

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL PARA LA SELECCIÓN DE
NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE PARA EL AUMENTO DEL FACTOR DE RECOBRO
COMO MÉTODO DE RECUPERACIÓN AVANZADA DE HIDROCARBUROS**

ANGIEE LIZZETH LAGOS CRISTANCHO

FIDEL ESTEBAN QUEVEDO ORJUELA

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA DE YACIMIENTO**

DIRECTOR

EDINSON ENRIQUE JIMÉNEZ BRACHO

MsC EN INGENIERIA DEL GAS

CODIRECTORES:

ALEX JOSE CUADRADO SALAZAR

CANDIDATO PhD EN INGENIERIA – SISTEMAS ENERGETICOS

JORGE EDUARDO ROMERO DOMINGUEZ

**MsC EN GERENCIA DE PROYECTOS DE INVESTIGACION Y DESARROLLO, MsC
EN EXTRACCION DE CRISIS PASADAS**

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE MAGISTER EN INGENIERÍA DE YACIMIENTOS

BOGOTÁ D.C

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. marzo de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario general

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

DEDICATORIA

A mis padres por haberme moldeado en la persona que soy hoy en día. Quiero dedicar este logro de manera especial a mi madre, cuya voz alentadora ha sido fundamental en este proceso. Madre mía, te entrego mi trabajo como una ofrenda en reconocimiento a tu paciencia y amor incondicional.

Asimismo, dedico este triunfo a mi querida abuelita Elvira, que ahora descansa en el cielo, agradeciéndole por su constante cuidado en cada paso que doy. No puedo dejar de mencionar a mi hermano Felipe, mi motor y apoyo a lo largo de mi vida. Él es la razón

Extendiendo mi gratitud, dedico todos mis logros a mis abuelitos, tíos, tías, primos y amigos. A cada uno de ustedes les agradezco por su compañía, sabios consejos y apoyo incondicional. Su presencia ha sido fundamental en mi camino hacia el éxito.

Angiee Lizzeth Lagos Cristancho

Quiero dedicar este trabajo de grado en primer lugar a mis papás, debido a que sin ellos nada de esto sería posible, a mis hermanas por ser un apoyo incondicional en todo momento y en cada nuevo objetivo que me planteo y a una de mis mayores motivaciones, mi sobrino, quien cada día me ayuda a mejorar y a plantearme nuevos objetivos, metas y proyectos.

Fidel Esteban Quevedo Orjuela

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por el preciado regalo de la vida. En segundo lugar, expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, cuya confianza inquebrantable en mí ha sido el impulso que necesitaba para convertir mis sueños en realidad. También quiero dedicar este agradecimiento a mis abuelitas y abuelito por su amor incondicional.

En particular, extiendo mi gratitud a mi tía Blanca, cuya ayuda fue fundamental durante todo el tiempo que tuve que viajar para estudiar y perseguir mis metas. A Kata, mi compañera de tantos años, le agradezco su apoyo constante y su colaboración.

No puedo pasar por alto agradecer al autor más significativo en mi viaje académico, mi compañero Fidel Quevedo, por compartir conmigo valiosos conocimientos. Hemos crecido juntos de la mejor manera a lo largo de este camino.

Asimismo, mi reconocimiento se extiende a los docentes, debido a que, sin su dedicación y enseñanzas, este desafío no habría sido posible. A todos, les agradezco sinceramente por ser parte esencial de mi camino hacia el logro de mis metas.

Angiee Lizzeth Lagos Cristancho

Me gustaría expresar mi más sincero sentimiento de gratitud a todas las personas que hicieron parte de este proceso, que más allá de ser la realización de un documento es la representación de una meta mas que fue cumplida en mi vida. Quiero agradecer a los compañeros de estudio, con quienes estuvimos todo el tiempo luchando por sacar esto adelante. A mis papás Martha Orjuela y Fidel Quevedo quienes siempre me han apoyado en mis objetivos e hicieron posible esto, a mis hermanas y mi sobrino por ser una motivación constante. Gracias.

Fidel Esteban Quevedo Orjuela

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Lenguajes de programación	13
2.2 Visual basic	14
2.3 Recuperación avanzada de hidrocarburos (EOR)	16
2.3.1 Métodos térmicos	17
2.3.2 Métodos miscibles	19
2.3.3 Métodos químicos	21
2.4 Nanopartículas	23
2.4.1 Riesgos de uso	24
2.4.2 Clasificación de nanopartículas	27
2.5 Propiedades importantes del yacimiento para la programación del software	30
3. METODOLOGÍA Y DATOS	37
3.1 Etapa 1. Recolectar y refinar la información	38
3.2 Etapa 2. Determinar los datos de entrada de mayor impacto para la selección de nanopartículas	38
3.3 Etapa 3. Programación del software propuesto en Visual Basic	40
3.4 Etapa 4. Ejecutar los algoritmos para corroborar el funcionamiento del código usando un caso base	41
3.5 Etapa 5. Simular en CMG el caso base en distintos escenarios para comparar y comprobar la funcionabilidad del programa propuesto	42

3.6	Etapa 6. Conclusiones y recomendaciones	42
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
4.1	Proceso de recopilación de características necesarias para determinar las variables de selección de nanopartículas	44
4.2	Programación del software propuesto en Visual Basic	48
4.3	Ejecución de algoritmos para corroborar el funcionamiento de código usando un caso base	56
4.4	Simulación de un caso base en el software CMG para comprobar la funcionalidad de la herramienta digital “Nanosilselect”	59
5.	CONCLUSIONES	68
	REFERENCIAS	70
	ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Lenguaje de Programación</i>	13
Figura 2 <i>Ilustración de recobro térmico</i>	18
Figura 3 <i>Recobro con mecanismos miscibles</i>	20
Figura 4 <i>Recobro químico</i>	21
Figura 5 <i>Gráfica deposición de nanopartículas en el cuerpo según tamaño, composición y forma</i>	26
Figura 6 <i>Uso de nanofluidos para enjuagar el sistema</i>	30
Figura 7 <i>Metodología y datos</i>	38
Figura 8 <i>Vista de las herramientas del software propuesto en Visual Basic</i>	40
Figura 9 <i>Vista de New text file del software propuesto en Visual Basic</i>	41
Figura 10 <i>Bienvenida de Nanosilselect</i>	50
Figura 11 <i>Pestaña con Check list de datos y unidades.</i>	51
Figura 12 <i>Datos de entrada del yacimiento</i>	52
Figura 13 <i>Composición del crudo mediante análisis SARA</i>	53
Figura 14 <i>Instrucciones opción permeabilidades relativas</i>	53
Figura 15 <i>Gráfica de tendencia de la permeabilidad relativa</i>	54
Figura 16 <i>Posibles resultados</i>	55
Figura 17 <i>Posibles resultados</i>	56
Figura 18 <i>Datos de entrada a “Nanosilselect”.</i>	58
Figura 19 <i>Nanopartícula de sílice más apta para el yacimiento de estudio</i>	59
Figura 20 <i>Visualización 3D pozo inyector y pozo productor</i>	60
Figura 21 <i>Planta del bloque del modelo de simulación</i>	61
Figura 22 <i>Tasa de producción de líquido</i>	61
Figura 23 <i>Producción de petróleo para cada escenario de simulación</i>	62
Figura 24 <i>Corte de agua</i>	63
Figura 25 <i>Porcentaje de producción de petróleo en la tasa de líquido total</i>	64
Figura 26 <i>Factor de recobro</i>	65
Figura 27 <i>Factor de recobro óptimo</i>	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Etapas de producción con sus mecanismos</i>	22
Tabla 2 <i>Operación y usos de las nanopartículas</i>	24
Tabla 3 <i>Escala tres dimensiones</i>	27
Tabla 4 <i>Escala dos dimensiones</i>	28
Tabla 5 <i>Escala una dimensión</i>	28
Tabla 6 <i>Nanopartículas con potencial de utilización y compatibilidad en ingeniería de yacimientos</i>	29
Tabla 7 <i>Variables del reservorio</i>	39
Tabla 8 <i>Variables para caracterizar el yacimiento</i>	44
Tabla 9 <i>Clasificación de la Matriz de impacto por colores</i>	45
Tabla 10 <i>Matriz de Impacto de las variables para la selección de nanopartículas</i>	46
Tabla 11 <i>Variables para implementar en el software</i>	47
Tabla 12 <i>Rangos de aplicación de variables a incluir en el software</i>	47
Tabla 13 <i>Información base del yacimiento</i>	57

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se centra en el campo del diseño de herramientas digitales, abordando específicamente el desarrollo de una aplicación innovadora destinada a la selección de nanopartículas de sílice. Este enfoque tecnológico tiene como objetivo optimizar el factor de recobro en el contexto de la recuperación avanzada de hidrocarburos.

La importancia de este proyecto radica en su contribución al avance de técnicas y metodologías para mejorar la eficiencia en la extracción de hidrocarburos, proporcionando así una valiosa herramienta para la industria energética. La aplicación propuesta busca integrar de manera efectiva la tecnología digital en el proceso de selección de nanopartículas, ofreciendo soluciones avanzadas que impacten positivamente en la recuperación de recursos petrolíferos, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia en el sector.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta digital que permita la selección de las nanopartículas de sílice para el aumento del factor de recobro en recuperación avanzada de hidrocarburos a partir de las propiedades del reservorio.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar los factores o variables que influyen en la selección de nanopartículas como proceso de recobro mejorado.
2. Realizar la programación en Visual Basic tomando en cuenta las variables estudiadas anteriormente para la selección de nanopartículas de sílice.
3. Seleccionar mediante la herramienta digital las nanopartículas de sílice para la aplicación en un caso base.
4. Comparar los distintos escenarios de las nanopartículas de sílice en CMG para validar los resultados de la herramienta digital.

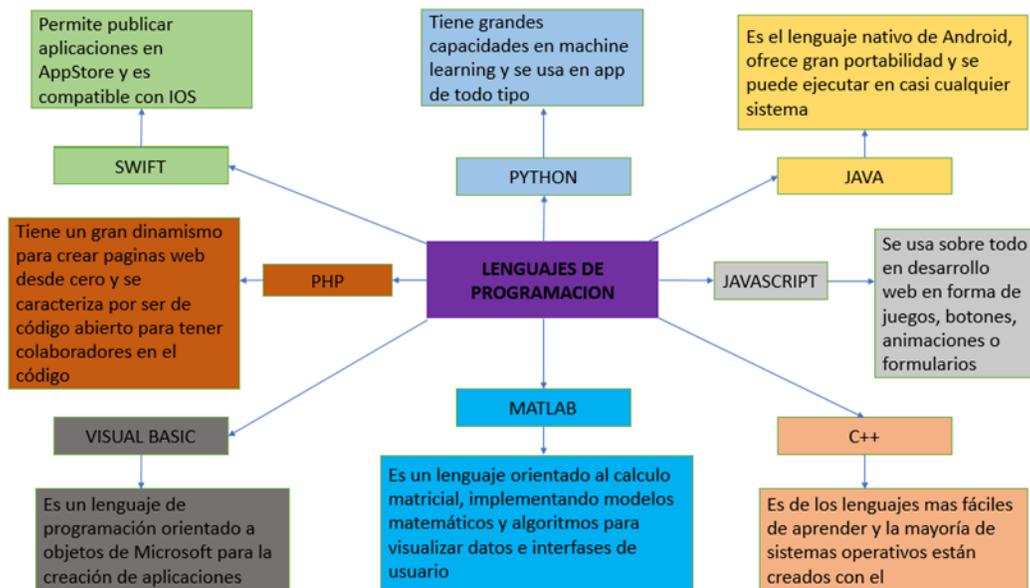
2. MARCO TEÓRICO

2.1 Lenguajes de programación

Los lenguajes de programación son instrucciones o secuencias de órdenes escritas en forma de algoritmos con el objetivo de llevar a cabo un comportamiento físico o lógico de una herramienta digital creada con un fin específico destinado por el programador, dichos lenguajes tienen reglas gramaticales propias de cada uno para generar estructuras lógicas y ejecutables. En la actualidad existe una gran cantidad de lenguajes de programación disponibles y su uso dependerá de los objetivos del programa, el diseño de la interfaz del programa, los sistemas operativos en los que será usado y las preferencias del programador, algunos de los más utilizados son Python, Java, JavaScript, C++, Matlab, Visual Basic, PHP y Swift. Adicionalmente cada lenguaje de programación tiene sus fuertes y debilidades por esta razón no se puede dar una opinión certera de cuál es el mejor, debido a que cada uno es bueno teniendo en cuenta el objetivo con el que fueron creados y la versatilidad que puede tener el usuario en los resultados del software en desarrollo.

Figura 1

Lenguaje de Programación



Nota. La figura representa el énfasis de aplicabilidad de los diferentes lenguajes de programación.

2.2 Visual basic

Es un programa creado en 1991 por Alan Cooper y es uno de los lenguajes de programación más conocidos. Dicho por Microsoft “Visual Basic es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Microsoft. El uso de Visual Basic agiliza y simplifica la creación de aplicaciones .NET con seguridad de tipos” [1]. La interfaz usada en Visual Basic es muy completa para la creación de Software nuevos, la cual puede llegar a tener la virtud de hacer que los resultados sean muy dinámicos, visuales y simples de usar.

El Visual Basic inicialmente fue creado como una herramienta de programación que agilizaría el aprendizaje de universitarios para la creación de aplicaciones o páginas web junto con la familiarización con los lenguajes de programación. Con el tiempo Visual Basic fue evolucionando y poco a poco generando nuevas versiones en las que se iban incluyendo nuevas opciones de uso y se iba diversificando los objetos que se podían incluir en la programación, también incluyeron en sus diferentes enfoques para los proyectos que se deseen crear la opción de elegir el lenguaje de programación a usar sin forzar al usuario a tener claro un lenguaje específico, de esta manera se puede ampliar la aplicación de un formulario programado a distintos sistemas operativos como lo son IOS y Microsoft usando lenguajes de programación como lo son C++ o C#. De esta manera con todos los avances que hicieron dieron origen al gran potencial que tiene en la actualidad.

En la programación Visual Basic tiene en su interfaz la opción de interactuar con los formularios con acciones como la de arrastrar objetos al módulo programado, generando una conexión entre los módulos de programación y lo que implica el diseño de la misma, pero sin sobre pasar o extralimitar las funciones de cada uno, logrando “armonía” en su funcionamiento. Incluye ocho (8) características importantes que es necesario saberlas para su uso las cuales son:

- Barra de título: Es donde se selecciona el proyecto y la formulación que se está modificando y diseñando.
- Barra de menús: Agrupa los menús que contienen todas las acciones y eventos que pueden ser realizados

- Barra de herramientas: Este menú es el que es usado con más frecuencia, debido a que contiene agrupadas las herramientas de los menús de archivo, edición, ver y ejecutar. También dando opciones adicionales como la visualización de la ubicación de los objetos junto con la selección del tamaño de los objetos
- Ventana del formulario: Es donde se encuentra el espacio destinado para el diseño de la interfaz de la aplicación en donde se insertan los botones, imágenes, check box, list box, etc.
- Cuadro de herramientas: Contiene los controles necesarios para diseñar el formulario como por ejemplo los cuadros de texto, botones de comando, etc.
- Ventana del proyecto: Contiene todo lo que está involucrado en el proyecto que se está desarrollando con el objetivo de visualizar y poder editar desde dicha ventana algunas características de los formularios, módulos, controles, objetos, etc.
- Ventana de posición del formulario: Esto es importante para el tema de diseño de la interfaz del proyecto, debido a que nos muestra la posición que tendrán los formularios al ejecutar la programación.
- Ventana de propiedades: En esta ventana se muestran las propiedades de los controles de los formularios, el nombre de los objetos junto con su ubicación y el tipo de objeto seleccionado junto con algunos datos de la configuración.

Para entender un poco más el funcionamiento de Visual Basic es necesario tener claros varios términos que hacen referencia al uso y función de cada acción que se quiera lograr.

- Evento: Es la acción que se pretende que cumpla el usuario para que un objeto ejecute una acción previamente programada, cada control puede depender de una acción diferente y puede ser visualizada en la ventana donde se tenga el código en ejecución.
- Métodos: Se refiere a los procedimientos o pasos definidos para el código por Visual Basic para el funcionamiento correcto de un control u objeto determinado.

