

## DESARROLLO DE UN MODELO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL A TRAVÉS DE LÓGICA DIFUSA PARA CATEGORIZAR EL GRADO DE AGOTAMIENTO DE UN POZO PETROLERO

ESBEYDI VILICAÑA GARCÍA,  
ARTURO PALACIO PÉREZ  
Y SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ

Los combustibles fósiles representan 80% de la demanda mundial actual de energía primaria [1]. La mayoría de los países que tienen grandes depósitos de combustibles fósiles tienen economías que dependen de su extracción. Los pozos productores de petróleo se abandonan cuando el depósito se agota, es decir, cuando la cantidad de petróleo producido no es la suficiente como para que la extracción de hidrocarburos resulte rentable.

La lógica difusa es una extensión de la lógica Booleana convencional desarrollada para manejar el concepto de verdad parcial – valores de verdad entre “completamente verdadero” y “completamente falso”. La ventaja de la lógica difusa sobre otras técnicas en la caracterización de yacimientos es el hecho de que no se ve afectada por el déficit de datos relacionados a las condiciones físicas y de operación de los pozos petroleros, lo que constituye un serio desafío en las primeras etapas de la explotación de yacimientos [2]. Sin embargo, en la literatura revisada no se ha considerado el uso de la lógica difusa para categorizar un pozo petrolero como “sujeto a recuperarse”, es decir, que su producción sea muy baja en comparación a su punto máximo, pero que aún sigue teniendo recurso probado, con la intención de utilizar posteriormente técnicas de recuperación mejorada, si los resultados preliminares muestran que es factible. Se presenta el desarrollo y resultados preliminares de un modelo basado en lógica difusa para categorizar los pozos petroleros de acuerdo con variables geofísicas pertenecientes al crudo como la presión y producción, considerándose como variables principales y como variables secundarias: saturación, viscosidad, gravedad API, compresibilidad y factor de volumen. Se propone el uso de herramientas lógico difusas que, a través de funciones de membresía y la construcción de bloques de reglas, permiten determinar el nivel de pertenencia a cierta categoría y en consecuencia, elegir los pozos que cumplan con especificaciones

determinadas de acuerdo con valores publicados de las variables geofísicas consideradas.

El concepto de lógica difusa está relacionado con la manera en que las personas perciben su alrededor. Este tema es propio de la inteligencia artificial, donde se trata de imitar el pensamiento humano. En los conjuntos difusos se asigna un valor, grado de pertenencia o membresía al elemento respecto de un conjunto. Se le asocia un valor lingüístico que puede ser una etiqueta para asociarlo al nombre del conjunto. El conjunto difuso se caracteriza mediante una función de pertenencia o membresía. Si esta función toma el valor 0 significa que tal valor no está incluido, y si toma el valor 1 está absolutamente incluido [3]. La primera variable a considerar está relacionada con la presión. La presión de burbuja es una propiedad importante del petróleo, implica la presión a la cual los componentes más volátiles presentes en el petróleo empiezan a burbujear. El desempeño del yacimiento cambia significativamente cuando produce con presión por debajo del punto de burbuja. La presión en el punto de burbuja en yacimientos convencionales de petróleo varía entre 1800 y 2600 psi [4]. La manera de considerar la presión de burbuja es haciendo la relación entre la presión de operación del pozo y la presión de burbuja. El pozo se categoriza como “a recuperar” cuando la presión del pozo es menor a la presión de burbuja, lo que implica elegir la etiqueta de “apenas recomendable”, menor que 1 (Figura 1).

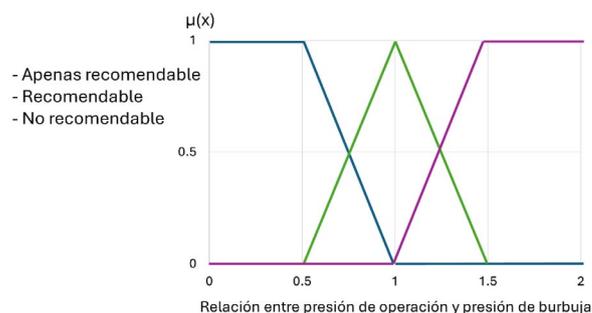


Figura 1. Representación de función de membresía Poperación/Pburbuja

En la industria petrolera intervienen diferentes tipos de presiones en la extracción del crudo, una de ellas es la presión hidrostática, que es la presión que ejerce en un punto determinado del pozo una columna de fluido debido a su densidad y a su altura. Otra presión que tiene relación con la extracción es la presión de formación; esta presión es la ejercida por el contenido de líquido o gas en el espacio poroso de

