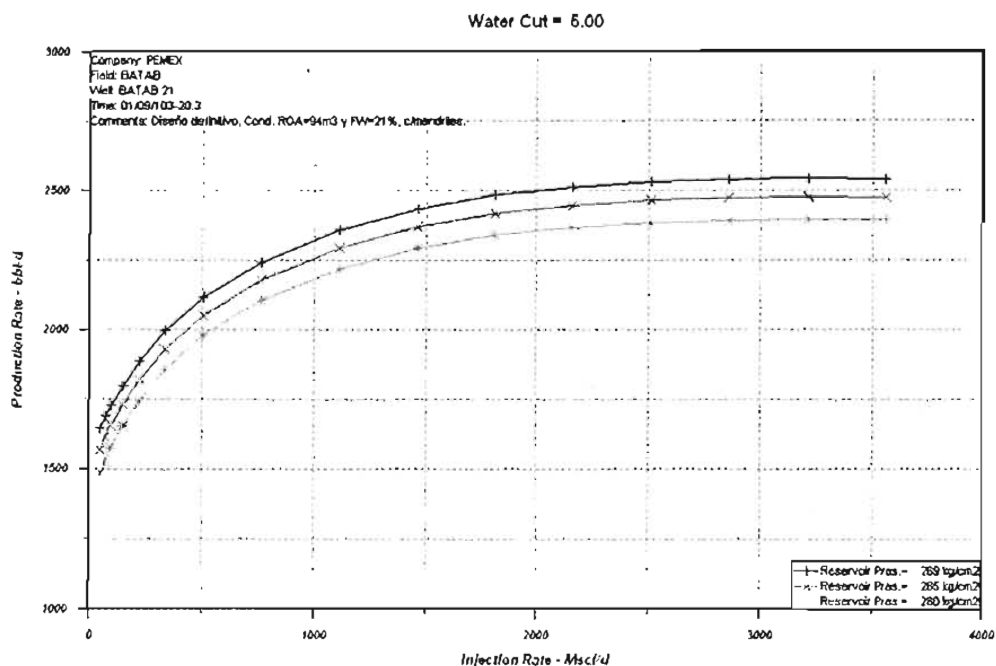


Figura 4.37. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 5% de agua

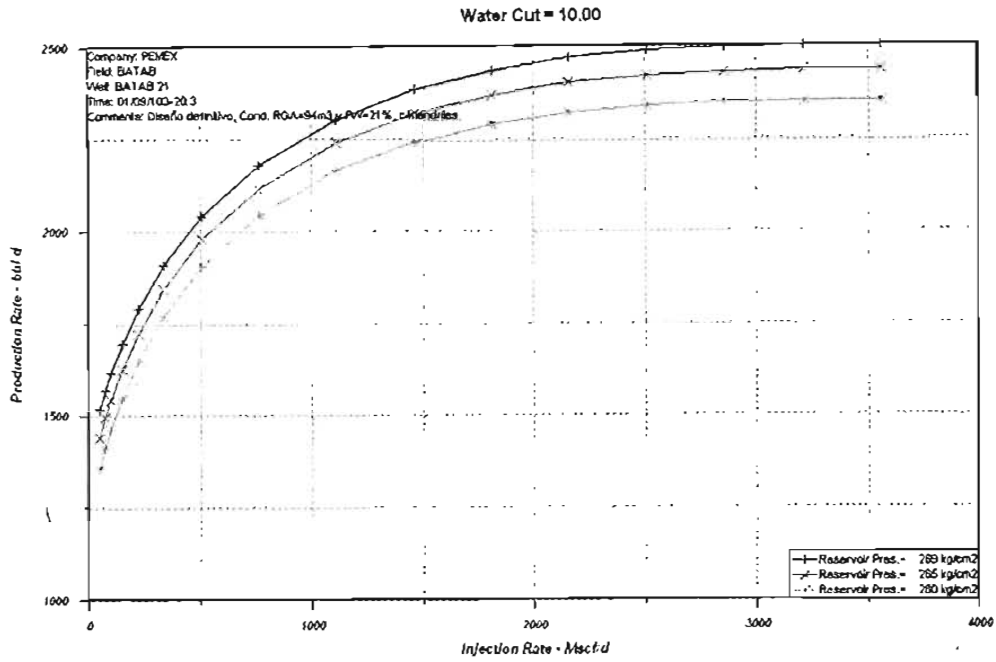


Figura 4.38. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 10% de agua

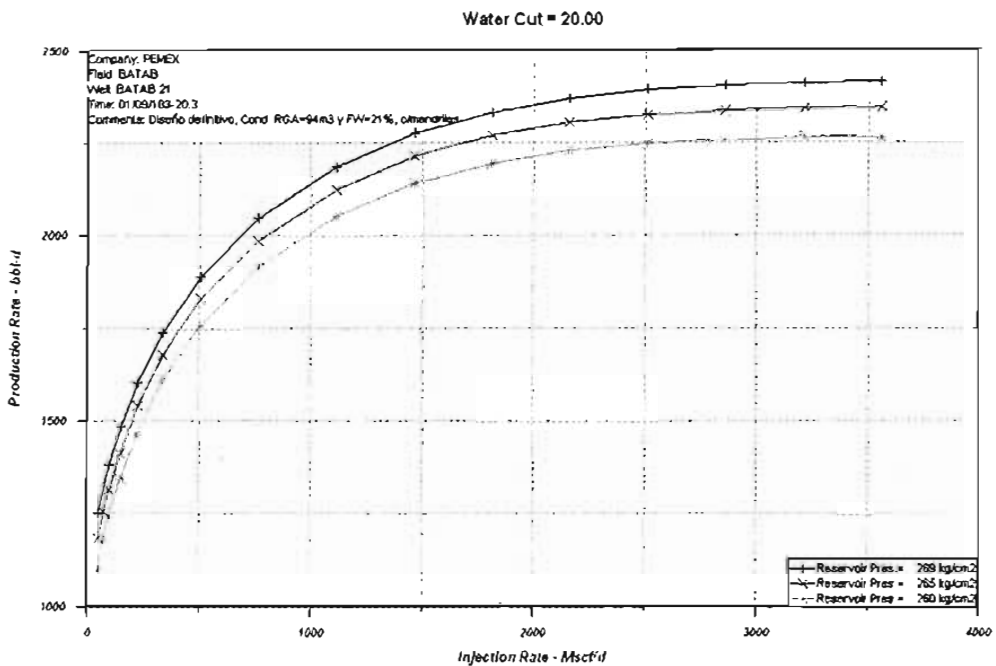


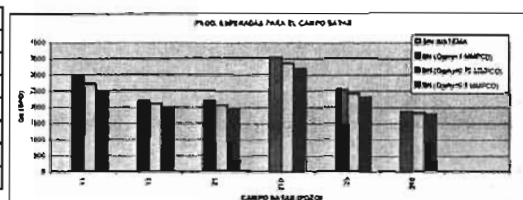
Figura 4.39. Respuesta del pozo Batab-21 con el sistema de BN, para 20% de agua

Como se observa en las graficas anteriores para todas las condiciones y escenarios evaluados el bombeo neumático inyectando nitrógeno opera y genera diversas producciones de aceite

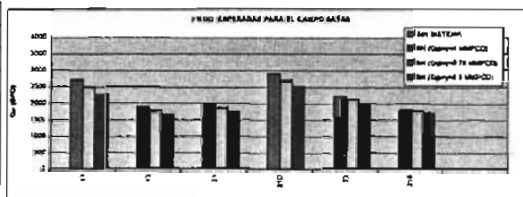
En la siguiente tabla se presentan las producciones esperadas de aceite en los pozos de la plataforma Batab con la inyección de nitrógeno.