- **Controles:** Los controles son objetos con los que el usuario puede llegar a interactuar con la aplicación creada como por ejemplo para cambiar de una pestaña a otra o seleccionar una opción de un check list.
- **Proyecto:** El proyecto es el formulario y ventana de código nueva creada para la programación y diseño de un programa o aplicación nueva con un objetivo específico.
- **Propiedades:** Hacen referencia a la información específica de la configuración de un objeto o formulario.
- **Objeto:** Son elementos que pueden ser usados en el formulario con uno o varios objetivos específicos los cuales tienen en su uso y funcionamiento relacionados un conjunto de propiedades, métodos y eventos que pueden ser únicos para cada objeto implementado.
- **Clases o controles:** Hace referencia a las distintas acciones que tiene como objetivo realizar un grupo de objetos, las cuales pueden ser similares y por esto hacer parte de un mismo grupo de control.
- **Módulos:** Estos son implementados por Visual Basic debido a que la programación no solo está inmersa en los formularios donde es diseñado el aplicativo, sino que también están escritos los códigos en un fichero de Visual Basic donde se escriben para poder ejecutar con éxito el fin del proyecto.

2.3 Recuperación avanzada de hidrocarburos (EOR)

La recuperación avanzada de hidrocarburos con su abreviación EOR (enhanced oil recovery) la cual también tiene por nombre recuperación mejorada de petróleo o recobro terciario, se refiere a las diversas técnicas aplicadas para la recuperación de petróleo una vez el yacimiento ha pasado por el proceso de recobro primario en donde la producción se da por los mecanismos naturales, los cuales son expansión roca-fluido, segregación gravitacional, acuífero activo, gas en solución y capa de gas, luego de que el yacimiento se depleta y dichos mecanismos de producción no proporcionan la suficiente energía al fluido para recorrer el pozo hasta la superficie se inicia el recobro secundario en donde se aplican técnicas como la inyección de agua e inyección de gas con el objetivo de generar aumentos de presión y provocar el empuje del petróleo con

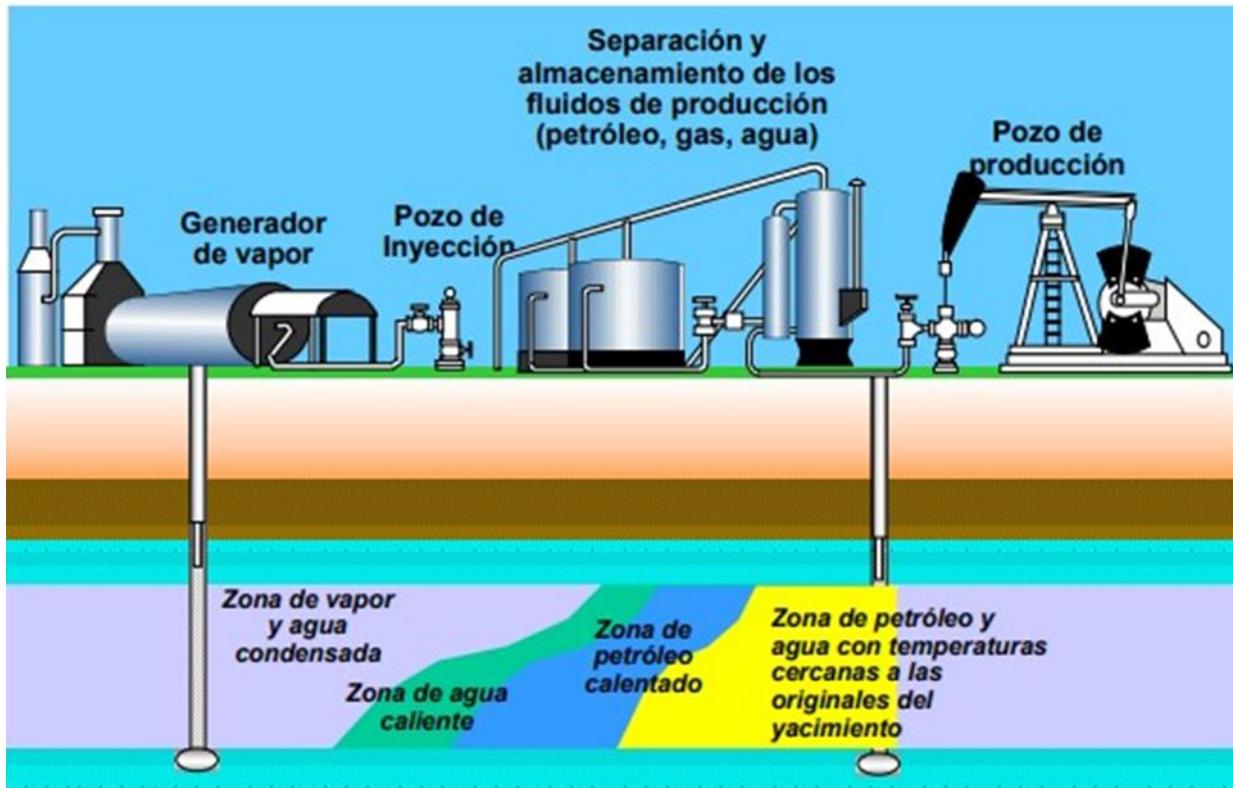
los fluidos inyectados siempre teniendo en cuenta la eficiencia de barrido areal, posterior a esto el yacimiento llega al punto en el que el petróleo remanente no fluye a superficie porque las técnicas implementadas pierden su efectividad debido a las propiedades de los fluidos y la transición de etapa de producción que tiene el reservorio, por tal motivo como último grupo de técnicas para el aumento de producción se usa el recobro terciario que también son implementados en crudos pesados o extrapesados de forma más prematura, debido a que estos métodos tienen mayor capacidad para fomentar la producción, para ellos se pueden implementan técnicas de métodos térmicos, métodos químicos y métodos miscibles [2], [3].

2.3.1 Métodos térmicos

El mecanismo principal con el que funcionan los métodos de recuperación térmica como su nombre lo indica es con la transferencia térmica desde la superficie hasta la formación productora de distintas maneras, ya sea con agua, vapor, aire o generando combustión controlada en el reservorio buscando generalmente la reducción de viscosidad con el aumento de la temperatura [4].

Figura 2

Ilustración de recobro térmico



Nota. La figura representa el recobro térmico (Generador de vapor, Pozo de Inyección, Separación y almacenamiento de los fluidos de producción, Pozo de producción). Tomado de: M. Madrid, "Procesos Térmicos en la Recuperación Mejorada de Petróleo, "Portal del petróleo, 2020". Disponible:<https://www.portaldelpetroleo.com/2020/07/procesos-termicos-en-la-recuperacion.html>

- **Inyección de agua caliente:** Es la inyección de agua con altas temperaturas pero sin llegar al punto de ebullición, de esta manera promoviendo el desplazamiento del petróleo de forma inmisible y con la reducción de la viscosidad para que la movilidad de los hidrocarburos aumente[6].
- **Inyección continua de vapor:** Es la inyección de vapor de agua en donde es de gran importancia tener en cuenta la calidad del agua. Con este método de recobro mejorado se busca generar una nube de vapor en el yacimiento que va a generar un empuje a los fluidos y también va a reducir la viscosidad mejorando la movilidad. Es uno de los mecanismos más usados.

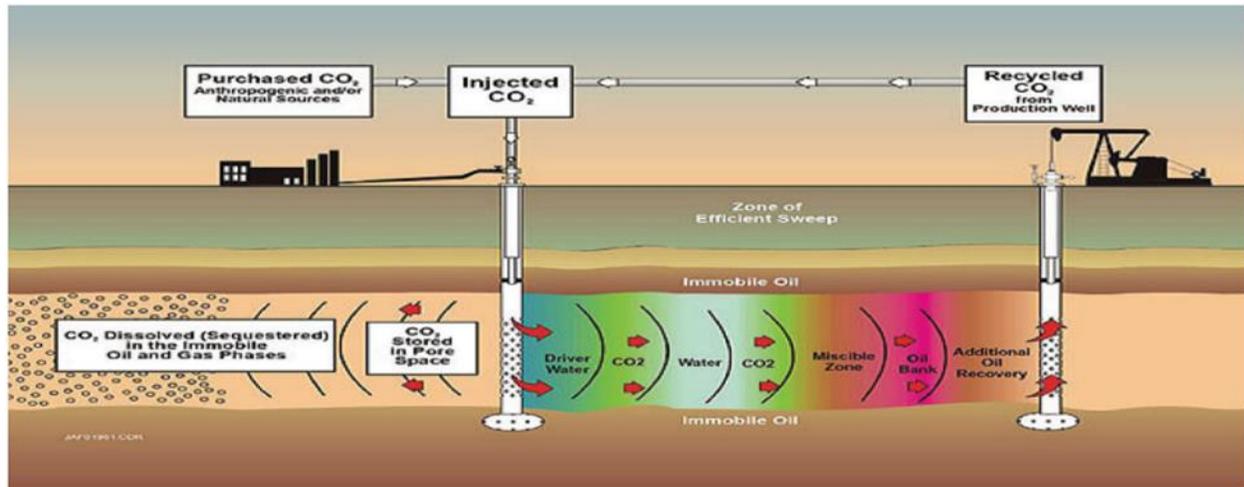
- **Inyección cíclica o alternada de vapor:** La inyección por ciclos de vapor puede darse de dos maneras, puede ser aplicada en un pozo que va a ser productor e inyector en donde se inyecta de forma continua el vapor por un lapso de tiempo, luego el pozo es cerrado unos días para que entre en fase de remojo y se transfiera la energía térmica para dar paso a la puesta en producción, esta operación es necesario repetirla cuando el campo de nuevo esta con baja producción. La inyección alternada de vapor también se puede dar con arreglos de pozos en los que se inyecta por baches vapor y luego se usa otro fluido de inyección.
- **Combustión in situ (CIS):** La combustión in situ consiste en producir la ignición de la formación de forma controlada, buscando obtener el aumento de la temperatura y con ello que los mecanismos de producción sean dados por la temperatura, empuje por gases de combustión, vapor de agua, empuje por agua y el aumento de la movilidad, es una técnica muy complicada de llevar a cabo pero que puede dar muy buenos resultados con buenas prácticas.

2.3.2 Métodos miscibles

Estos métodos usan las propiedades de los gases para que al ser inyectados se incorporen en los fluidos del yacimiento, de esta manera mejorando la movilidad de los hidrocarburos reduciendo la tensión interfacial entre el fluido inyectado y el crudo [6].

Figura 3

Recobro con mecanismos miscibles



Nota. La figura representa el método de recobro con mecanismos miscibles. Tomado de: J. L. Ramos, C. A. Duarte Prada, I. R. Astros Fonseca, and Á. D. P. Trujillo Montes, "Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de la inyección alternada agua-gas combinada con la inyección de químicos en un campo de crudo mediano en Colombia," *Rev. Invest. (Guadalajara)*, vol. 6, no. 2, pp. 137–161, 2013, doi: 10.29097/2011-639x.151.

- **Inyección de CO₂:** Consiste en la inyección de gas con el fin de que a condiciones específicas de presión, temperatura y densidades tanto del petróleo como del CO₂ se logre la miscibilidad del gas en el petróleo, de esta manera se logra aumentar la permeabilidad relativa al petróleo y la movilidad. También puede darse la inyección inmisible cuando las condiciones de presión, temperatura y densidades no son favorables para la miscibilidad, aunque no es lo más óptimo también puede ser funcional, aunque con menor efectividad. Puede tener buenos resultados en formaciones de carbonatos [8], [9].
- **Inyección de N₂:** En este tipo de inyección se busca que el N₂ se introduzca de forma miscible en los hidrocarburos contenidos en un yacimiento con el objetivo de generar un fluido menos viscoso y aumentando la fuerza de empuje de los fluidos teniendo en cuenta que el nitrógeno una vez introducido en el reservorio produce dos fases de fluido separadas de gas producida con los livianos del crudo y fase líquida que será empujada a superficie por los gases generados e inyectados [10].

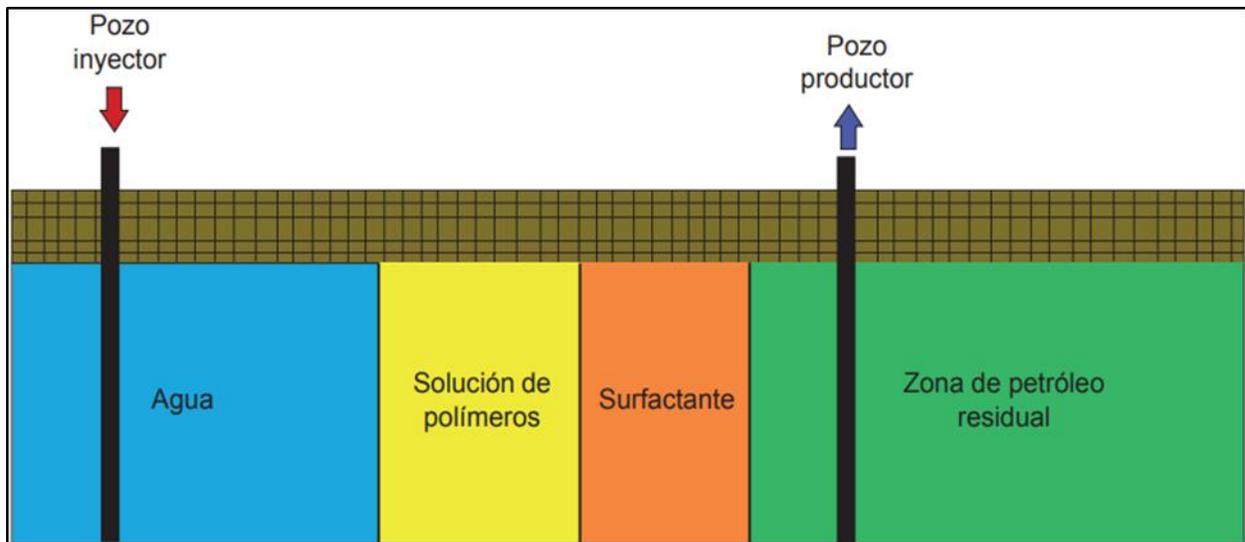
- **Inyección de hidrocarburos:** Con este método de recobro mejorado se busca principalmente alterar las condiciones de viscosidad y la expansión del petróleo provocada por la inyección de componentes livianos provenientes del petróleo empleando gas licuado de petróleo, gas natural con alto contenido de etano y hexano o inyección a altas presiones para fomentar la liberación de los componentes livianos de los fluidos del yacimiento.

2.3.3 Métodos químicos

En estos métodos de recobro mejorado aplicados se busca modificar algunas propiedades de los fluidos y de la interacción roca fluido de esta manera utilizando surfactantes, polímeros, álcalis y de manera más reciente la utilización de nanopartículas obteniendo como resultado la reducción de la tensión superficial, tensión interfacial, cambios de mojabilidad y mejorar la movilidad del petróleo para que fluya el crudo a la superficie [2], [3].

Figura 4

Recobro químico



Nota. La figura representa el método del recobro químico. Tomado de: J. L. Ramos, C. A. Duarte Prada, I. R. Astros Fonseca, and Á. D. P. Trujillo Montes, "Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de la inyección alternada agua-gas combinada con la inyección de químicos en un campo de crudo mediano en Colombia," *Rev. Invest. (Guadalajara)*, vol. 6, no. 2, pp. 137–161, 2013, doi: 10.29097/2011-639x.151.

- **Inyección de surfactantes:** Por lo general son inyectados sulfonatos de petróleo que logren reducir la tensión interfacial entre el agua y el petróleo para generar una emulsión que permita el desplazamiento del hidrocarburo a través del espacio poroso hasta la superficie manteniendo en un punto la tensión entre las fases para que sea posible generar la movilización.
- **Inyección de polímeros:** También es conocido como inyección de agua mejorada. Es un proceso en el que se busca inyectar agua con un polímero que aumente su viscosidad, de esta manera aumentando la eficiencia de barrido generada por el empuje del agua al petróleo. Este método puede reducir la permeabilidad de la formación por la adsorción del polímero en la roca y debe ser inyectado a temperaturas menores a 175 °F [3].
- **Inyección de álcalis:** Se busca reducir la tensión interfacial mejorando el flujo a través del yacimiento debido a que por reacciones químicas se forman surfactantes que dan origen a una emulsión que aumentara la producción. La aplicación de álcalis es funcional siempre y cuando se utilice en reservorios con hidrocarburos con contenidos de resinas y asfáltenos los cuales ayudan a formar los surfactantes [11].

Tabla 1

Etapas de producción con sus mecanismos

ETAPA DE LA RECUPERACIÓN	NOMBRE	FACTOR DE RECOBRO %
Primaria	Flujo natural	8% - 30%
Primaria	Levantamiento artificial	15% - 30%
Secundaria	Inyección de gas	30% - 60%
Secundaria	Inyección de agua	30% - 60%
Terciaria	Métodos térmicos	30 % - > 60%
Terciaria	Métodos miscibles	30 % - > 60%
Terciaria	Métodos químicos	30 % - > 60%
Terciaria	Inyección de nanopartículas	30 % - > 60%

Nota. Esta tabla muestra un resumen de las etapas de producción con sus mecanismos y factor de recobro en porcentaje.