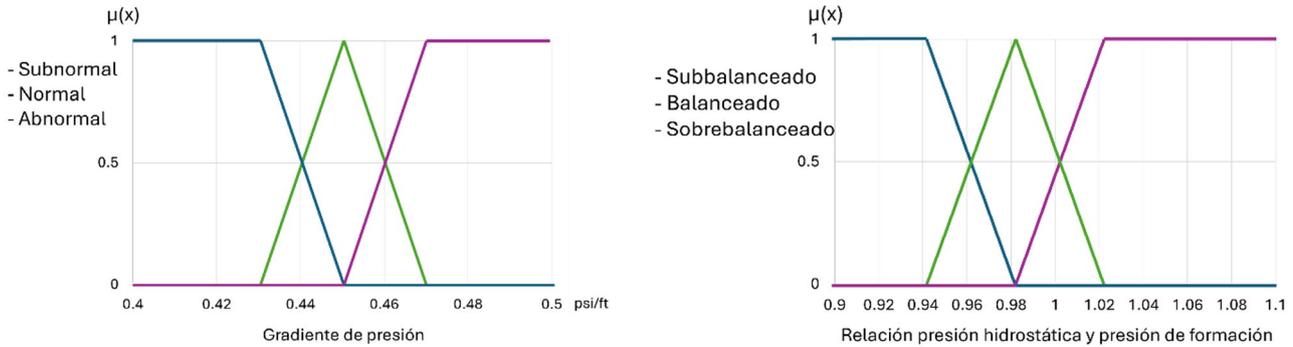


Figura 2. Representación de función de membresía a) para gradiente de P y b) Phidrostática/Pformación

la formación. La presión de formación se puede clasificar de acuerdo con el rango de valores que pueda presentar. Para fines de este estudio, se elige la presión subnormal, ya que implica tener una presión menor a la requerida para que el pozo funcione de manera “natural”; con base en eso, se puede clasificar el pozo como “a recuperar” (Figura 2a). Se busca que, con relación a la presión hidrostática, no haya disminución en el orden de 71 psi y que la presión de fondo del pozo no exceda 200 psi [5] (Figura 2b). Entonces, si se consideran los diferentes tipos de presión que se han discutido, las funciones de membresía implicarían que el gradiente de presión de formación sea menor a 0.433 psi/ft, además de que la relación de presión hidrostática y de formación sea menor a 0.95 para calificar el pozo petrolero como agotado o sujeto a recuperar.

Pemex Exploración y Producción considera que la parte más profunda de la Cuenca del Golfo de México es de mayor potencial petrolero, con un recurso prospectivo de 29,500 millones de barriles de petróleo crudo equivalente, lo que representa 56% del recurso total del país [6]. A partir de

2015 existen grandes expectativas de incorporar producción proveniente del Golfo de México, descuidando los recursos remanentes en la zona terrestre del país. Es por ello que, este trabajo se centra en la zona terrestre del país, principalmente en la zona de Veracruz, Puebla, Tamaulipas, y Tabasco (Figura 3).

Para mostrar el correcto funcionamiento de la metodología se busca que el gradiente de presión sea subnormal o abnormal. En cuestión a la relación entre la presión de operación y presión de burbuja, se esperaría que sea apenas recomendable, es decir, que la presión de operación sea menor a la presión de burbuja. Finalmente, respecto a la relación de presión hidrostática y presión de formación, sería en el caso de que la presión hidrostática fuese menor que la presión de formación. Se construyó un bloque de reglas, donde se combinan estas tres propiedades con sus respectivas calificaciones [7]. Por ejemplo, en la Tabla 1, lo que respecta a la regla 62, si el gradiente de presión es abnormal, la relación entre la presión de operación y la presión de burbuja es apenas recomendable, además, la relación entre la presión hidrostática y la presión de formación es sobreba-

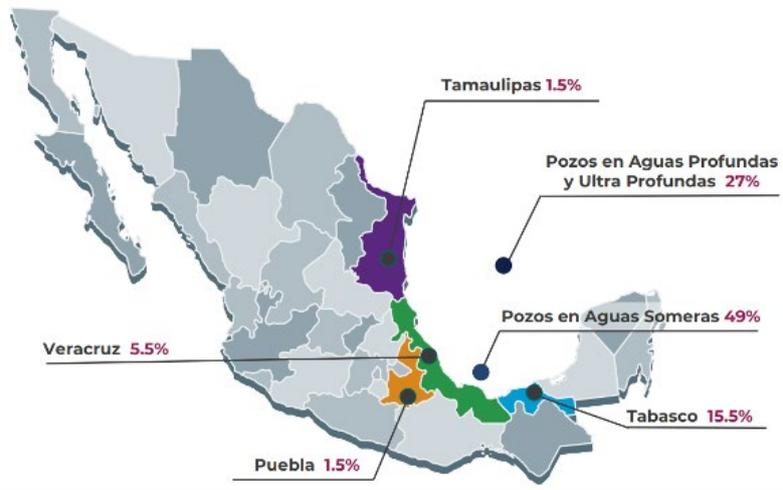


Figura 3. Recursos petroleros remanentes terrestres

Tabla 1. Bloque de reglas donde se califica el tipo de pozo, donde DoS = 1 está totalmente confirmada, DoS = 0 está totalmente descartada.