Tabla 4.2. Producción de aceite esperada en BPD en la plataforma Batab A

2004	POZO	Pws	RGA	%H2O	SIN	BN	BN	BN
					SISTEMA	(Qginy=0.5 MMPCD)	(Qginy=0.7 5 MMPCD)	(Qginy=1 MMPCD)
	11	238	73	8	0	2472	2713	2955
	13	239	90	0	0	1979	2099	2186
	21	269	94	5	0	1948	2068	2174
	21D	260	119	3	0	3185	3367	3548
	23	238	97.5	3.5	0	2310	2432	2541
	210	307	85	10	0	1788	1833	1866
	Qo producido				0	18966	19989	20922



2005	POZO	Pws	RGA	% Agua	SIN	BN	BN	BN
					SISTEMA	(Qginy=0.5 MMPCD)	(Qginy=0.7 5 MMPCD)	(Qginy=1 MMPCD)
	11	234	73	20	0	2273	2499	2735
	13	235	90	10	0	1654	1775	1878
	21	265	94	10	0	1730	1851	1958
	21D	250	119	10	0	2512	2708	2899
	23	234	97.5	10	0	1982	2110	2222
	210	301	85	20	0	1714	1783	1795
	Qo producido				0	16206	17268	18242



En la tabla anterior se muestran incrementos de producción esperados del orden de 1,500 a 2,500 BPD de aceite y, en algunos casos, hasta 3,000 BPD, en la siguiente tabla se presenta la selección de los pozos con mejor respuesta a la inyección de nitrógeno, considerando un volumen de nitrógeno disponible (2.16 mmpcd).

Tabla 4.3. Pozos con mayor producción a diferentes condiciones de inyección.

Inyección de 0.5 mmpcd de N <sub>2</sub>	Pozo 11 Pozo 13 Pozo 21D Pozo 23
Inyección de 0.75 mmpcd de N <sub>2</sub>	Pozo 11 Pozo 21D Pozo 23
Inyección de 1.0 mmpcd de N <sub>2</sub>	Pozo 11 Pozo 21D

---

---

## **5.0 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA GENERACIÓN E INYECCIÓN DE NITRÓGENO EN EL CAMPO BATAB**

Para el desarrollo del estudio económico se requirió tomar consideraciones y bases económicas que permitieran la uniformidad de los cálculos a desarrollar.

### **5.1 CONSIDERACIONES Y BASES ECONÓMICAS**

#### Consideraciones del estudio:

Se considera un servicio de arrendamiento de un equipo de generación e inyección de nitrógeno por 2 años, con una capacidad de 2.16 mmpcd y pureza de 95-98%. Utilizando la información de costos y equipo de la compañía Weatherford.

Se considera como beneficio el incremento de producción de aceite, que se obtendrá al implementar el sistema de inyección de nitrógeno.

En la plataforma no se dispone de energía eléctrica y red de suministro de gas de BN.

Se consideran tres alternativas en función del volumen de inyección de nitrógeno

Alternativa 1: inyección de 0.5 mmpcd de nitrógeno a 4 pozos

Alternativa 2: inyección de 0.75 mmpcd de nitrógeno a 3 pozos

Alternativa 3: inyección de 1.0 mmpcd de nitrógeno a 2 pozos

#### Bases económicas utilizadas

Tasa de descuento del 10% anual

Tipo de cambio promedio 10.1625 \$/usd

Costo de transporte de hidrocarburos Campo Batab Región Marina Suroeste:

Línea troncal 0.055 usd/bpce

Línea secundaria 0.356 usd/bpce

Precio de aceite y gas Campo Batab Región Marina Suroeste:

Aceite 19.41 usd/bl (Año1 2004)

Aceite 19.11 usd/bl (Año2 2005)

Horizonte de estudio 2 años

Los valores fueron consultados del documento "Guía del ciclo de planeación 2001-2002": Premisas económicas, emitido por la Subdirección de Planeación PEP.

---

---

## 5.2 EROGACIONES

Las erogaciones que se consideran para la implementación y operación del sistema de Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma, son: Los Costos de arrendamiento, Costo de operación y Costo de transporte.

### Costo de arrendamiento:

El costo de arrendamiento está formado por el servicio integral de generación e inyección de nitrógeno, a pozos en plataforma, el cual incluye: equipo, lubricantes, trailer habitación, tanque para almacenamiento de diesel, sistema de comunicación y personal.

El equipo que se considera en el arrendamiento es el siguiente: 4 compresores primarios de aire XHP 900/350, 2 elevadores de presión WB12 (uno en operación y otro en relevo), unidad de generación de nitrógeno NPU 150, con planta de suministro de energía eléctrica, contenedor con accesorios y repuestos para la operación, tanque de almacenamiento horizontal de 60,000 litros, así como el transporte hasta la terminal de dos bocas.