2.4 Nanoparticulas

En 1959 el físico con premio Nobel, Richard Feynman fue la primera persona en hablar sobre las posibles aplicaciones de la nanotecnología en el instituto tecnológico de California, en donde presento sus teorías sobre la síntesis de los elementos por medio de la manipulación atómica. El termino de nanotecnología inicio en 1974 por Norio Taniguchi y posteriormente en la década de 1980 formalmente inicia el campo de investigación de la nanotecnología la cual fue promovida por el ingeniero estadounidense Kim Eric Drexler, dichos avances y posibilidades de progreso en las investigaciones fueron posibles por los adelantos de la microscopía en la época. A partir de los años 2000 las nanopartículas o nanomateriales comenzaron a ser de interés para las industrias y los gobiernos por su diversa aplicación, por este motivo comenzaron las inversiones en investigación y desarrollo de la nanotecnología, inicialmente su enfoque fue en la bioquímica, ingeniería genética y la medicina. En la actualidad el campo de investigación y aplicación de la nanotecnología tiene mayor campo de aplicación, tienen mucha más visibilidad y llega a ser un área de gran demanda en países e industrias de gran desarrollo. [12], [13]

La nanotecnología es un área de investigación encargada de modificar los materiales a escala atómica y molecular con el objetivo de dar origen a materiales novedosos con configuraciones moleculares únicas que posteriormente pueden ser usadas como pequeñas maquinas que serán activadas a condiciones específicas en un área de aplicación para la que fueron creadas, para funciones y efectos específicos.

Las nanopartículas pueden abrir una nueva revolución industrial, científica y tecnológica [13]. Tienen un tamaño de 1 a 100 nanómetros que permiten intervenir en la composición química de procesos, modificar el ADN de seres vivos y de alguna manera programarlos para que desarrollen tareas específicas que se encarguen de alterar una propiedad poco favorable para un proceso, el tamaño a usar será definido de acuerdo al presupuesto y al fin del material a implementar, debido a que en casos como in la industria de los hidrocarburos la dimensión de las partículas es importante para no taponar el espacio poroso de la roca, permitiendo el flujo y transporte eficiente de los fluidos y partículas.

En el área de la industria de los hidrocarburos la nanotecnología tiene gran potencial de aplicación debido a la diversidad de fluidos y operaciones que conlleva el desarrollo de la operación desde la exploración hasta el abandono. De esta manera los nanofluidos pueden ser usados en exploración como trazadores, en perforación como mejoradores del fluido de perforación o de las lechadas de cementación y en la producción pueden ser usados para mejorar las características de los fluidos de inyección como para modificar algunas características importantes de la formación productora para poder aumentar la producción y con ello el factor de recobro, teniendo un gran potencial en la recuperación avanzada de hidrocarburos (EOR), por tal motivo es importante comenzar a hacer uso de las herramientas y avances tecnológicos para poder apoyar las labores de ingeniería en dicha industria.

Tabla 2

Operación y usos de las nanopartículas

OPERACIÓN	USO
Exploración	Mejorar la respuesta de las pruebas de exploración funcionando como trazadores.
Perforación	Busca mejorar la durabilidad y eficiencia de del lodo de perforación junto con su resistencia a condiciones adversas.
Cementación	Con su uso se quiere aumentar la eficiencia de la cementación alterando las propiedades de la lechada según las necesidades de la operación.
Completamiento	Es usado como tratamiento anticorrosivo en tuberías e instalaciones superficiales o subterráneas.
Facilidades	Aumentar la eficiencia en procesos petroquímicos y de tratamiento o refinación.
Producción	Ayuda con las estrategias de producción por medio de seguimientos a la producción (trazadores) para garantizar la operación y promoverla en recuperación secundaria y terciaria.
Yacimientos	Por medio de nanofluidos inyectados usados como métodos de recuperación avanzada de hidrocarburos se busca además del aumento de la producción el acondicionamiento del reservorio para obtener el mayor factor de recobro preservando la formación.

Nota. Esta tabla muestra los diferentes usos y operaciones en la industria de los hidrocarburos.

2.4.1 Riesgos de uso

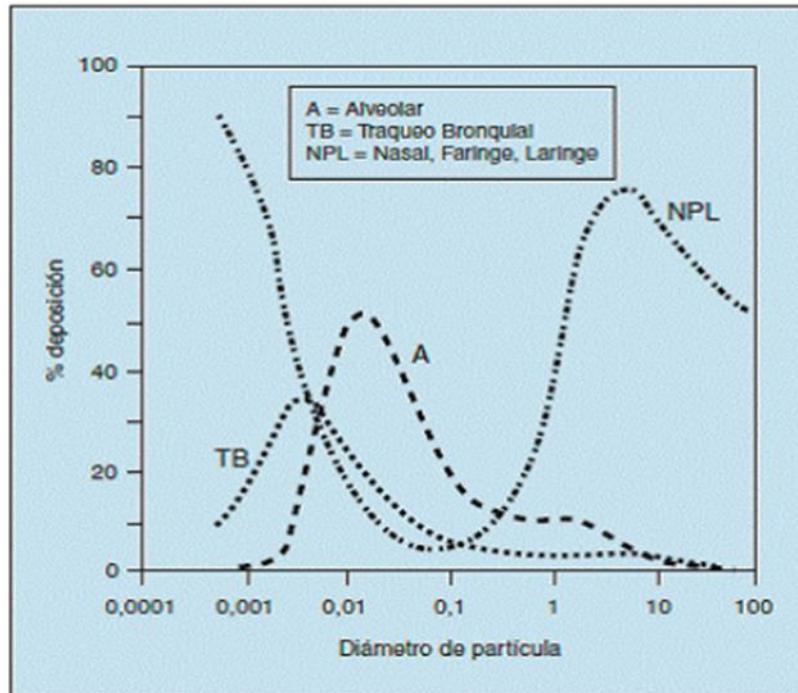
Los riesgos de manipulación e implementación de nanopartículas son a la salud y seguridad debido a que el uso de estas implica contacto directo e indirecto.

En consecuencia, a las propiedades de los materiales reducidos a escala nanométrica se hacen poco solubles al agua y generan consecuencias generalmente de tipo respiratorio dependiendo de sus características como lo pueden ser el área de la superficie, composición química, dimensiones y propiedades toxicológicas [14], [15].

Las nanopartículas pueden afectar el sistema respiratorio desde el ingreso en la boca o nariz hasta el final en las cavidades torácicas (región alveolar, los alveolos y los bronquios), todo esto dependiendo de la capacidad de difusión y depositación en relación con el tamaño, composición y forma. Por ejemplo, las nanopartículas de >10 nm se depositan generalmente en la región alveolar y las de <10 nm se depositan en regiones extratorácicas y región traqueobronquial [15].

Figura 5

Gráfica deposición de nanopartículas en el cuerpo según tamaño, composición y forma



Nota. La gráfica representa el porcentaje de nanopartículas que se depositan en la región alveolar, traqueo bronquial y el sistema respiratorio de acuerdo al diámetro de la partícula. Tomado de: R. Staff, "Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad," Rev. Enfermería del Trab., vol. 5, no. 1, pp. 21–27, 2015.

También se ha llegado a realizar distintas pruebas para evaluar el impacto que podría llegar a producirse por medio de vías dérmicas y digestivas, en donde no se ha visto efectos que generen daños específicos e impactos negativos a la salud, sin embargo puede darse de forma muy común la adsorción o penetración de las nanopartículas en la piel con mayor exposición en el caso de materiales afines a la dilución en algún fluido, esto podría tener consecuencias si hay altos tiempos de exposición a materiales con composiciones químicas tóxicas [14].

2.4.2 Clasificación de nanopartículas

En el área de la nanotecnología su clasificación depende de varios aspectos que se basan en las propiedades de la partícula que será evaluada, dichas propiedades pueden ser de origen, físicas o químicas. De esto dependerá el área objetivo de aplicación y las posibles funciones o atributos que se le puedan agregar junto con su mecanismo de activación y condiciones de medio para la eficiencia y su uso correcto.

- **Según la forma de obtención:**

→ Descendente: Es el más común y consiste en que las partículas junto con su estructura se reducen a escala nanométrica de 1 a 100 nanómetros.

→ Ascendente: Se inicia con una molécula pequeña y mediante un proceso de auto ensamblado se da origen a un material de mayor dimensión a la inicial.

- **Según su naturaleza:**

→ Nanotecnología seca: Es usada para dar origen a estructuras de carbón, silicio, materiales orgánicos, metales y semiconductores que no funcionan con la humedad.

→ Nanotecnología húmeda: Se basan en sistemas biológicos de entorno acuoso, en donde se usa material genético, membranas, enzimas y componentes celulares.

- **Según sus dimensiones [14]:**

Tres dimensiones a escala nanométrica (estructuras atómicas):

Tabla 3

Escala tres dimensiones

CLASIFICACIÓN	TAMAÑO (nm)
<i>Puntos cuánticos</i>	10,0 - 50,0
<i>Nanocristales</i>	> 1,5 - 10
<i>Fullerenos</i>	0,88 - 1,10

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de nanopartículas de acuerdo con la estructura atómica.

→ Dos dimensiones a escala nanométrica (conductores y semiconductores):

Tabla 4

Escala dos dimensiones

CLASIFICACIÓN	TAMAÑO (nm)
<i>Nanotubos</i>	1,0 - 10; L/D > 1000
<i>Nanohilos</i>	> 1 - 100

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de nanopartículas de acuerdo con los conductores y semi conductores.

→ Una dimensión a escala nanométrica (recubrimientos):

Tabla 5

Escala una dimensión

CLASIFICACIÓN	TAMAÑO (nm)
<i>Gafeno</i>	Espesor de lámina de 0,1
<i>Nanoespumas de carbono</i>	Espesor de lámina de 10

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de nanopartículas de acuerdo con sus recubrimientos.

- **Según sus componentes:**

Las nanopartículas pueden estar constituidas de distintos compuestos químicos los cuales ayudan a seccionarlas en tres grupos diferentes. De esta manera se clasifican los nanomateriales para la recuperación avanzada de hidrocarburos dando origen a un abanico de posibilidades nuevas de implementación para dichas operaciones.

A continuación, se evidencian las nanopartículas con potencial de utilización y compatibilidad en ingeniería de yacimientos:

Tabla 6

Nanopartículas con potencial de utilización y compatibilidad en ingeniería de yacimientos

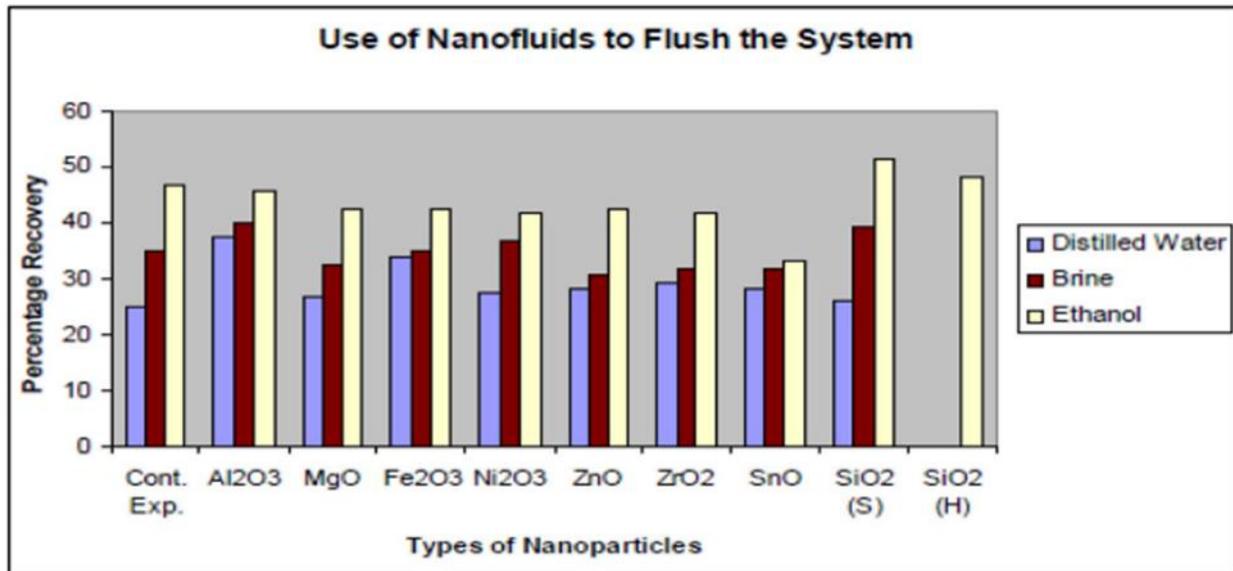
NANOPARTICULAS DE OXIDOS METALICOS	NANOPARTICULAS INORGANICAS	NANOPARTICULAS ORGANICAS
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	SiO ₂	Carbón
Oxido de cobre (CuO)	SiO ₂ hidrofóbica	Nanotubos de carbón
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄)	Sílice recubierta de alúmina	
Oxido de níquel (Ni ₂ O ₃)	Poli silicio	
Oxido de magnesio (MgO)	Poli silicio hidrofóbicas y lipofílicas	
Óxido de zinc (ZnO)		

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de nanopartículas con potencial de utilización y compatibilidad en Ingeniería de yacimientos clasificándose en nanopartículas de óxidos metálicos, inorgánicas y orgánicas.

En este proyecto de investigación se tendrá un enfoque a las nanopartículas inorgánicas, más exactamente en las nanopartículas de sílice. Las nanopartículas de sílice son de las más usadas y de mayor eficiencia para efectos de la recuperación mejorada de hidrocarburos, debido a que tiene dentro de sus efectos en el yacimiento la reducción de la tensión interfacial (actuando de forma similar a un surfactante) o cambiar la mojabilidad del reservorio, de esta manera aumentando el potencial productivo y acondicionando el yacimiento para postergar su vida útil. Adicionalmente al ser provenientes de material inorgánico están diseñadas para no producir efectos secundarios por reacciones con la formación y son menos propensas a degradarse a causa de las altas temperaturas y presiones presentes en el yacimiento, todo esto se traduce a un nanofluido inyectado con gran rango de aplicación y bajos riesgos de error o respuesta negativa de la formación objetivo.

Figura 6

Uso de nanofluidos para enjuagar el sistema



Nota. La gráfica representa la relación entre los tipos de nanopartículas y el porcentaje de recuperación representa la inyección de nanofluidos para el efecto de barrido de petróleo en el yacimiento. Tomado de: M. Elkady, "Application of Nanotechnology in EOR, Polymer-Nano Flooding the Nearest Future of Chemical EOR," pp. 1–20, 2016, doi: 10.2118/184746-stu.

2.5 Propiedades importantes del yacimiento para la programación del software

- **Temperatura:** La temperatura afecta la viscosidad del petróleo, es decir, su capacidad para fluir. A temperaturas más altas, la viscosidad del petróleo disminuye, lo que facilita su movimiento a través de los poros y fracturas de la roca del yacimiento. Esto es beneficioso para la inyección de nanopartículas, debido a que permite una distribución más uniforme de las partículas en el yacimiento.
- **Gradiente de temperatura:** en zonas con altas temperaturas, las nanopartículas pueden moverse más rápidamente y distribuirse de manera más uniforme, mientras que, en zonas con bajas temperaturas, su movilidad puede ser limitada.

A temperaturas más altas, las nanopartículas pueden tener una mayor afinidad por ciertos componentes del petróleo, lo que puede mejorar su capacidad para interactuar y mejorar la extracción de petróleo. Por otro lado, a temperaturas más bajas, estas interacciones pueden ser menos efectivas. El gradiente de temperatura también puede influir en la viscosidad del petróleo en diferentes zonas del yacimiento. A

medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del petróleo generalmente disminuye.

- **Presión:** La presión en el yacimiento puede influir en la distribución de las nanopartículas inyectadas en cierta medida. Sin embargo, en comparación con otros factores, como la permeabilidad de la formación o las interacciones químicas, la presión puede tener un efecto secundario en la distribución de las nanopartículas. Si bien la presión puede afectar el comportamiento de la formación, en muchos casos, los efectos deseados se logran principalmente a través de las interacciones químicas y físicas entre las nanopartículas y los componentes del yacimiento y del petróleo.
- **API:** El grado API del petróleo está relacionado con su viscosidad. Cuanto mayor sea el grado API, más liviano será el petróleo y menor será su viscosidad. La viscosidad del petróleo afecta la movilidad de las nanopartículas inyectadas. En general, los petróleos más ligeros y de menor viscosidad facilitan el transporte y la dispersión de las nanopartículas a través de la formación, lo que puede mejorar la eficiencia de la inyección y la distribución de las partículas en el yacimiento.