Regla		Gradiente de presión		Operación / Burbuja		Hidrostática / Formación		DoS	Calificación del pozo
1	Si	Subnormal	Y	Apenas recomendable	Y	Subbalanceado	Entonces	0	Apenas recuperable
52	Si	Normal	Y	No recomendable	Y	Sobresbalanceado	Entonces	0.66	Apenas recuperable
62	Si	Abnormal	Y	Apenas recomendable	Y	Sobresbalanceado	Entonces	0.33	Recuperable

lancheada, entonces, el grado de soporte de la regla (DoS) es uno a la etiqueta “recuperable”, es decir, es 100% recuperable. La combinación de las tres variables de presión que se están considerando con sus respectivas etiquetas que se analizaron anteriormente da como resultado 81 reglas.

Se utiliza el *software* FuzzyTech para analizar el sistema de estudio. Se especifican las variables de entrada con sus respectivos rangos de valores típicos (Figuras 1-2). Después se establece la variable de salida como la calificación del pozo, donde el rango de valores va de 0 a 100 %. Si el valor obtenido es exactamente 50 %, significa que el pozo es totalmente recuperable; si el valor es menor a 50 %, implica que es apenas recuperable y si el valor es mayor a 50% es no recuperable en esa misma proporción. No se debe perder de vista que se está calificando un pozo petrolero de acuerdo con las diferentes presiones ya definidas en párrafos anteriores, para determinar si puede estar sujeto a recuperarse con técnicas para modificar sus condiciones ya sea primaria, secundaria o mejorada. Una vez que se tienen las variables (entrada y salida), se debe especificar el bloque de reglas con las 81 reglas generadas y sus grados de pertenencia; esas reglas se generan a partir de la combinación de las tres variables con sus tres etiquetas. El proceso se muestra en la Figura 4 donde se inicia con datos de entrada que miden la variable del proceso para obtener el dato de salida que es la variable que se tomará para modificar el estado del proceso.

En el escenario que se está analizando, el gradiente de presión se mantiene constante empleando tres valores diferentes (0.4, 0.45 0.5) y se varían la relación Presión de operación/Presión de burbuja con tres valores entre 0 – 2 (siendo los valores típicos mostrados) y la relación Presión hidrostática/Presión de formación con tres valores entre 0.9 – 1.05. Lo que se observa en la Figura 5 es que si se tienen al menos dos variables con valores cercanos al límite inferior, conduce a que el resultado de la calificación del pozo es “recuperable”; esto tiene sentido, ya que el bloque de reglas se construyó bajo ese esquema. Las presiones subnormales, es decir, aquellas presiones que se encuentran

por debajo del gradiente normal, pueden producir problemas de pérdida de circulación en los pozos perforados con lodo de perforación líquido. Por otro lado, en el caso 7, la etiqueta resultante es “NRE”, es decir, no recuperable; esto se comporta de acuerdo con las reglas que se establecieron en el bloque de reglas, donde los valores 0.45 para el gradiente de presión, 0.8 para la presión de operación / presión de burbuja y 1 para presión hidrostática con presión de formación, son valores intermedios en los rangos de cada caso. Implica entonces que, las condiciones son las adecuadas para seguir produciendo.

El creciente problema de desabasto de combustibles ha dado pie a la búsqueda de alternativas para el mejor aprovechamiento de los recursos existentes. Por eso la importancia de categorizar a los pozos petroleros con la intención de que conociendo parámetros de presión se pueda determinar si puede ser factible, ya que actualmente no se presentan alternativas para que de manera sencilla y rápida se puedan calificar. Uno de los puntos más importantes es que no se requieren bases de datos para generar resultados. Se verificó la metodología con tres variables asociadas a la presión del pozo petrolero, demostrando que los resultados son congruentes con lo que se establece en el bloque de reglas. Posteriormente, se requiere hacer el análisis para el resto de variables que se consideren más representativas. Cabe destacar que este es el primer paso, como trabajo futuro, se pretende que después de categorizar el pozo, se elija la mejor opción de técnica de recuperación mejorada de acuerdo con disponibilidad, costo y factibilidad.