El personal requerido para operar el equipo está formado por 8 operadores, de los cuales, 4 estarán en plataforma operando en turnos de 12 horas, 2 operadores cada turno, y relevos cada 14 días.

También se considera el suministro de los siguientes lubricantes: 5 tambores de 200 lt. de aceite SAE 40 cada 150 horas para los motores de combustión; 4 tambores de 200 lt. de aceite ATF cada 300 horas para el compresor y 150 galones de aceite Rarus 760 por mes para el booster.

Es importante mencionar que el servicio de arrendamiento no considera el combustible, alimentos al personal operario, transportes plataforma – terminal marítima dos bocas.

En la siguiente tabla se muestra el costo anual del servicio de arrendamiento y costo por montaje del equipo. Debido a que el equipo es de la misma capacidad en las tres alternativas los costos se consideran los mismos para ambas.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

**Tabla 5.1. Costos de arrendamiento  
Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma  
(Alternativa 1, 2 y 3)**

<b>Estimado de Arrendamiento (2 años)</b> Inyección de Nitrógeno	<b>Año1</b> MM\$	<b>Año2</b> MM\$	<b>Total</b> MM\$
Renta diaria instalación 30 días (9,205 usd/día)	2.806		
Renta diaria operación 365 días (10,975 usd/día)	40.700	40.700	
<b>Total</b>	<b>43.505</b>	<b>40.700</b>	<b>84.205</b>

En la tabla anterior se observa que el costo anual de arrendamiento del servicio de generación e inyección de nitrógeno es del orden de 40.7 MM\$, generando un total 84.2 MM\$ por los dos años de servicio, incluido el costo por el montaje del equipo, 2.8 MM\$ por 30 días.

#### Costo de Operación

En el estudio, los costos de operación están formados por el consumo de diesel de los motores de combustión, 10,000 lt/día y el precio de diesel de 2.50 \$/lt (precios de consumibles Activo Pol Chuc) así como el suministro de diesel, considerando un tanque de 60,000 lt y un tiempo de recorrido de 15 horas (carga, travesía, descarga) con una tarifa de flete de 5,400 usd/día<sup>14</sup>.

En el estudio también se tomó en cuenta el consumo de lubricantes de los diferentes equipos utilizados.

En la siguiente tabla se muestra el costo de operación anual del equipo de Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma. Debido a que el equipo es de la misma capacidad en las tres alternativas los costos se consideran los mismos para ambas.



Tabla 5.2. Costos de operación  
Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma  
(Alternativa 1, 2 y 3)

Costos de operación Inyección de Nitrógeno	Año1 MM\$	Año2 MM\$	Total MM\$
Consumo de diesel (10,000 lt/día)	9.381	9.381	
suministro 73 días	4.005	4.005	
<b>Subtotal</b>	<b>13.386</b>	<b>13.386</b>	<b>26.771</b>
consumo de aceite Sae 40 (motor) 160 lt/día	0.137	0.137	
consumo de aceite real (compresor) 64 lt/día	0.055	0.055	
consumo de lubricante 19 lt/día	0.016	0.016	
<b>Subtotal</b>	<b>0.208</b>	<b>0.208</b>	<b>0.415</b>
<b>Costo Operación</b>	<b>13.593</b>	<b>13.593</b>	<b>27.186</b>

En la tabla anterior se observa que el costo por consumo de diesel es del orden de 9 MM\$ anuales, dos veces mas que el suministro de combustible del orden de 4MM\$ , generando un costo de operación anual de 13.3 MM\$ también se muestra que el consumo de lubricantes no es tan significativo, generando un monto de 0.2 MM\$ con estos datos, el total de operación para un periodo de dos años es de 27.1 MM\$.

#### Costo de transporte

Los costos de transporte fueron determinados en función del incremento anual, de la producción de aceite de los pozos, por el costo unitario de transporte generado en la Región Marina Suroeste.

Para la determinación del costo de transporte se consideran dos tipos de líneas: Troncal y Secundaria; la línea Troncal con un costo unitario de 0.055 usd/bpce (barriles de petróleo crudo equivalente) y la línea Secundaria con un costo unitario de 0.356 usd/bpce, para el campo Batab<sup>13</sup>.