Las nanopartículas se inyectan con el objetivo de mejorar la extracción de petróleo, y este efecto puede variar según el grado API del petróleo. En general, los petróleos más pesados y de menor grado API tienen una mayor proporción de componentes difíciles de recuperar, como asfaltenos y compuestos de alto peso molecular. Las nanopartículas pueden interactuar con estos componentes y mejorar su movilidad, facilitando su extracción.

- **Gravedad específica:** la gravedad específica tiene un impacto relativamente bajo porque no afecta directamente la movilidad de las nanopartículas inyectadas en el yacimiento. La movilidad de las nanopartículas está influenciada principalmente por otros factores, como la permeabilidad de la formación y las interacciones químicas entre las partículas y el petróleo.
- **Viscosidad del petróleo:** La viscosidad del petróleo afecta directamente la movilidad de las nanopartículas inyectadas en el yacimiento. Un petróleo de alta viscosidad dificulta el movimiento de las nanopartículas, lo que puede limitar su dispersión y distribución en la formación. Por otro lado, un petróleo de baja viscosidad permite que

las nanopartículas se muevan más fácilmente a través de la formación y alcancen las zonas objetivo.

- **Salinidad:** La salinidad del agua presente en los campos de petróleo puede tener un impacto moderado en los procesos de inyección de nanopartículas porque afecta las interacciones químicas entre las nanopartículas y el petróleo, así como con la formación rocosa. En un entorno de alta salinidad, los iones presentes en el agua pueden influir en la estabilidad y dispersión de las nanopartículas, lo que puede afectar su movilidad y su capacidad para mejorar la extracción de petróleo. Además, la salinidad puede influir en la adsorción y desorción de las nanopartículas en las superficies de la formación rocosa.
- **Permeabilidad:** influye directamente en la distribución de las nanopartículas inyectadas en el yacimiento. Una mayor permeabilidad facilita el flujo de las partículas y permite que se distribuyan de manera más uniforme en el yacimiento, lo que mejora su eficacia en la mejora de la extracción de petróleo. Por otro lado, una baja permeabilidad puede dificultar el movimiento de las nanopartículas y limitar su alcance en el yacimiento.
- **Saturación de agua:** Las nanopartículas pueden tener una mayor afinidad por ciertos componentes del agua, lo que puede influir en su distribución y movilidad en el yacimiento. La saturación de agua puede alterar estas interacciones y, por lo tanto, tener un impacto en la eficacia de las nanopartículas en la mejora de la extracción de petróleo.

Una alta saturación de agua puede facilitar la dispersión y la distribución de las nanopartículas en el yacimiento, mientras que una baja saturación de agua puede limitar su alcance y efectividad.

- **Permeabilidad relativa:** Las nanopartículas son extremadamente pequeñas, con tamaños en la escala de nanómetros. Debido a su tamaño, pueden llenar los poros más pequeños del medio poroso sin obstruir significativamente el flujo de petróleo. Esto permite que el petróleo fluya a través del medio poroso de manera efectiva incluso con la presencia de nanopartículas, lo que minimiza el impacto en la permeabilidad relativa.

- **Porosidad:** tiene un bajo impacto debido a la capacidad única de las nanopartículas de sílice para ocupar y desplazarse dentro de los poros sin obstruir significativamente el flujo de petróleo. La concentración de nanopartículas de sílice inyectadas suele ser relativamente baja en comparación con el volumen total del yacimiento de petróleo. Esto significa que incluso si las nanopartículas ocupan parte de los poros, su efecto en la porosidad total del yacimiento sigue siendo limitado.
- **Mojabilidad:** La mojabilidad está relacionada con la afinidad entre el petróleo, el agua y la roca del yacimiento. La mojabilidad es crucial porque afecta la distribución y el movimiento de las nanopartículas de sílice en el yacimiento de petróleo. Un alto impacto se observaría en yacimientos altamente mojados por agua, donde las nanopartículas pueden tener dificultades para desplazarse y llegar a las zonas donde se requiere su acción para mejorar la recuperación de petróleo. Por otro lado, en yacimientos mojados por petróleo o con mojabilidad mixta, la inyección de nanopartículas de sílice podría tener un impacto más significativo en la producción de petróleo al mejorar la eficiencia de desplazamiento y aumentar la recuperación de hidrocarburos.
- **Movilidad:** Una movilidad adecuada permite que las nanopartículas de sílice se dispersen de manera uniforme en el yacimiento, alcanzando todas las áreas que requieren tratamiento para mejorar la recuperación de petróleo. Una distribución homogénea asegura que las nanopartículas alcancen las zonas con menor saturación de petróleo y aumenten la eficiencia de desplazamiento.
- **Profundidad:** La eficacia de la inyección de nanopartículas de sílice en un campo de petróleo depende de varios factores, y la profundidad del yacimiento no es uno de los principales determinantes. Sin embargo, la profundidad podría afectar ciertos aspectos logísticos y técnicos, lo que podría tener un impacto indirecto.
- **BSW (producción de sólidos):** La producción de sólidos en campos de petróleo con inyección de nanopartículas puede tener un alto impacto debido que las nanopartículas inyectadas en el yacimiento pueden acumularse y taponar los poros de la formación petrolera. Si la producción de sólidos es significativa, puede obstaculizar el flujo de petróleo y agua a través de la roca, lo que disminuiría la producción de petróleo y afectaría negativamente la eficiencia de recuperación.

- **pH:** el pH puede tener un impacto mínimo o despreciable en la efectividad de la inyección de nanopartículas de sílice porque suelen estar diseñadas para ser químicamente compatibles tanto con el petróleo como con el agua presente en el yacimiento. Esto significa que las nanopartículas no reaccionarán significativamente con las soluciones acuosas del yacimiento o con el petróleo debido al pH.
- **Tensión interfacial:** La tensión interfacial juega un papel importante en la mojabilidad del yacimiento, es decir, la afinidad de la roca hacia el petróleo o el agua. Si la tensión interfacial es alta, puede hacer que la roca sea más "mojada" por uno de los fluidos, lo que dificulta el desplazamiento del otro fluido. Por otro lado, si la tensión interfacial es baja, la roca es más propensa a ser "no mojada" o neutramente mojada, lo que facilita el desplazamiento y la distribución uniforme de los fluidos en el yacimiento. La reducción de la tensión interfacial entre el petróleo y el agua debido a la presencia de nanopartículas de sílice puede mejorar el desplazamiento del petróleo, permitiendo que las partículas fluyan más fácilmente en las interfaces petróleo-agua y petróleo-roca. Esto facilita el movimiento del petróleo hacia los pozos de producción y mejora la eficiencia de recuperación.
- **Tensión superficial:** la tensión superficial no es un factor determinante debido a que el comportamiento de las nanopartículas de sílice en un yacimiento de petróleo está influenciado principalmente por otros factores, como la movilidad, la mojabilidad, la distribución y la interacción con el petróleo y la roca. Estas partículas sólidas se mueven a través de los poros y espacios del yacimiento según las fuerzas que actúan sobre ellas, incluyendo gradientes de presión, permeabilidad de la roca y otras características geológicas.
- **Diámetro de garganta de poro:** Las nanopartículas que se inyectan en un yacimiento de petróleo son partículas sólidas y, por lo tanto, su tamaño no está directamente relacionado con el diámetro de la garganta de poro. Estas partículas sólidas se mueven a través de los poros y espacios del yacimiento según las fuerzas que actúan sobre ellas, como gradientes de presión y características geológicas. El diámetro de la garganta de poro es relevante en relación con el flujo de los fluidos en el yacimiento, como el petróleo y el agua, pero no afecta el comportamiento de las nanopartículas.

- **Tipo de roca:** El tipo de roca influye en el comportamiento de las nanopartículas y dependiendo las propiedades petrofísicas de la roca, que pueden afectar la movilidad, la retención y la distribución de las nanopartículas.

La porosidad y permeabilidad de la roca influyen en la capacidad de las nanopartículas para moverse a través del yacimiento. En rocas con alta porosidad y permeabilidad, las nanopartículas pueden desplazarse más fácilmente y alcanzar una distribución más extensa. Por otro lado, en rocas con baja porosidad y permeabilidad, las nanopartículas pueden tener dificultades para moverse y podrían quedar atrapadas en ciertas zonas.

- **Mecanismo de recobro primario:** la inyección de nanopartículas en yacimientos de petróleo tiene como objetivo mejorar la eficiencia de recuperación, tanto durante el recobro primario como en etapas posteriores de recuperación secundaria o mejorada. La combinación de un mecanismo de recobro primario más eficiente con la inyección de nanopartículas puede resultar en una mayor producción total de petróleo y una mejora significativa en la recuperación de hidrocarburos del yacimiento.

- **Mecanismo de recobro secundario:** El mecanismo de recobro secundario es importante en la inyección de nanopartículas en yacimientos de petróleo porque complementa y mejora el recobro primario, permitiendo una mayor extracción de petróleo que no se puede recuperar con métodos convencionales.

Durante el recobro secundario, se inyectan fluidos adicionales, como agua o gas, para desplazar el petróleo remanente en el yacimiento. Al agregar nanopartículas, se mejora la eficiencia de barrido, lo que significa que el fluido inyectado tiene una mejor capacidad para desplazar y movilizar el petróleo hacia los pozos de producción. Las nanopartículas pueden mejorar la movilidad del fluido inyectado y reducir la tensión interfacial, lo que facilita el desplazamiento del petróleo.

- **Fuerza capilar:** su importancia puede ser limitada en comparación con otros factores como el tamaño y movilidad de las nanopartículas, su interacción con la roca y la concentración y distribución adecuada en el yacimiento. Las nanopartículas se inyectan de manera que sus propiedades y diseño minimicen la influencia de las fuerzas capilares, enfocándose más en lograr una distribución efectiva y mejorar la recuperación de petróleo.

- **Adsorción:** La adsorción se refiere a la adhesión o fijación de moléculas o partículas en una superficie. Una mayor retención garantiza que las nanopartículas puedan permanecer activas en el yacimiento durante un período de tiempo más largo, lo que aumenta su potencial para mejorar la producción de petróleo.
Cuando las nanopartículas se adhieren a las superficies de las rocas, se distribuyen más ampliamente en el yacimiento, alcanzando áreas que de otro modo podrían haber quedado poco tratadas.
- **Factor de resistencia residual:** En la inyección de nanopartículas en yacimientos de petróleo, este factor puede tener un impacto relativamente bajo debido a que las nanopartículas son sólidas y, en general, son significativamente más grandes que las moléculas de agua que componen los capilares de la roca.
Las nanopartículas se desplazan principalmente a través de los poros y espacios del yacimiento debido a fuerzas de presión y gradientes de velocidad, en lugar de las fuerzas capilares que afectan al flujo de fluidos en los poros más pequeños.
- **Contenido de arcillas:** Las nanopartículas están diseñadas para tener una alta capacidad de retención en las interfaces petróleo-roca y petróleo-agua, lo que les permite retener el petróleo y mejorar su recuperación. Aunque las arcillas pueden tener cierta capacidad de adsorción, las nanopartículas están diseñadas para superar estas interacciones y retener el petróleo de manera más efectiva, por tal motivo se concluye que tiene un bajo impacto en la inyección de nanopartículas en yacimientos.
- **Composición del crudo:** La composición del crudo puede afectar la tensión interfacial y, por lo tanto, la capacidad de las nanopartículas para reducir dicha tensión. Las nanopartículas inyectadas están diseñadas para ser compatibles con el petróleo y tener afinidad por el mismo. La composición del crudo puede afectar la capacidad de las nanopartículas para interactuar con el petróleo de manera efectiva, lo que podría influir en su capacidad para mejorar el desplazamiento y la recuperación.

3. METODOLOGÍA Y DATOS

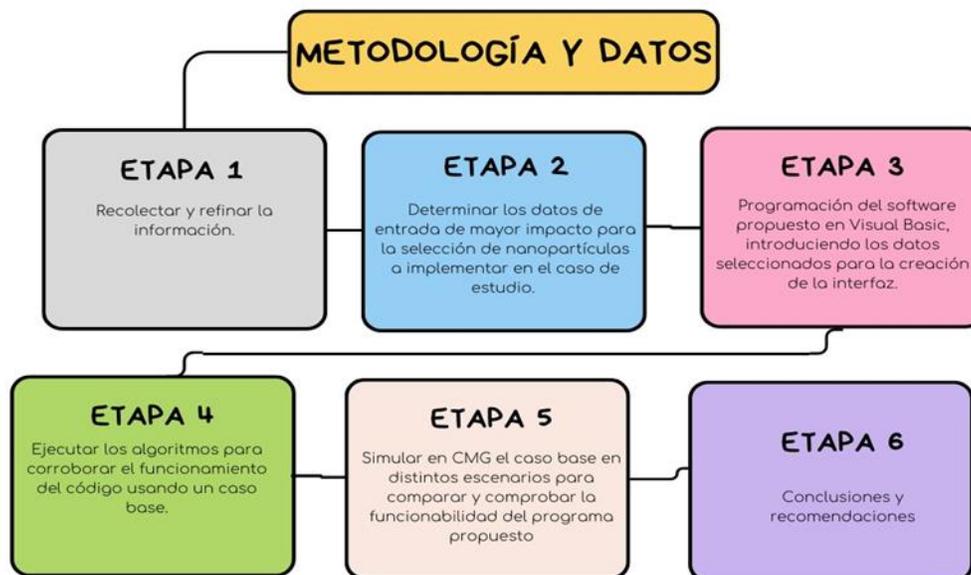
El presente proyecto se ha estructurado con el propósito de alcanzar de manera efectiva los objetivos propuestos para su desarrollo. Para lograrlo, se ha diseñado un plan que contempla seis etapas bien definidas, las cuales se desarrollarán progresivamente, paso a paso, con el objetivo de abordar y cumplir cada uno de los objetivos establecidos. Cada etapa ha sido concebida para construir sobre los logros previos y llevar a cabo una investigación exhaustiva y completa. Con este enfoque secuencial, se busca asegurar que cada aspecto del proyecto se aborde adecuadamente, permitiendo así alcanzar resultados sólidos y culminar exitosamente con la investigación propuesta.

Llegado este punto la investigación se puede dividir en 6 etapas, las cuales corresponden a cada uno de los objetivos específicos que ayudarán a cumplir a cabalidad el objetivo general del proyecto. Aunado a lo anterior, las etapas del presente trabajo serán las siguientes:

- Recolectar y refinar la información.
- Determinar los datos de entrada de mayor impacto para la selección de nanopartículas.
- Programación del software propuesto en Visual Basic.
- Ejecutar los algoritmos para corroborar el funcionamiento del código usando un caso base.
- Simular en CMG el caso base en distintos escenarios para comparar y comprobar la funcionalidad del programa propuesto.
- Conclusiones y recomendaciones.

Figura 7

Metodología y datos



Nota. La figura representa el esquema de metodología a implementar compuesto por seis etapas.

3.1 Etapa 1. Recolectar y refinar la información

Para el desarrollo del proyecto inicialmente se va a realizar la recolección de información, junto con la refinación de la misma, de esta manera obteniendo las premisas necesarias para justificar la relevancia del proyecto, además de adquirir los datos de mayor importancia y fundamentales para dar cumplimiento a los objetivos planteados en la investigación. Sin embargo, de ser necesario en alguna de las etapas posteriores puede recopilarse información puntual para complementar el desarrollo de la metodología.

3.2 Etapa 2. Determinar los datos de entrada de mayor impacto para la selección de nanopartículas

En esta etapa de la investigación se busca determinar las variables que son de mayor importancia para la selección de nanopartículas con el objetivo de obtener los datos de entrada que serán posteriormente un requisito de ingreso para el funcionamiento de la herramienta digital.

Por medio de la recopilación de documentos previamente obtenidos en la recuperación de información referente al tema de recobro mejorado con nanopartículas de sílice se determina la importancia e influencia que tiene cada propiedad de la roca, el fluido e interacción roca-fluido con las cuales en labores de ingeniería se determina el uso de nanopartículas, en donde para este proyecto en específico serán tomados aquellos parámetros que sean influyentes para la selección de nanopartículas de sílice aplicadas en procesos de EOR.

Del siguiente listado de variables o características del reservorio serán determinados los parámetros clasificándolos según el impacto que tendría en la selección usando una matriz por colores, con el objetivo de saber los datos de entrada que serán programados para la interfaz del software:

Tabla 7

Variables del reservorio

#	NOMBRE	#	NOMBRE	#	NOMBRE
1	Temperatura	10	Permeabilidades relativas	19	Diámetro de garganta de poro
2	Gradiente de temperatura	11	Porosidad	20	Tipo de roca
3	Presión	12	Mojabilidad	21	Mecanismo de recobro primario
4	API	13	Movilidad	22	Mecanismo de recobro secundario
5	Gravedad específica	14	Profundidad	23	Fuerza capilar
6	Viscosidad del petróleo	15	% BSW	24	Adsorción
7	Salinidad	16	PH	25	Factor de resistencia residual
8	Permeabilidad	17	Tensión interfacial	26	Vsh/Vcl/contenido de arcillas
9	Saturación de agua	18	Tensión superficial	27	Composición del crudo

Nota. Esta tabla muestra el listado de variables o características del reservorio para determinar los parámetros de acuerdo con su impacto.