Se pretende promover el uso de incentivos económicos para la incorporación de técnicas de recuperación mejorada. Finalmente, a partir de este modelo derivado de la inteligencia artificial, se buscará encontrar la mejor geolocalización de los pozos inyectores en la recuperación de los pozos, siendo importante destacar que, la metodología propuesta no sólo puede ser utilizada para predecir el agotamiento de los pozos, sino que, de manera conjunta se podrían hacer estudios de factibilidad económica conforme la vida del pozo petrolero va avanzando, dando un gran espectro de aplicabilidad. |



Figura 4. Etapas para la toma de decisiones

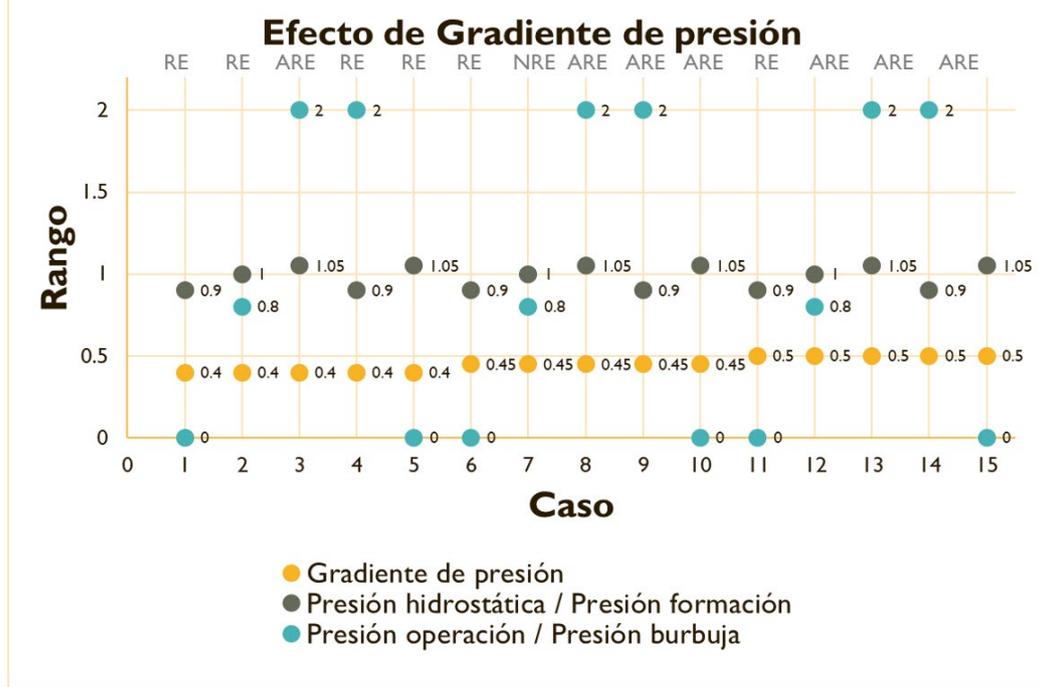


Figura 5. Variación de Phidrostatica/Pformación y variación de Poperación/Pburbuja (RE: Recuperable, ARE: Apenas recuperable, NRE: No recuperable)

## Referencias

- [1] Naciones Unidas. El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible#:~:text=Los%20combustibles%20f%C3%B3siles%20comprenden%20el,emisiones%20globales%20de%20CO2>. (Accesado Junio 2024).
- [2] Okwu, M. O.; Nwachukwu, A. N. (2019). A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 9 1555-1568. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0560-2>.
- [3] Capítulo 2. (2023). Conceptos fundamentales de lógica difusa. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6887/04Rpp04de11.pdf;sequence=4> (Accesado Enero 2024).
- [4] Satter, A.; Iqbal, G. M., *Reservoir Engineering: 4-Reservoir fluid properties*. (2016) 81-105. ISBN: 978-0-12-800219-3. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13485-X>.
- [5] Conceptos básicos de presiones. <https://s8dcd9b0a8ad1af4e.jimcontent.com/download/version/1526422818/module/5702463066/name/03%20PRESIONES.pdf>. (Accesado Febrero 2024).
- [6] Servicio Geológico Mexicano, *Petróleo en México* (2017). [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Petroleo-en-Mexico.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Petroleo-en-Mexico.html). (Accesado Julio 2024).
- [7] Villacaña-García E. (2024). Esquema para determinar el estado de un pozo petrolero utilizando herramientas de inteligencia artificial. Informe Final. Estancia Posdoctoral. Instituto de Ingeniería, UNAM.