Los costos de transporte para las tres alternativas se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 5.3. Costos de transporte  
Generación e Inyección de nitrógeno

<b>Costos de transporte Alternativa 1 Inyección de Nitrógeno</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Incremento de aceite (bpd)	9,946	8,421	
Costo transporte hidrocarburos troncal (MM\$)	2.029	1.718	
Costo transporte hidrocarburos secundario (MM\$)	13.134	11.120	
<b>Costo transporte anual de aceite (MM\$)</b>	<b>15.163</b>	<b>12.838</b>	<b>28.001</b>

<b>Costos de transporte Alternativa 2 Inyección de Nitrógeno 3 pozos</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Incremento de aceite (bpd)	8,512	7,317	
Costo transporte hidrocarburos troncal (MM\$)	1.737	1.493	
Costo transporte hidrocarburos secundario (MM\$)	11.240	9.662	
<b>Costo transporte anual de aceite (MM\$)</b>	<b>12.977</b>	<b>11.155</b>	<b>24.132</b>

<b>Costos de transporte Alternativa 3 Inyección de Nitrógeno 2 pozos</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Incremento de aceite (bpd)	6,503	5,634	
Costo transporte hidrocarburos troncal (MM\$)	1.327	1.149	
Costo transporte hidrocarburos secundario (MM\$)	8.587	7.440	
<b>Costo transporte anual de aceite (MM\$)</b>	<b>9.914</b>	<b>8.589</b>	<b>18.503</b>

### 5.3 BENEFICIOS DEL PROYECTO

En la evaluación económica del estudio se considera como beneficio el ingreso anual debido al incremento de producción, generado por la implantación del sistema de inyección de nitrógeno, es decir el incremento de la producción por el valor comercial de los hidrocarburos.

El valor comercial de los hidrocarburos, estimado para el Campo Batab Región Marina Suroeste, es de 19.41 usd/bl para el año 1, y de 19. 11 usd/bl para el año 2 <sup>13</sup>.

Los beneficios económicos esperados para las tres alternativas se muestran en las siguientes tablas.

Cuadro 5.4. Beneficio económico  
Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma

<b>Beneficios económicos Alternativa 1 Inyección de Nitrógeno</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Producción incremental de Aceite (bld)	9,946	8,421	
Precio Aceite (\$/BL)	197.3	194.2	
<b>Total (MM\$)</b>	<b>716.1</b>	<b>596.9</b>	<b>1,313</b>

<b>Beneficios económicos Alternativa 2 Inyección de Nitrógeno</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Producción incremental de Aceite (bld)	8,512	7,317	
Precio Aceite (\$/BL)	197.3	194.2	
<b>Total (MM\$)</b>	<b>612.8</b>	<b>518.7</b>	<b>1,132</b>

<b>Beneficios económicos Alternativa 3 Inyección de Nitrógeno</b>			
	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Total</b>
Producción incremental de Aceite (bld)	6,503	5,634	
Precio Aceite (\$/BL)	197.3	194.2	
<b>Total (MM\$)</b>	<b>468.2</b>	<b>399.4</b>	<b>868</b>

## 5.4 PARÁMETROS DE RENTABILIDAD

Con base en los resultados anteriores: Estimado de inversión, Costos de Operación, Costos de Transporte y Beneficios Económicos; se desarrollaron: Los Estados de Resultados Pro-forma, Flujos de Efectivo y Parámetros de Rentabilidad (Valor Presente Neto VPN, Valor Presente de la Inversión VPI, Tasa Interna de Retorno TIR y el Periodo de Recuperación), para las diferentes alternativa planteadas.