Una vez determinadas las propiedades a tener en cuenta, se introducen dentro de la interfaz que define el entorno de desarrollo y los elementos que se pueden incorporar como las cajas de imágenes, las etiquetas, cajas de texto, marcos, botones de comando, casillas de verificación, listas desplegadas, barras de desplazamiento verticales y horizontales, temporizadores y conexiones a origen de datos, entre otros.

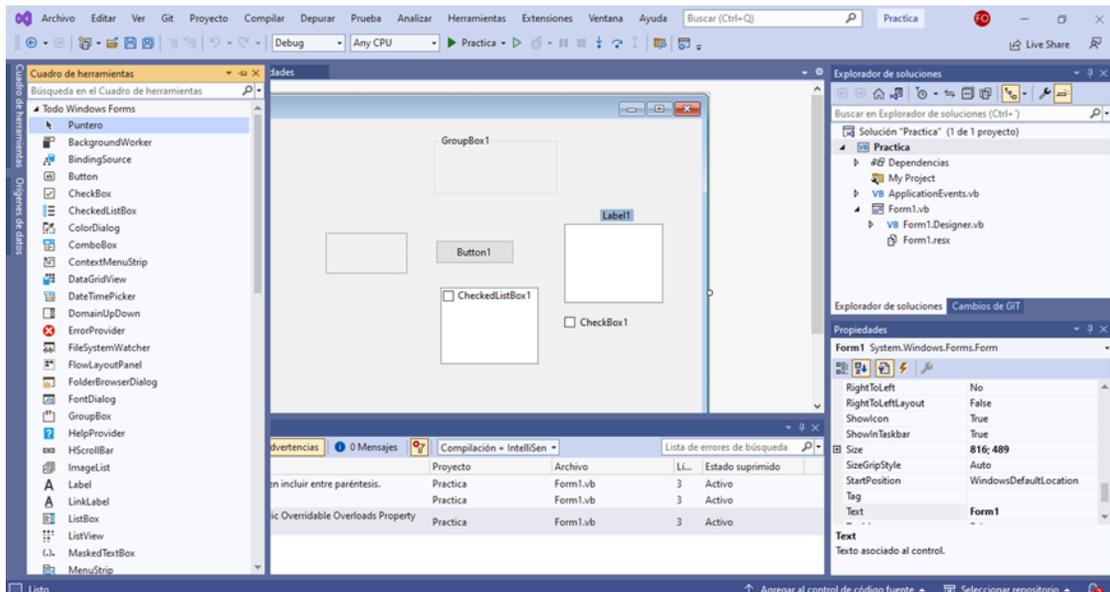
3.3 Etapa 3. Programación del software propuesto en Visual Basic

La etapa de programación corresponde al inicio de la escritura de los códigos de programación utilizando Visual Basic junto con su lenguaje de programación por defecto.

Para cumplir con el desarrollo de esta etapa es necesario tener en cuenta los resultados de la etapa anterior, debido a que se debe realizar el documento de escritura del código basados en los datos de entrada para finalmente tomando los datos ingresados llegar a obtener los resultados de la selección. Adicionalmente el proceso de programación en Visual Basic para la creación de un programa incluye la creación de una interfaz con la cual al finalizar el aplicativo el usuario tendrá interacción y debe ir vinculado a las líneas programadas, de esta manera obteniendo una herramienta digital útil para usos de ingeniería en procesos de recobro mejorado con nanofluidos de sílice.

Figura 8

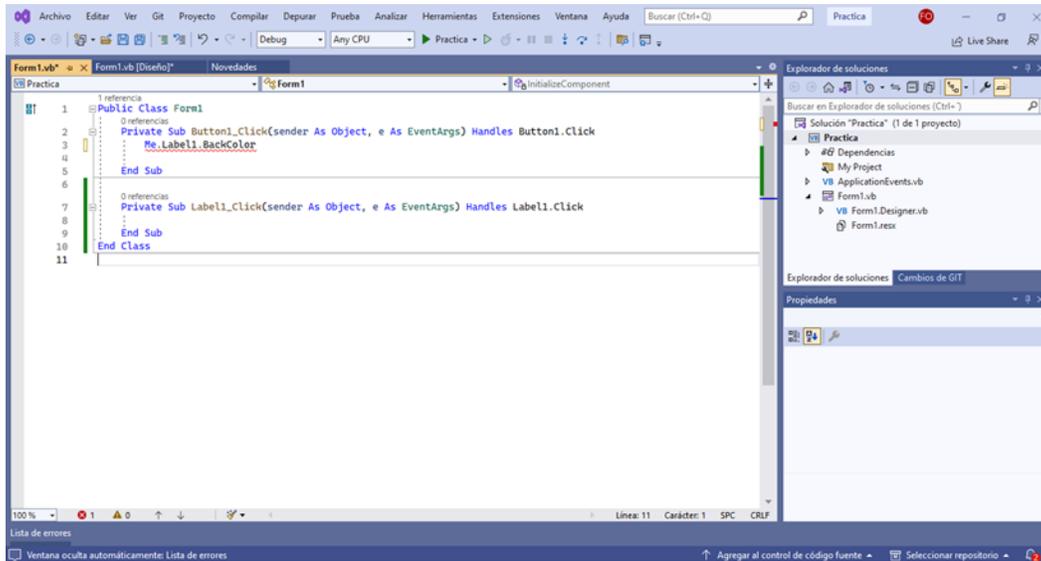
Vista de las herramientas del software propuesto en Visual Basic



Nota. La figura representa las herramientas del software Visual Basic.

Figura 9

Vista de New text file del software propuesto en Visual Basic



Nota. La figura representa un ejemplo de un New Text File del software propuesto Visual Basic.

3.4 Etapa 4. Ejecutar los algoritmos para corroborar el funcionamiento del código usando un caso base

Se elige un caso de estudio el cual será ingresado al software programado con los datos de entrada solicitados, posteriormente se reproducen las líneas de programación y finalmente se obtienen los resultados para dichas condiciones. En esta etapa se obtendrá la selección de la nanopartícula de sílice que tendrá mayor conveniencia en la aplicación para la inyección según las necesidades del reservorio y las propiedades de este, con el objetivo de lograr aumentar el factor de recobro y por ende la producción de hidrocarburos. El software deberá elegir entre los 4 materiales diferentes obtenidos de la sílice y con aplicaciones en recuperación de hidrocarburos.

Esta herramienta integra datos de campo, propiedades de las nanopartículas y modelos de simulación para ofrecer recomendaciones precisas y optimizar el proceso de selección.

3.5 Etapa 5. Simular en CMG el caso base en distintos escenarios para comparar y comprobar la funcionabilidad del programa propuesto

Esta será la fase final de la investigación, en donde se comprueba el funcionamiento de la aplicación planteada. La forma en la que se realiza dicha comprobación es con la comparación de 4 escenarios de simulación en CMG.

El caso de estudio que fue elegido en la etapa anterior es materializado de forma digital en CMG generando de esta manera un modelo dinámico de simulación, en el que se ingresa la información de la inyección de nanopartículas obteniendo las proyecciones de producción y factor de recobro con el estado inicial y luego con las 4 nanopartículas de sílice incluidas en el estudio.

Los resultados obtenidos de la simulación de cada escenario serán comparados entre sí para determinar cuál es el material de inyección más eficiente, una vez obtenido este resultado se comprueba la selección de la herramienta digital propuesta, de esta manera corroborando su funcionalidad.

3.6 Etapa 6. Conclusiones y recomendaciones

En esta etapa se resumen los hallazgos clave del proyecto y ofrecen orientación sobre las etapas posteriores, para aprovechar al máximo el conocimiento obtenido a base de esta investigación y el conocimiento que se puede profundizar en investigaciones futuras.

En adición, se evalúa la efectividad de las nanopartículas de sílice para ver si son una opción prometedora para aumentar el factor de recobro de la recuperación avanzada de hidrocarburos. Los resultados demostrarán la capacidad de estas para mejorar la eficiencia de extracción de petróleo.

Además, se valida la realización y funcionamiento de la herramienta digital de selección de nanopartículas de sílice más adecuadas para un yacimiento específico y los resultados experimentales obtenidos en el proyecto respaldarán la efectividad de la herramienta digital.

Finalmente, se realizan sugerencias para llevar a cabo investigaciones adicionales para ampliar el conocimiento sobre las propiedades de las nanopartículas de sílice y su

comportamiento en diferentes tipos de yacimientos. Esto ayudará a mejorar la precisión de la herramienta digital y a optimizar aún más el proceso de selección.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Proceso de recopilación de características necesarias para determinar las variables de selección de nanopartículas

En este apartado, se busca establecer una relación entre las etapas 1 y 2 con el propósito de abordar y resolver el objetivo 1 planteado. En la etapa 1, se lleva a cabo un proceso de recopilación de las características y propiedades esenciales relevantes al estudio, con el fin de facilitar la selección de nanopartículas. Estas variables son registradas y organizadas en una tabla, y se emplea una matriz de colores para discernir cuáles de las 27 variables previamente identificadas ejercen una mayor influencia en el contexto de la investigación en curso.

Las propiedades que serán utilizadas hacen referencia a las propiedades de los fluidos, de la roca e interacción roca-fluido que son importantes para comprender el funcionamiento del reservorio y contextualizar su dinámica junto con los posibles diagnósticos en cuanto a su reducción en la tasa de producción o su baja eficiencia productiva de acuerdo con sus características.

Tabla 8

Variables para caracterizar el yacimiento

#	NOMBRE	#	NOMBRE	#	NOMBRE
1	Temperatura	10	Permeabilidades relativas	19	Diámetro de garganta de poro
2	Gradiente de temperatura	11	Porosidad	20	Tipo de roca
3	Presión	12	Mojabilidad	21	Mecanismo de recobro primario
4	API	13	Movilidad	22	Mecanismo de recobro secundario
5	Gravedad específica	14	Profundidad	23	Fuerza capilar
6	Viscosidad del petróleo	15	% BSW	24	Adsorción
7	Salinidad	16	PH	25	Factor de resistencia residual
8	Permeabilidad	17	Tensión interfacial	26	Vsh/Vcl/contenido de arcillas
9	Saturación de agua	18	Tensión superficial	27	Composición del crudo

Nota. Esta tabla muestra las variables con las que se puede caracterizar el yacimiento.

Para la determinación de las variables que serán utilizadas se implementó una matriz de colores en la que se relaciona lo que implica cada color y el nivel de impacto que tiene para la selección de nanopartículas de sílice en operaciones de recobro mejorado, la cual será aplicada a las propiedades que se encuentran en la tabla 9, para obtener las

variables de mayor influencia en la inyección de nanopartículas y que serán de interés para el desarrollo del proyecto.

Tabla 9

Clasificación de la Matriz de impacto por colores

MATRIZ DE IMPACTO DE LAS VARIABLES PARA LA SELECCIÓN DE NANOPARTICULAS	
Sin impacto	<i>Variables que no son determinantes para la selección</i>
Bajo impacto	<i>Variables que pueden ser usadas o no en la selección y pueden estar incluidas en otra variable de mayor impacto</i>
Impacto moderado	<i>Variables con influencia moderada en la selección</i>
Alto impacto	<i>Variables de alta importancia en la selección</i>

Nota. Esta tabla muestra la matriz de colores establecida para realizar la clasificación de impacto de las variables para la selección de nanopartículas (Sin Impacto color verde, bajo impacto color amarillo, Impacto moderado color naranja, alto impacto color rojo).

Una vez es implementada la matriz de colores consignada en la tabla 9 teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos y demás criterios de ingeniería se evalúa cada variable o propiedad obteniendo como resultado la tabla 10.

Tabla 10

Matriz de Impacto de las variables para la selección de nanopartículas

#	NOMBRE	#	NOMBRE	#	NOMBRE
1	Temperatura	10	Permeabilidades relativas	19	Diámetro de garganta de poro
2	Gradiente de temperatura	11	Porosidad	20	Tipo de roca
3	Presión	12	Mojabilidad	21	Mecanismo de recobro primario
4	API	13	Movilidad	22	Mecanismo de recobro secundario
5	Gravedad especifica	14	Profundidad	23	Fuerza capilar
6	Viscosidad del petróleo	15	BSW (producción de solidos)	24	Adsorción
7	Salinidad	16	pH	25	Factor de resistencia residual
8	Permeabilidad	17	Tensión interfacial	26	Vsh/Vcl/contenido de arcillas
9	Saturación de agua	18	Tensión superficial	27	Composición del crudo

Nota. Esta tabla muestra la evaluación de las variables de acuerdo con su impacto para la selección de las nanopartículas.

Para efectos de este proyecto de investigación se van a tomar como variables influyentes y de vital importancia aquellas que estén marcadas en la Tabla 10 de color rojo, las cuales serán incluidas de forma necesaria en la interfaz del programa y en la programación. Las variables que se encuentren señaladas con el color naranja serán incluidas, pero por las características de la sílice no tienen gran influencia por sus rangos de aplicación y la versatilidad de este. Para las variables a las que se les asignó el color amarillo podrán o no ser incluidas, debido a que su comportamiento es predecible y dependiente de otra propiedad de mayor influencia. Las características marcadas con el color verde no serán incluidas en la herramienta digital porque no son determinantes para la selección.

Teniendo en cuenta las premisas expuestas finalmente se determinan las siguientes variables como la información que será implementada para la selección de las nanopartículas de sílice y el desarrollo de la herramienta digital propuesta:

Tabla 11*Variables para implementar en el software*

#	NOMBRE	#	NOMBRE	#	NOMBRE
1	Temperatura	7	Tensión interfacial	13	Salinidad
2	Gradiente de temperatura	8	Tipo de roca	14	Permeabilidad
3	API	9	Mecanismo de recobro primario	15	Gravedad específica
4	Saturación de agua	10	Mecanismo de recobro secundario	16	Permeabilidades relativas
5	Mojabilidad	11	Adsorción	17	Profundidad
6	% BSW	12	Composición del crudo		

Nota. Esta tabla muestra las variables que serán implementadas en el software de acuerdo con su selección en la tabla 10.

Adicionalmente, para el cumplimiento de la etapa 2 que consiste en determinar los datos de entrada de mayor impacto para la selección de nanopartículas; se determinó el rango de aplicación para cada una de las 17 variables seleccionadas anteriormente con la matriz de colores. En este contexto, se cumple también el primer objetivo de este proyecto.

Con lo mencionado anteriormente, se consignan en la Tabla 12, las 17 variables que se tendrán en cuenta para la realización de la herramienta digital.

Tabla 12*Rangos de aplicación de variables a incluir en el software*

No	VARIABLE	RANGO DE APLICACIÓN
1	Temperatura	Hasta 200 °F
2	Gradiente de temperatura	
3	API	API < 31.1
4	Saturación de agua	30 - 50%
5	Mojabilidad	Mojado al aceite Mojado al agua
6	% BSW	Hasta el 25%
7	Tensión interfacial	10e-2 - 10e-4
8	Tipo de roca	Carbonatos o arenas

Tabla 12. (Continuación)

No	VARIABLE	RANGO DE APLICACIÓN
9	Mecanismo de recobro primario	Empuje por agua, drenado gravitacional, empuje por capa de gas, empuje por capa de gas en solución y expansión roca fluido
10	Mecanismo de recobro secundario	Inyección de vapor o inyección de agua caliente
11	Adsorción	máx. 2,54 mol/ft ³
12	Composición del crudo	Saturados 30 - 60% Aromáticos 20 - 50% Resinas 10 - 30% Asfáltenos 5 - 20%
13	Salinidad	30000-90000 ppm
14	Permeabilidad	>60 md
15	Gravedad específica	GE < 1,149
16	Permeabilidades relativas	Mojado al aceite Mojado al agua
17	Profundidad	9800 ft a 13100 ft

Nota. La tabla anterior, presenta los rangos de cada una de las variables escogidas que se incluirán en el siguiente objetivo que es la programación.

Efectivamente, mediante la exposición de datos y análisis previos, se ha alcanzado la consecución del primer objetivo delineado, logrando determinar que son 17 variables las de mayor impacto dentro de las cuales se cuentan con 12 variables de alto impacto, 2 variables de impacto moderado y 3 variables de bajo impacto. En este contexto, se cumple el objetivo el cual consistía en identificar de manera concluyente los parámetros y variables que ejercen influencia en la elección de nanopartículas como estrategia para mejorar el proceso de recobro.

4.2 Programación del software propuesto en Visual Basic

En este contexto, se establece una conexión entre las etapas 3 y 4; y, los objetivos específicos 2 y 3. En esta fase, se procede a la implementación de un proceso de codificación destinado a la ejecución de la herramienta digital llamada “Nanosilselect”. En adición, se detalla el desarrollo de dicha herramienta digital y se presentan las etapas que se llevaron a cabo con el propósito de determinar las nanopartículas de sílice para la aplicación en un caso base.

El objetivo 2 de este proyecto, consiste en realizar la programación en Visual Basic, tomando como referencia las propiedades estudiadas anteriormente, para la selección de las nanopartículas de sílice aptas para el estudio. En esta etapa se inicia la programación para la creación de la herramienta digital llamada Nanosilselect, con la ejecución progresiva del código, cuyo resultado depende de los siguientes pasos:

- **Definir Requisitos y Funcionalidades:**

Inicialmente se debe definir claramente los objetivos de la herramienta, se identifican las funcionalidades clave que debe tener, como por ejemplo la carga de datos, la visualización, la selección y el análisis.

- **Carga de Datos:**

En este punto se desarrollan funciones para cargar datos de nanopartículas desde archivos o bases de datos.

- **Interfaz de Usuario:**

En esta sección se desarrolla una interfaz de usuario (UI) para hacer la herramienta más accesible y fácil de manejar.

- **Pruebas y Depuración:**

Se realizan pruebas exhaustivas para garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta digital, se ejecuta el programa varias veces hasta lograr obtener el resultado correcto de la nanopartícula óptima para el yacimiento de estudio.

Adicionalmente, se deben manejar y corregir los errores que se puedan presentar en el código.

- **Documentación:**

Se documenta la herramienta digital de manera clara para que los usuarios que tengan acceso puedan entender y utilizar la herramienta de forma sencilla, se ponen mensajes para guiar al usuario en el funcionamiento.

- **Optimización y Mejoras:**

Se considera la posibilidad de agregar nuevas características o mejorar las existentes según los comentarios de los usuarios.

De acuerdo con los pasos mencionados anteriormente, se realiza la interfaz y el proceso para crear la herramienta digital llamada “Nanosilselect”, como se muestra a continuación:

Inicialmente se genera la página de bienvenida, tal como se muestra en la Figura 10:

Figura 10

Bienvenida de Nanosilselect



Nota. La figura anterior, corresponde a la página de bienvenida que aparece al abrir la herramienta digital Nanosilselect, donde el usuario podrá presionar el botón “INICIAR” para ejecutar el programa

Figura 11

Pestaña con Check list de datos y unidades.

The screenshot shows a software window titled "check_list_de_datos_y_unidades" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The window contains a checklist of 17 variables, each with an unchecked checkbox. The variables are arranged in two columns:

- Temperatura
- Gradiente de temperatura
- *API
- Saturación de agua
- Mojabilidad
- % BSW
- Tensión interfacial
- Tipo de roca
- Mecanismo de recobro primario
- Mecanismo de recobro secundario
- Adsorción
- Composición del crudo (Análisis SARA)
- Salinidad
- Permeabilidad
- Gravedad específica
- Permeabilidades relativas
- Profundidad

At the bottom right of the window, there is a section labeled "Unidades" containing a button "Seleccionar unidades". Below this, there is a "Reset" button. At the bottom center of the window, there are two large buttons: "Cerrar" on the left and "Aceptar" on the right.

Nota. Esta figura representa la interrelación de las 17 variables seleccionadas en el primer objetivo.

En esta sección, se requiere la identificación de al menos cinco propiedades previamente establecidas del yacimiento, que se elegirán para avanzar en el proceso de selección de la nanopartícula. Estas propiedades desempeñarán un papel crucial en la continuación del proceso de selección y determinarán la idoneidad de la nanopartícula en el contexto del yacimiento en estudio.

Figura 12

Datos de entrada del yacimiento

The image shows a software dialog box titled "Datos del yacimiento". It contains the following fields and controls:

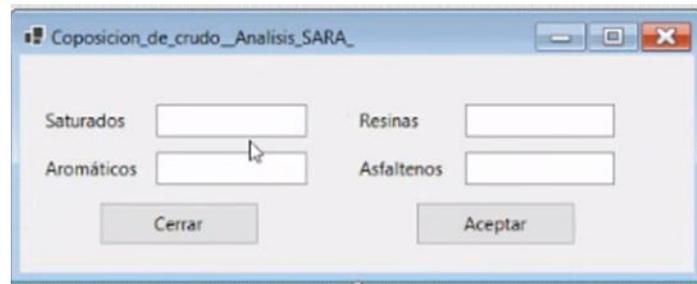
- Temperatura: °F
- Gradiente de temperatura: °F/100ft
- *API: *API
- Saturacion de agua: %
- Mojabilidad: ▾
- BSW: %
- Gravedad especifica:
- Permeabilidades relativas:
- Profundidad: ft
- Tension interfacial: N/m
- Tipo de roca: ▾
- Mecanismo de recobro primario: ▾
- Mecanismo de recobro secundario: ▾
- Adsorcion: lb/lb
- Composicion del crudo (Análisis SARA):
- Salinidad: ppm
- Permeabilidad: md
-

Nota. Esta figura muestra los cuadros de diálogo en los que se deben introducir los valores correspondientes a las variables previamente seleccionadas.

En la Figura 12 se evidencia la interfaz del usuario en la cual se deben ingresar los valores respectivos para cada propiedad seleccionada en el check list (Figura 11) y tener alta confiabilidad en ellos para obtener posteriormente un buen resultado por parte de Nanosilselect.

Figura 13

Composición del crudo mediante análisis SARA

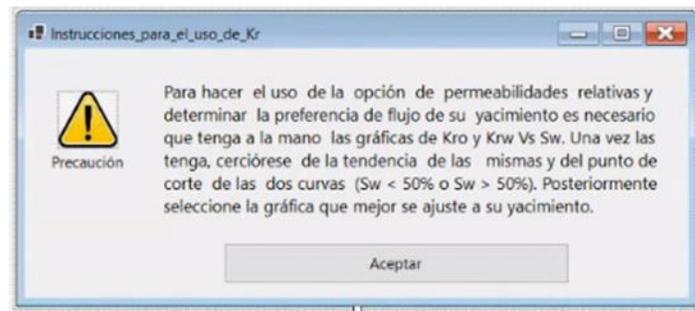


Nota. La figura anterior se refiere a los porcentajes utilizados para caracterizar la composición y las propiedades de los hidrocarburos presentes en el crudo del yacimiento.

Este cuadro de diálogo aparecerá después de seleccionar la opción denominada "Valores" en la Figura 12. La introducción precisa de estos porcentajes es esencial para una adecuada caracterización del crudo y es un paso importante en el proceso de análisis.

Figura 14

Instrucciones opción permeabilidades relativas

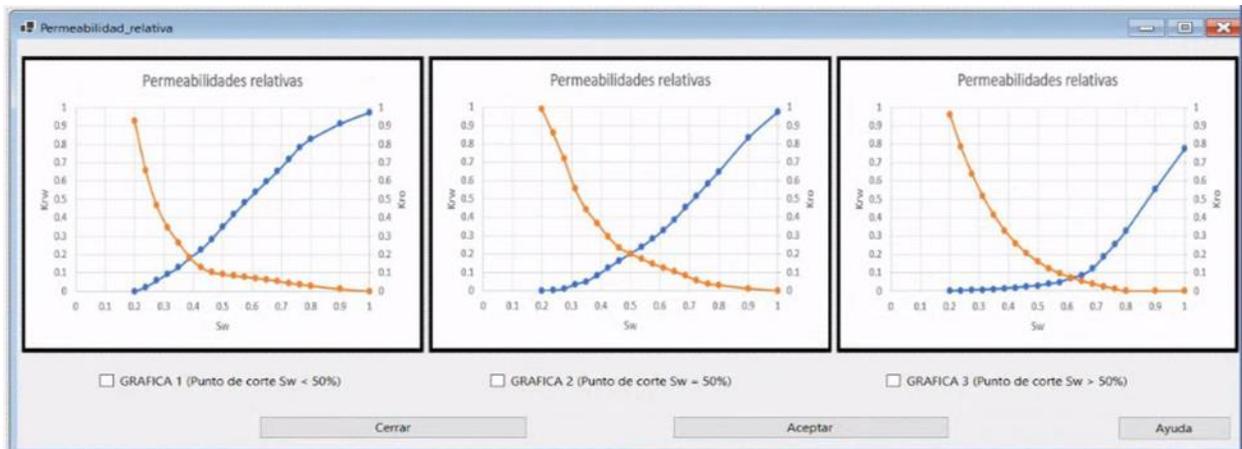


Nota. La imagen proyecta las instrucciones para determinar las permeabilidades relativas a través de la opción "Gráficas" que se encuentra en la Figura 12, previamente presentada.

Este aviso resalta la importancia de disponer de las gráficas de Kro y Krw en función de Sw para examinar la tendencia de estas curvas y determinar el punto de corte de ambas ($Sw < 50\%$ o $Sw > 50\%$). Estos pasos son necesarios para llevar a cabo la evaluación de las permeabilidades relativas en el contexto del estudio.

Figura 15

Gráfica de tendencia de la permeabilidad relativa



Nota. Esta figura contiene las tres gráficas posibles para determinar si el yacimiento presenta mojabilidad al agua, mojabilidad al aceite o una mojabilidad mixta.

En este punto, se debe seleccionar el gráfico que mejor represente la mojabilidad del yacimiento en estudio, basándose en el punto de corte de saturación, y posteriormente hacer clic en la opción "Aceptar". La elección correcta de la gráfica es esencial para caracterizar adecuadamente la mojabilidad del yacimiento.

Una vez el usuario este seguro de que la información ingresada es correcta y está completa en la figura 12 se encontrará el botón "Realizar Selección", con este se podrá finalizar la selección y obtener los resultados.

Figura 16

Posibles resultados

SU YACIMIENTO NO ES APTO PARA LA APLICACION DE NANOPARTICULAS DE SILICE DEBIDO A SUS PROPIEDADES	NANOPARTICULA DE SILICE LHPN (LIPOFÓBICO E HIDROFÍLICO)
NANOPARTICULA DE SILICE NWPN (MOJABILIDAD NEUTRA)	NANOPARTICULA DE SILICE HLPN (LIPOFÍLICO E HIDROFÓBICO)

Nota. Se presentan los posibles resultados que puede arrojar la herramienta dependiendo de las propiedades del yacimiento.

En la figura 16 se presentan los 4 posibles resultados que pueden ser arrojados por parte de Nanosilselect dependiendo de la información del yacimiento que se haya ingresado en la interfaz de la figura 12. Es posible que el yacimiento no sea apto para las nanopartículas de sílice, que sea óptimo el uso de LHPN, que aumente la eficiencia la nanopartícula de sílice NWPN o que sea de más conveniente usar la nanopartícula HLPN.

Figura 17

Posibles resultados

```
46 Form2.TextBox2.Enabled = True
47 Else
48 Form2.Label3.Enabled = False
49 Form2.Label4.Enabled = False
50 Form2.TextBox2.Enabled = False
51 End If
52 If CheckBox2.Checked Then
53 GT = 1
54 Else
55 GT = 0
56 End If
57 If CheckBox2.Checked And CheckBox1.Checked Then
58 CheckBox13.Checked = False
59 CheckBox13.Enabled = False
60 Else
61 CheckBox13.Enabled = True
62 End If
63 If CheckBox2.Checked And CheckBox13.Checked Then
64 CheckBox1.Checked = False
65 CheckBox1.Enabled = False
66 Else
67 CheckBox1.Enabled = True
68 End If
69 TOTAL = T + GT + API + SW + M + BSW + TI + TR + MRP + MRS + A + CC + S + P + GE + PR + D
70 If TOTAL >= 1 Then
71 Button4.Enabled = True
72 Else
73 Button4.Enabled = False
74 End If
75 End Sub
```

Nota. Codificación realizada para el desarrollo de la herramienta digital

De acuerdo con lo consignado anteriormente, se verifica que se cumple el objetivo 2 de la investigación, generando los algoritmos necesarios para realizar la programación en Visual basic de acuerdo con lo indicado en la etapa 3.

4.3 Ejecución de algoritmos para corroborar el funcionamiento de código usando un caso base

En este punto, se da cumplimiento al objetivo específico 3, mediante la ejecución y desarrollo de la etapa 4 del proyecto. El objetivo específico en mención consiste en determinar la nanopartícula de sílice más eficiente para la aplicación en un caso base por medio de Nanosilselect y para ello, dentro de la etapa 4 se corrobora el funcionamiento del código de tal manera que, al ejecutarlo, arroje el nombre de la nanopartícula de sílice apta para el yacimiento que se desee estudiar, como se muestra a continuación:

Tabla 13

Información base del yacimiento

Información del Yacimiento	
Temperatura (°F)	130
°API	10
Sw	0,52
Mojabilidad	oil wet
Permeabilidad (md)	250
Profundidad	8000
Tipo de roca	Arenisca
Mecanismo de recobro primario	Acuífero
Mecanismo de recobro secundario	Inyección de agua

Nota. La tabla presenta los valores de las propiedades del yacimiento implementados en el modelo de simulación.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 13 del yacimiento utilizado para el caso base planteado, se ingresan las propiedades del reservorio en la herramienta digital para realizar la respectiva selección.

Figura 18

Datos de entrada a "Nanosilselect".

The screenshot shows a software window titled "Datos del yacimiento" with the following fields and values:

- Temperatura: 130 °F
- Gradiente de temperatura: (empty) °F/100ft
- °API: 10 °API
- Saturación de agua: 52 %
- Mojabilidad: Mojado al aceite
- BSW: (empty) %
- Gravedad específica: (empty)
- Permeabilidades relativas: Graficas
- Profundidad: 8000 ft
- Tensión interfacial: (empty) N/m
- Tipo de roca: Areniscas
- Mecanismo de recobro primario: Empuje por agua
- Mecanismo de recobro secundario: Inyección de agua
- Adsorción: (empty) lb / lb
- Composición del crudo (Análisis SARA): Valores
- Salinidad: (empty) ppm
- Permeabilidad: 250 md

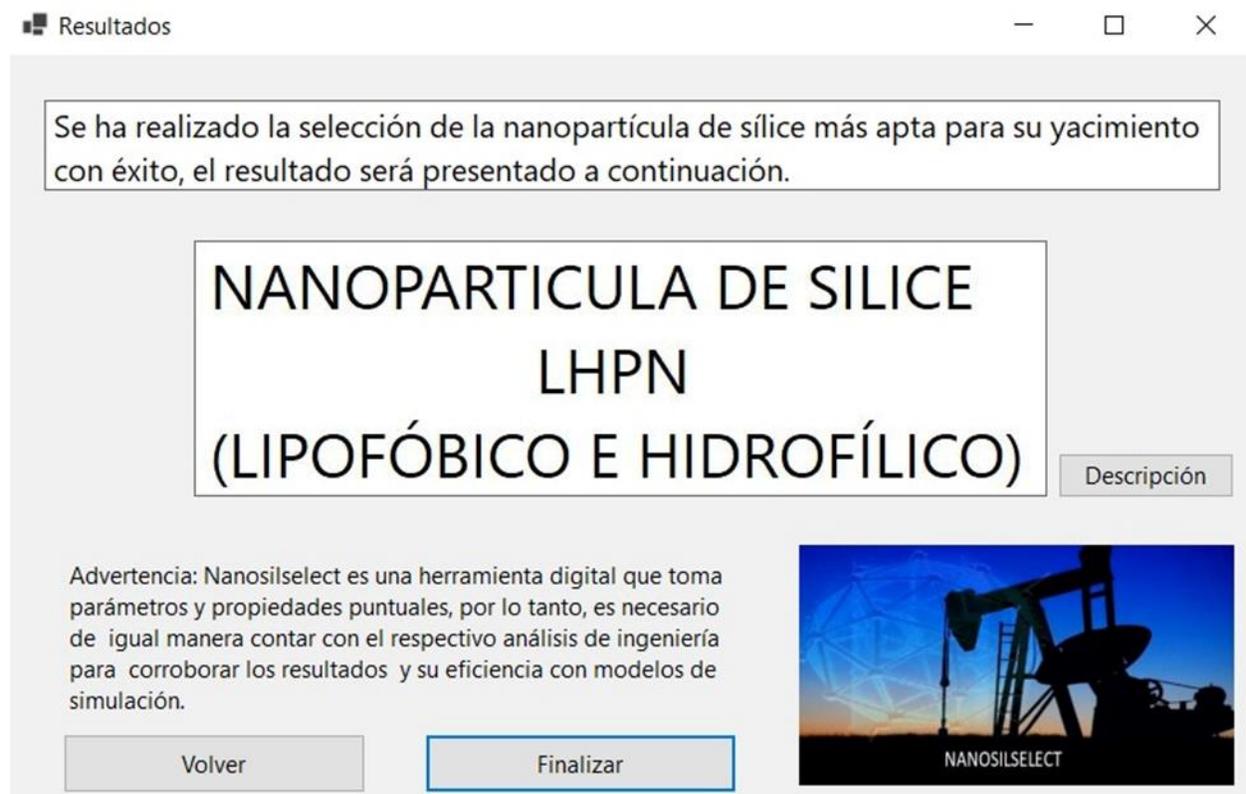
Buttons at the bottom: Salir, Volver, Realizar selección, and a Reset button.