Los parámetros de rentabilidad que se obtuvieron para las tres opciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5. Parámetros de rentabilidad  
Generación e Inyección de nitrógeno en Plataforma

Parametros de rentabilidad		Aternativa 1	Aternativa 2	Aternativa 3
Inyección de Nitrógeno		inyeccion 0.5	inyeccion 0.75	inyeccion 1.0
Plataforma Batab A		4 pozos	3 pozos	2 pozos
		(11, 13, 21D, 23)	(11, 21D, 23)	(11, 21D)
Valor Presente Neto	MM\$	1,023	857	642
Valor Presente de Inversión	MM\$	84	84	84
V.P.N. / V.P.I.		12	10	8
Periodo de Recuperación	Días	48	59	75
Tasa Interna de Rendimiento		792%	672%	502%

En la tabla anterior se observa que las 3 alternativas resultan rentables al presentar un valor presente neto positivo, 1023, 857 y 642 en un periodo de 2 años.

La alternativa mas atractiva, por su mayor VPN, es la alternativa 1 (inyección de 0.5 mmpcd de nitrógeno por pozo), generando un VPN de 1,023 MM\$ y una inversión total de 111.39 MM\$ conformada por 84.2 MM\$ de servicio de arrendamiento de equipo y 27 MM\$ por suministro de combustible y otros servicios.

Es importante hacer mención que en las tres alternativas, se considera el mismo equipo, diferenciándose únicamente en la forma de distribución del nitrógeno producido, inyección de 0.5, 0.75 y 1.0 mmpcd por pozo, este manejo del nitrógeno provoca que la alternativa 1 genere una mayor producción de aceite al operar 4 pozos.

---

---

## 6.0 CONCLUSIONES

1. Considerando el espacio disponible en la plataforma Batab A, y los requerimientos de espacio y peso del equipo de generación de nitrógeno por membranas, de las compañías Weatherford y Nitropet-Praxair, se concluye que únicamente se puede disponer de 2.16 MMPCD de N<sub>2</sub>.
2. Tomando en cuenta el volumen limitado de nitrógeno, y la simulación de diferentes volúmenes de N<sub>2</sub> por pozo. Se concluyó que el mayor incremento de producción se obtiene inyectando 0.5 MMPCD por pozo, lo cual implica poner en operación 4 pozos (Batab 11, 13, 21D y 23.) La aportación total esperada de estos pozos es de 9,946 bpd, para el primer año de operación y de 8,421 para el segundo.
3. Con base en los resultados obtenidos del estudio económico, la alternativa de inyectar 0.5 mmpcd de nitrógeno a los pozos Batab 11,13, 21D y 23, resulta ser la más atractiva por su mayor VPN generado, con un monto de 1,023 MM\$, ésto debido a su incremento de producción, requiriendo una inversión total de 111.39 MM\$ en un período de dos años, incluyendo el servicio de arrendamiento y costos de operación, y un periodo de recuperación de la inversión es de 48 días.
4. De acuerdo con las simulaciones realizadas a los pozos del plataforma Batab, todos ellos responden favorablemente a la inyección de N<sub>2</sub>, sin embargo los pozos que presentan las mayores producciones para los diferentes escenarios, para el periodo analizado de dos años, son: Batab 21D,11, 23 y 13.
5. Las tecnologías de membranas de las compañías de Praxair y Weatherford requieren de equipo de grandes dimensiones, peso y potencias 197 y 151 m<sup>2</sup>, 194 y 139 toneladas y 1,910 y 2,205 hp, respectivamente; para generar tan sólo 2.16 mmpcd de N<sub>2</sub>.

## 7.0 RECOMENDACIONES

1. En relación con el posible problema causado por las impurezas del N<sub>2</sub>, constituidas principalmente por O<sub>2</sub>, en volúmenes que pueden variar del 3 al 5%. En lo referente a la precipitación de azufre de deberá ser corroborado mediante un estudio profundo al respecto y avalado con pruebas de laboratorio. Asimismo debe ser analizada la alternativa del uso de secuestrantes de O<sub>2</sub> e inhibidores de corrosión.
2. A pesar de que la alternativa de inyectar N<sub>2</sub> es muy versátil y representa muchas ventajas en su aplicación, debe en el futuro considerarse, que es necesario contar con infraestructura para separar la mezcla (N<sub>2</sub> + hidrocarburos) ya que PGPB, solo permite el 2% de volumen de N<sub>2</sub> en el gas suministrado por PEP.