Nota. En esta figura se pueden observar los valores y características seleccionadas en la herramienta digital para efectuar la selección.

Una vez validada la información del yacimiento, se procede a realizar la selección por medio de la herramienta digital para las propiedades del yacimiento previamente ingresadas.

Figura 19

Nanopartícula de sílice más apta para el yacimiento de estudio



Nota. La figura representa los resultados generados por la herramienta digital para la nanopartícula LHPN, identificándola como la más eficiente para el yacimiento.

Una vez obtenida la nanopartícula de sílice ideal a través de la herramienta digital "Nanosilselect". La Etapa 4 propuesta en la metodología cumple con el objetivo específico 3, que involucra el funcionamiento de los algoritmos de la programación, considerando las variables previamente estudiadas para la selección de las nanopartículas de sílice.

4.4 Simulación de un caso base en el software CMG para comprobar la funcionalidad de la herramienta digital "Nanosilselect"

En el presente apartado, se delinearé la correlación existente entre la fase 5 y el cuarto y último objetivo específico. En esta instancia, se llevará a cabo la evaluación comparativa de diversas categorías de nanopartículas de sílice consignadas en el objetivo anterior, utilizando el software CMG. Este proceso tiene como objetivo validar

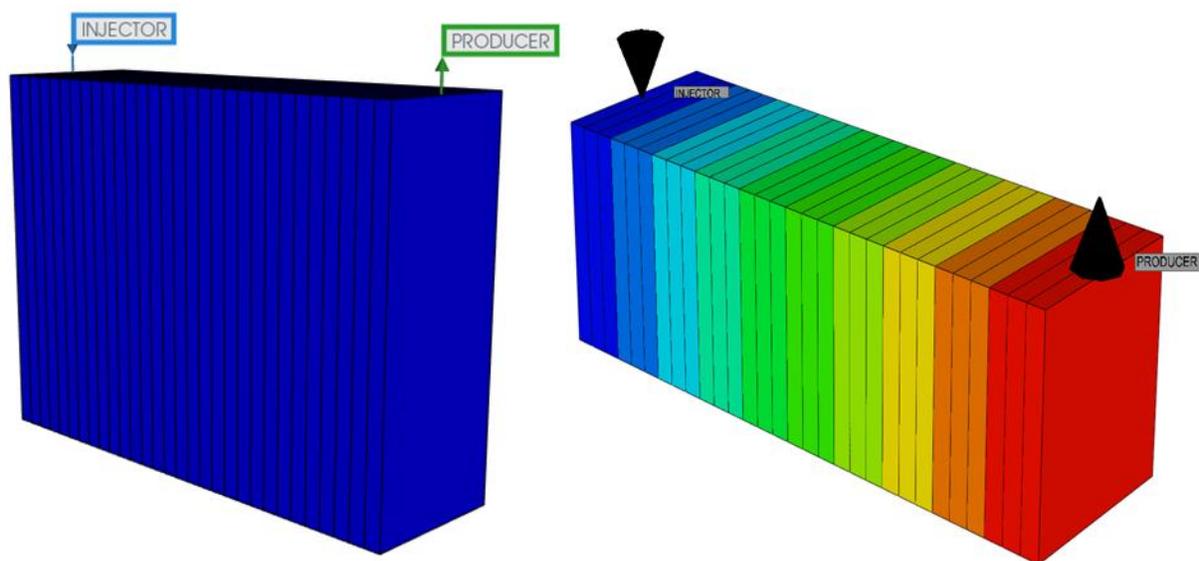
los resultados generados por la herramienta digital denominada "Nanosilselect". La finalidad primordial radica en simular diversas situaciones con el propósito de corroborar la idoneidad y eficacia del programa, de acuerdo con las directrices establecidas en la etapa número 5 del presente estudio.

Los modelos de simulación que se presentarán a continuación se desarrollaron en 5 meses con inyección continua de nanopartículas con concentración para el modelo de simulación de 0.01 molar. Se evaluaron cuatro escenarios que consistieron en un caso base con inyección de agua, otro con nanopartícula NWPN de mojabilidad neutra, posteriormente uno con nanopartícula de sílice NLPN (lipofílica e hidrofóbica) y para finalizar otro con nanopartícula LHPN (Llipofóbica e hidrofílica).

Posteriormente, se emprende con los escenarios de simulación planteados para corroborar los resultados de la selección obtenidos en Nanosilselect, los cuales se detallan a continuación:

Figura 20

Visualización 3D pozo inyector y pozo productor

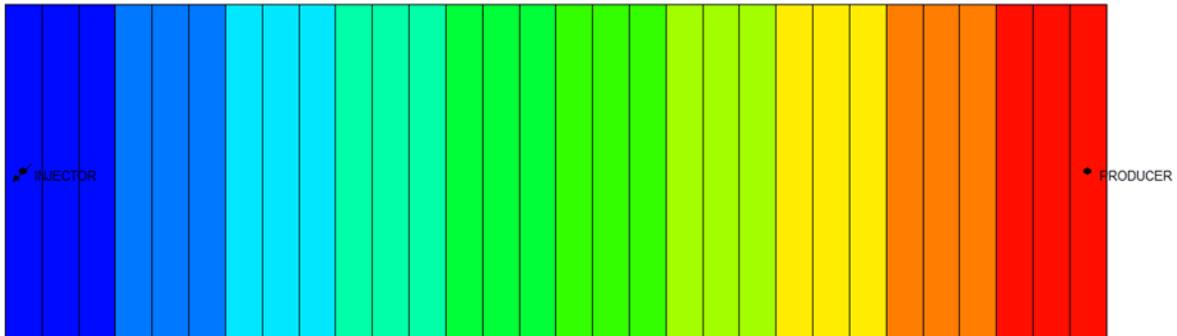


Nota. Esta es la visual 3D del bloque que se implementó en los modelos de simulación.

En el desarrollo de este estudio se contó con una relación de 1 a 1 con un pozo inyector y un pozo productor.

Figura 21

Planta del bloque del modelo de simulación

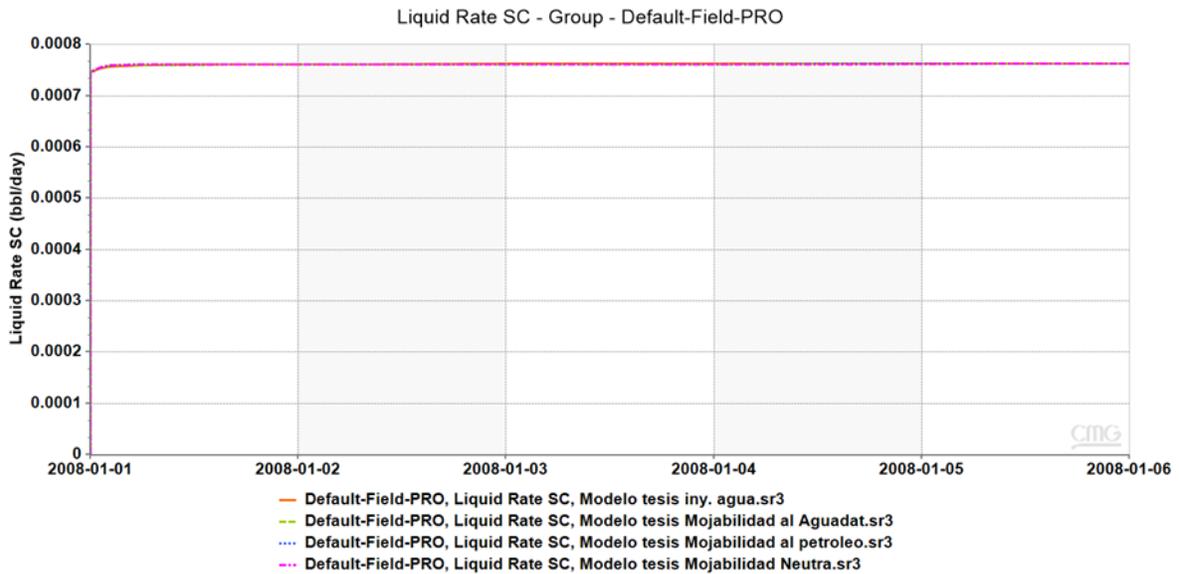


Nota. En esta figura se puede observar una vista areal o planta del modelo de simulación.

Una vez el modelo fue definido y sus propiedades representadas en el simulador se procede a realizar las corridas para cada uno de los escenarios planteados. Una vez finalizadas se obtuvieron los resultados que son expuestos a continuación:

Figura 22

Tasa de producción de líquido



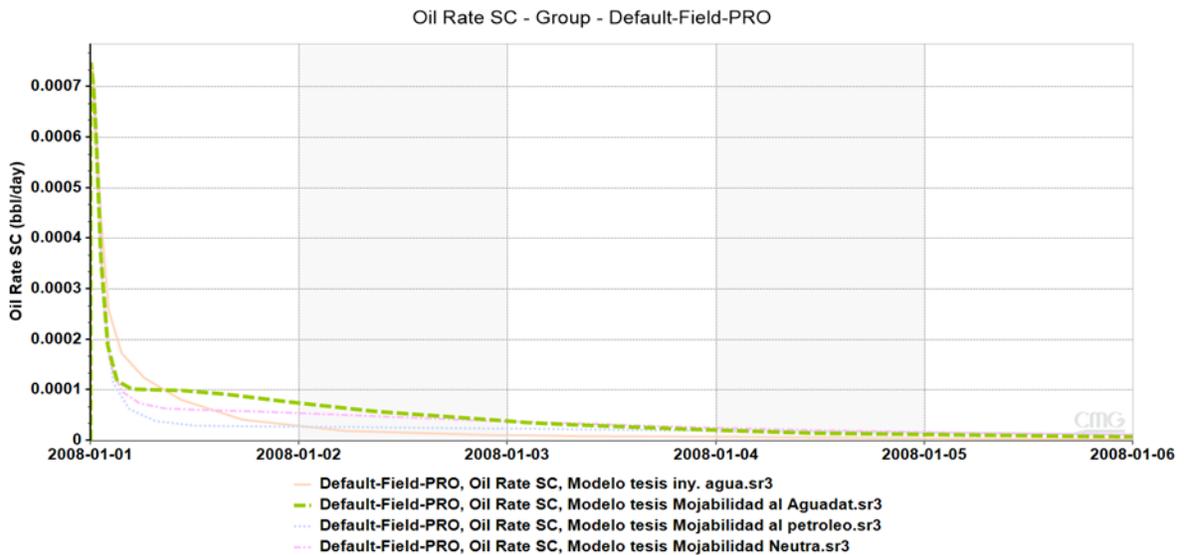
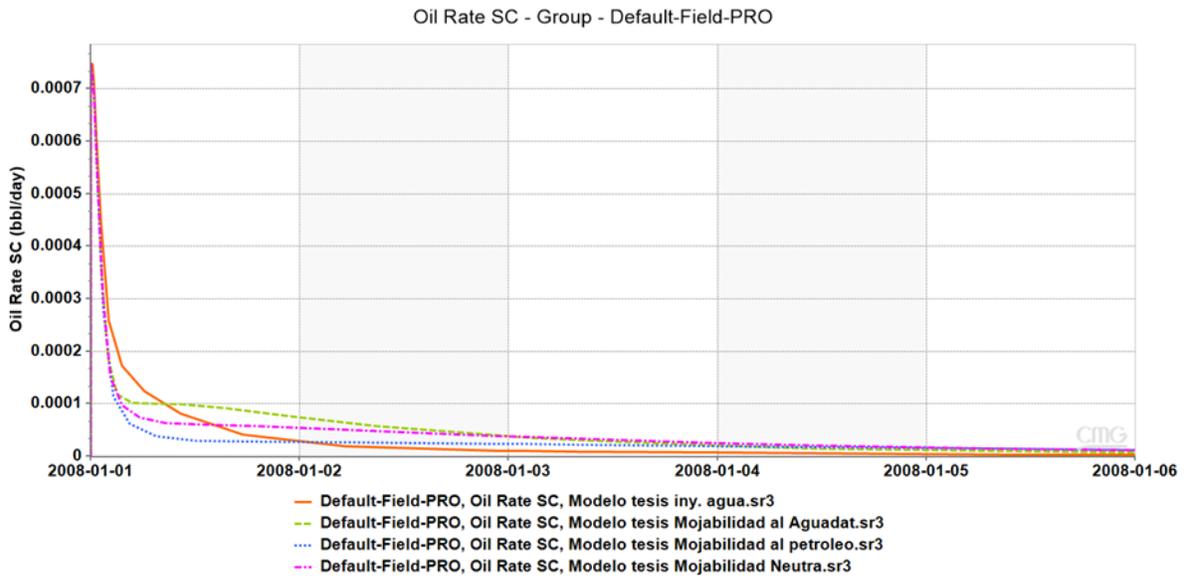
Nota. Esta imagen muestra la tasa de producción de líquido total, que se encuentra constante en todos los escenarios de simulación.

Esta gráfica unifica la producción total de petróleo, gas y agua, los cuales se encuentran en un valor constante para el modelo de inyección de agua, el modelo de mojabilidad al

agua LHPN, mojabilidad al petróleo HLPN y mojabilidad neutra NWPN. Estos colores se conservan en todas las demás gráficas para una mejor comprensión de estas (naranja: inyección de agua, verde: inyección de LHPN, azul: inyección de HLPN y morado: inyección de NWPN).

Figura 23

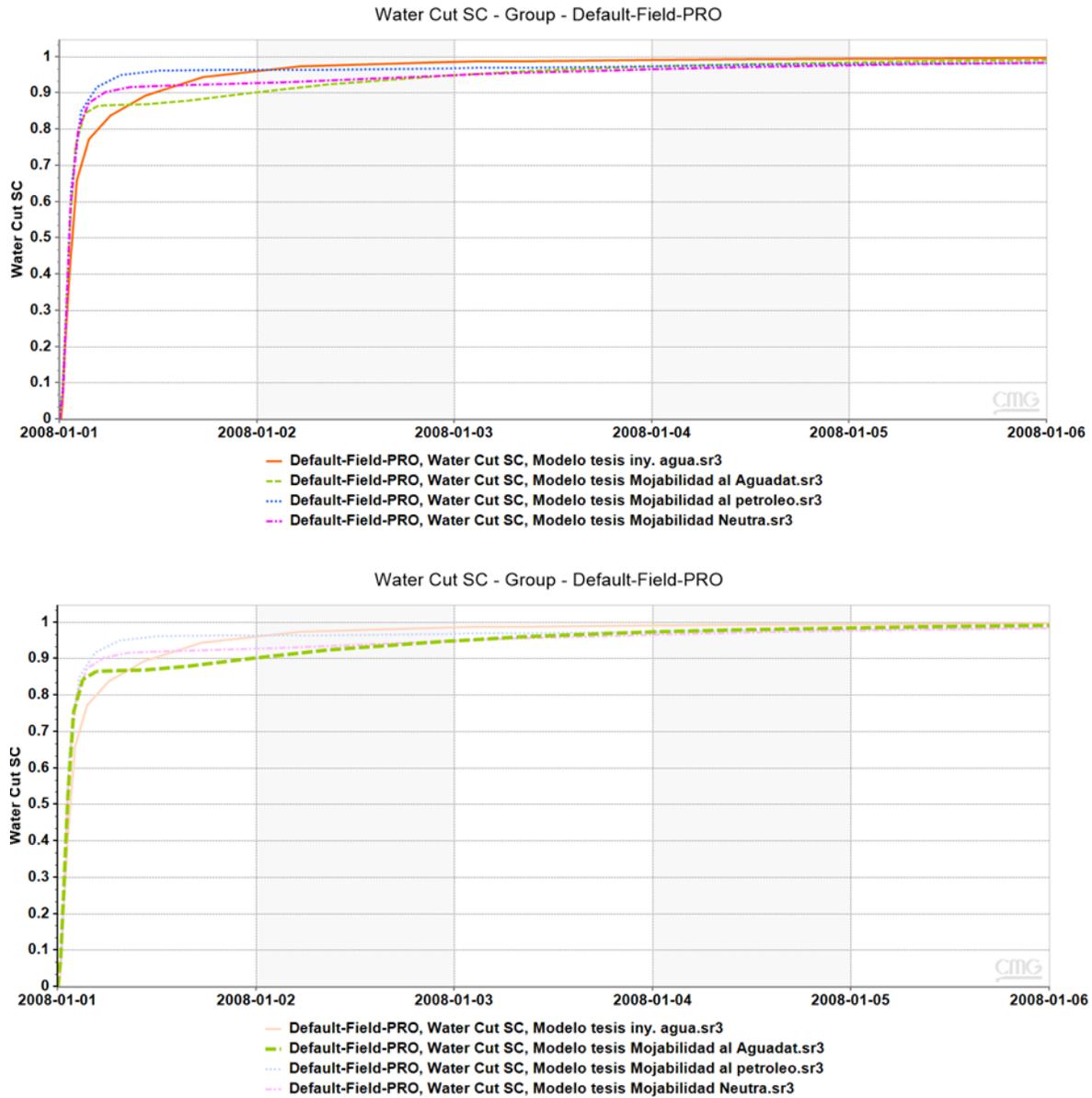
Producción de petróleo para cada escenario de simulación



Nota. Esta imagen evidencia que la rata de producción más alta se presenta con la nanopartícula de sílice LHPN.