---

### III. NOMENCLATURA

O<sub>2</sub>: Oxígeno  
N<sub>2</sub>: Nitrógeno  
Ar: Argón  
°C: Grados centígrados  
lb/pg<sup>2</sup> man.: Libra por pulgada cuadrada manométrica  
NPU: Unidad de Producción de Nitrógeno  
INS: International Nitrogen Services  
scf/min: Pies cúbicos por minuto  
MMPCD: Millones de pies cúbicos por día  
Psi: Libra por pulgada cuadrada  
Hp: Caballos de potencia  
M<sup>3</sup>: Metros cúbicos  
Ton: Toneladas  
M<sup>2</sup>: Metros cuadrados  
lt. Litros  
V: Voltios  
Kg/cm<sup>2</sup>: Kilogramo por centímetro cuadrado  
JSK: Jurasico Superior Kinmeridiano  
BPKS: Brecha Paleoceno Cretácico Superior  
API: Instituto Americano del Petróleo  
BN: Bombeo neumático  
m: metros  
BP: Brecha paleoceno  
Sw: Corte de agua  
Q<sub>0</sub>: Gasto de aceite  
BPD: Barriles por día  
φ: Diámetro  
PWS: Presión estática  
ESTRAN: Estrangulación  
Q<sub>g</sub>: Gasto de gas  
RGA: Relación gas aceite  
PTP: Presión en la tubería de producción  
P. Sep: Presión de separación  
P<sub>b</sub>: Presión de burbuja  
R<sub>s</sub>: Relación de solubilidad  
B<sub>0</sub>: factor de volumen del aceite  
Pws: Presión estática  
Q<sub>giny</sub>: Gasto de gas de inyección  
\$/usd: Pesos mexicanos por dólar  
usd/bpce: Dólares americanos por barril de petróleo crudo equivalente  
usd/bl: Dólares americanos por barril  
SAE: Sistemas artificiales de producción

---

MM\$: Millones de pesos  
\$/lt: Pesos por litro  
Lt/día: Litros por día  
Usd/día: dólares americanos por día  
bld: Barriles  
\$/Bl: Pesos por barril  
VPN Valor presente neto  
VPI Valor presente de la inversión  
PGPB: Pemex Gas y Petroquímica Básica  
PEP: Pemex Exploración y Producción

---

---

## REFERENCIAS

- 1 <http://www.airliquideamericacorporation.com>. Año 2002.
- 2 **WEATHERFORD**. International Nitrogen Services, L. L. C. Presentación. Portable On-site generated Nitrogen Productions Units, Compressors and Boosters. Año 2001.
- 3 **PRAXAIR Nitropet S. A de C. V.** Presentación. Generación de nitrógeno con sistema de membranas. Año 2001.
- 4 **WEATHERFORD**. International Nitrogen Services, L. L. C. Catalogo. Nitrogen Process Unit. Año 2001. Houston Texas.
- 5 **WEATHERFORD**. Catalogo Drilling and Intervention Services. Año 2000. Houston Texas.
- 6 **LOZADA, A. M. Á.** Et. Al. Artículo. Bombeo Neumático con inyección de nitrógeno generado "in situ".
- 7 **IMP PROYECTO F** Estudio de factibilidad para la aplicación de sistemas artificiales de producción en el campo Jujo Tecominoacán. Año 2001.
- 8 **PEMEX**. Diseño, selección y aplicación de sistemas de bombeo neumático para el pozo Ku-445.
- 9 **PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN** Activo Pol Chuc. Expediente de pozos.
- 10 **IMP PROYECTO F 33756** "Servicio de consultaría y asistencia técnica para la aplicación de los sistemas de bombeo neumático y electrocentrífugo". Año 2001.
- 11 **CEALC. SOFTWARE GLOP** (Gas Lift Optimization and Design Program).
- 12 **BLANN, J. R.** Et Al. Determinación de la presión óptima del gas de inyección para una instalación de bombeo neumático. Año 1984.
- 13 **PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN**. Guía del ciclo de planeación 2001-2002. Premisas Económicas.
- 14 **PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN**. Operación costa afuera y trafico marítimo Dos Bocas, Tabasco. Información de embarcaciones abastecedoras. Año 2000.
- 15 <http://www.praxair.com/praxair.nsf>. Año 2002.
- 16 <http://www.n2services.com>. Año 2002.