Figura 24

Corte de agua

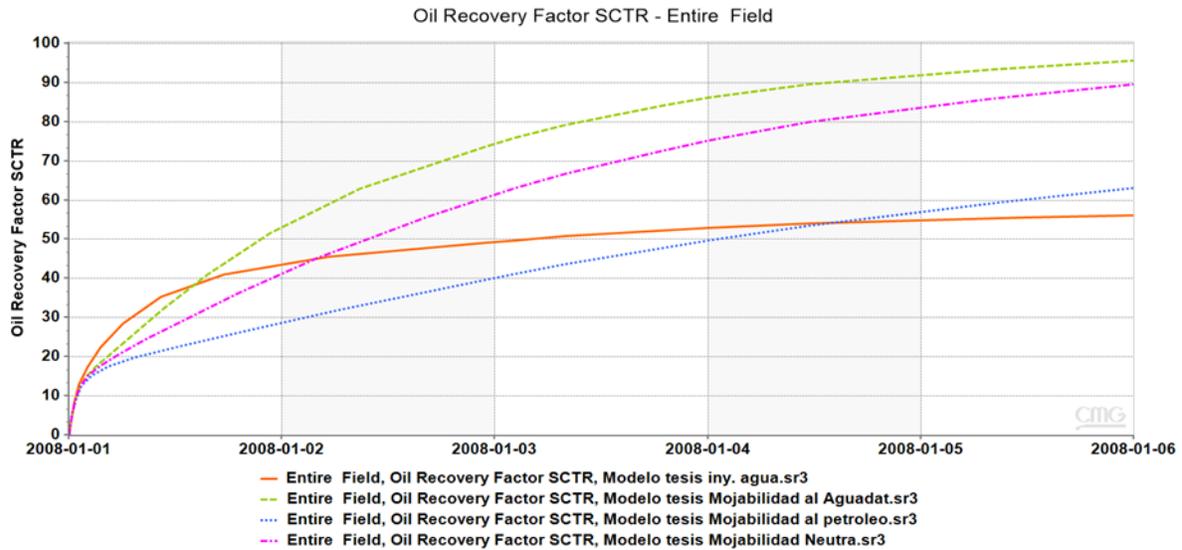


Nota. Estas gráficas muestran la curva con el corte de agua más bajo, en este caso la del modelo de inyección de LHPN.

En este contexto, se recomienda identificar la curva de corte de agua mínima, considerando los costos asociados al tratamiento del agua de producción. Además, se debe tener en cuenta la posibilidad de conificación del pozo, lo cual puede dar lugar a problemas de producción. En este escenario, el porcentaje de rentabilidad podría aumentar significativamente.

Figura 26

Factor de recobro

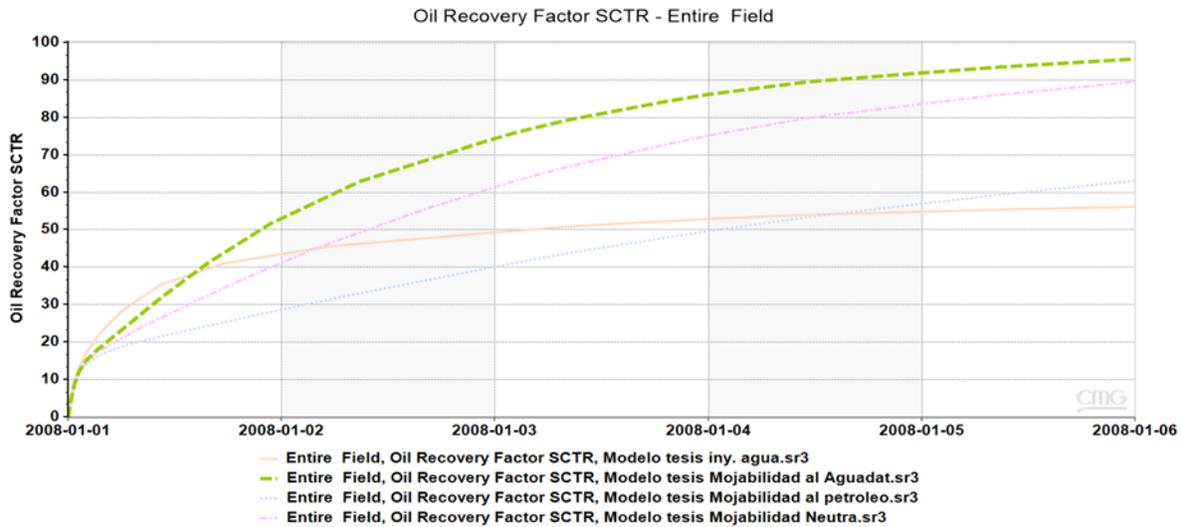


Nota. Esta gráfica representa el factor de recobro para cada uno de los escenarios que fueron proyectados.

La gráfica anterior infiere que los modelos de inyección de LHPN, inyección de HLPN e inyección de NWPN, presentan un factor de recobro mucho más alto respecto al modelo de inyección de agua, el cual tiene un factor de recobro máximo del 56% aproximadamente.

Figura 27

Factor de recobro óptimo



Nota. Esta gráfica resalta que el modelo de inyección de LHPN es el de mayor rendimiento.

En la figura anterior, se evidencia que el escenario de simulación de inyección de LHPN exhibe un rendimiento superior en cuanto al factor de recobro en el yacimiento bajo estudio, registrando un porcentaje más elevado en comparación con los otros escenarios de simulación. Según los resultados obtenidos, la nanopartícula de sílice con afinidad por el agua, específicamente la LHPN (lipofóbica e hidrofílica), la cual tiende a no mezclarse con el crudo, lo que resulta en una mejora en la producción del yacimiento dando origen a emulsiones de petróleo en agua obteniendo resultados favorables debido a que el crudo es extrapesado, generando buena eficiencia de barrido, produciendo un efecto de “lavado” en el reservorio.

La nanopartícula LHPN (lipofóbica e hidrofílica) es relevante en la interacción fluido-fluido y roca-fluido debido a su capacidad para influir en la química de superficie y las propiedades del fluido. Su naturaleza hidrofílica afecta la interacción con el agua, mientras que su lipofobia influye en la interacción con componentes lipofóbicos, como hidrocarburos. Esto puede tener impactos en la mojabilidad de la roca y la permeabilidad, siendo potencialmente útil en procesos como la recuperación mejorada de petróleo.

Finalmente, se puede inferir que el modelo de simulación en el escenario que corresponde a la nanopartícula de sílice LHPN (lipofóbica e hidrofílica) es el óptimo para

este yacimiento porque mejora el factor de recobro de 56% (inyección de agua o caso base) al 96% aproximadamente.

En general, todas las variables seleccionadas tienen un gran impacto e influyen en la determinación de la nanopartícula de sílice más apta, dado que va a depender de las condiciones del yacimiento que se estudie y no va comportarse de igual forma en cada caso. Sin embargo, se logró identificar que algunas variables de mayor influencia en la selección son: la temperatura, la gravedad API, la saturación, mojabilidad, el tipo de roca, el mecanismo de recobro primario y secundario, la permeabilidad y la profundidad.

5. CONCLUSIONES

De las 27 variables seleccionadas, se logró determinar 17 variables influyentes en la selección de nanopartículas de sílice dentro de las cuales 12 son de alto impacto, 2 variables son de impacto moderado y 3 variables son de impacto bajo.

Las 17 variables se correlacionaron para la creación de la herramienta digital Nanosilselect, se realiza la programación siguiendo códigos, instrucciones y secuencias para la creación de los algoritmos necesarios logrando con éxito la ejecución del programa.

Se debe contar previamente con la información a introducir respecto a los porcentajes para la implementación del análisis SARA y adicionalmente, es de vital importancia conocer la tendencia de la mojabilidad del yacimiento si es mojado al agua, mojado al aceite o presenta mojabilidad mixta. Lo anterior, como insumo para determinar la permeabilidad relativa.

Mediante la herramienta Nanosilselect se logra determinar que las nanopartículas de sílice aptas para los yacimientos son: NWPN de mojabilidad neutra, LHPN que es lipofóbica e hidrofílica, HLPN (lipofílica e hidrofóbica) y finalmente, un resultado que indica que el yacimiento no es apto para la aplicación de nanopartículas,

El uso de las nanopartículas de sílice es viable desde el punto de vista técnico y ambiental teniendo en cuenta que son nanopartículas inorgánicas, de esta manera reduciendo los impactos y cambios drásticos tanto en superficie como en profundidad.

La aplicación de las nanopartículas de sílice en el caso de estudio aplicado obtuvo un resultado favorable para la producción, la simulación se proyectó para un horizonte de inyección durante 5 meses con inyección continua de nanopartículas; en donde se tuvo un aumento aproximado del 40% del factor de recobro, teniendo en cuenta la curva de la inyección de agua y el escenario más favorable con nanopartícula LHPN.

La nanopartícula LHPN (lipofóbica e hidrofílica) es relevante en la interacción roca-fluido al influir en la mojabilidad y permeabilidad de la roca. También afecta la interacción fluido-fluido al modificar las propiedades del fluido, como viscosidad y tensión superficial, con implicaciones en procesos como la recuperación mejorada de petróleo.

Se obtuvo una reducción aproximada del 10% del corte de agua, lo que se traduce en una depletación más controlada del yacimiento, mayor aprovechamiento de los recursos y el potencial productivo de la locación. De esta manera, obteniendo más beneficios financieros y retornos de inversión.

REFERENCIAS

- [1] N. D. V. Basic and A. D. W. Forms, “Documentación de Visual Basic.”
- [2] R. Castro et al., “Waterflooding in Colombia: Past, present, and future,” *SPE Lat. Am. Caribb. Pet. Eng. Conf. Proc.*, vol. 3, pp. 2238–2245, 2014, doi: 10.2118/169459-sp.
- [3] C. Espinosa and K. Torres, “Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos , pesados y extra-pesados,” *J. Pet. Sci. Eng.*, p. 19, 2015, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10819/2614>.
- [4] G. I. D. Zhao D.W., Wang J., “Thermal recovery strategies for thin heavy oil reservoirs,” vol. 117, 2014, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236113008521>.
- [5] M. Madrid, “Procesos Térmicos en la Recuperación Mejorada de Petróleo,” *Portal del petroleo*, 2020. <https://www.portaldelpetroleo.com/2020/07/procesos-termicos-en-la-recuperacion.html>.
- [6] Lake Larry ; Russell T. Johns ; Guillermo R. Rossen ; Gary A. Papa, *Fundamentos de la recuperación mejorada de petróleo*, Sociedad d. 2014.
- [7] J. L. Ramos Ramos, C. A. Duarte Prada, I. R. Astros Fonseca, and Á. D. P. Trujillo Montes, “Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de la inyección alternada agua-gas combinada con la inyección de químicos en un campo de crudo mediano en Colombia,” *Rev. Invest. (Guadalajara)*., vol. 6, no. 2, pp. 137–161, 2013, doi: 10.29097/2011-639x.151.
- [8] J. L. Shelton et al., “Determining CO₂ storage potential during miscible CO₂ enhanced oil recovery: Noble gas and stable isotope tracers,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 51, pp. 239–253, 2016, doi: 10.1016/j.ijggc.2016.05.008.
- [9] L. F. Castro Castañeda, “Inyección De Co₂ Como Método De Recuperación Mejorada,” p. 146, 2013.

- [10] H. Belhaj, H. Abukhalifeh, and K. Javid, "Miscible oil recovery utilizing N₂ and/or HC gases in CO₂ injection," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 111, pp. 144–152, 2013, doi: 10.1016/j.petrol.2013.08.030.
- [11] E. S. Medina, "Recuperacion mejorada por inyeccion de alcali, surfactante y polimero (ASP)," 2010.
- [12] C. Briones, E. Casero, J. Martín, and P. Serena, *Nanociencia y nanotecnología- Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro*, no. 2. 2013.
- [13] F. D. L. I. BANKINTER, *NANOTECNOLOGIA La Revolucion Industrial del Siglo XXI*, 05 ed. Madrid, España: ISSUU, 2010.
- [14] R. Staff, "Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad," *Rev. Enfermería del Trab.*, vol. 5, no. 1, pp. 21–27, 2015.
- [15] Instituto Nacional de Seguridad y salud en el Trabajo (INSST), "Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales," *Blamey y otros*, vol. 2, no. 2, pp. 17–22, 2015, [Online]. Available: <http://publicacionesoficiales.boe.eshttp://www.insht.es/catalogopublicaciones/>.
- [16] M. Elkady, "Application of Nanotechnology in EOR, Polymer-Nano Flooding the Nearest Future of Chemical EOR," pp. 1–20, 2016, doi: 10.2118/184746-stu.
- [17] E. Manrique and J. Romero, "Estatus de la recuperación mejorada de petróleo en colombia," pp. 1–4, 2015.
- [18] Perry M. Jarrell; Charles E. Fox; Michael H. Stein; Steven L. Webb, *Practical Aspects of CO₂ Flooding*. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [19] Don W. Green; G. Paul Willhite, *Enhanced Oil Recovery*. Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [20] M. Welch, "Greener EOR: Employing cogeneration to improve the energy efficiency of thermal EOR projects," *Soc. Pet. Eng. - SPE Asia Pacific Oil Gas Conf. Exhib.* 2011, vol. 1, pp. 336–341, 2011, doi: 10.2118/144224-ms.

- [21] S. Sharma, D. Kamal, E. Al-Maraghi, S. AlMahrooqi, and M. Winkler, "Miscible Gas EOR pilot design decisions driven by linking EOR performance parameters to uncertainties-A Kuwait field example," Soc. Pet. Eng. - SPE EOR Conf. Oil Gas West Asia, OGWA 2016, 2016, doi: 10.2118/179831-ms.
- [22] E. Dean, J. French, M. Pitts, and K. Wyatt, "Practical EOR agents - there is more to EOR than CO₂," Soc. Pet. Eng. - SPE EOR Conf. Oil Gas West Asia 2018, vol. 2018-March, 2018, doi: 10.2118/190424-ms.
- [23] P. C. Smalley et al., "EOR screening including technical, operational, environmental and economic factors reveals practical EOR potential offshore on the norwegian continental shelf," Proc. - SPE Symp. Improv. Oil Recover., 2020, doi: 10.2118/SPE-200376-MS.
- [24] Y. Kaito, A. Goto, D. Ito, S. Murakami, H. Kitagawa, and T. Ohori, "First Nanoparticle-Based EOR Nano-EOR Project in Japan: Laboratory Experiments for a Field Pilot Test," Proc. - SPE Symp. Improv. Oil Recover., vol. 2022-April, 2022, doi: 10.2118/209467-MS.
- [25] E. Márquez et al., *Las Nanopartículas Y Sus Aplicaciones Biomédicas*. 2021.

ANEXOS

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

La investigación realizada y la herramienta digital planteada fueron realizadas dentro de los rangos operativos planteados en base a un proyecto de recobro mejorado en desarrollo. El proyecto en su totalidad fue diseñado en base a la bibliografía encontrada y planteado en torno a ello. La metodología de verificación, la cual fue realizada por medio de simulación computacional de igual manera se realizó con modelos de dominio público obtenidos directamente de los modelos disponibles de CMG en su base de datos.

Algunas propiedades presentan un impacto moderado en este estudio, como la porosidad porque las nanopartículas de sílice a menudo tienen una gran área de superficie específica debido a su tamaño nanométrico y a su estructura porosa. Esto les permite tener interacciones significativas con los fluidos en la formación rocosa, incluso en presencia de una baja porosidad, ya que su superficie específica puede compensar la limitada disponibilidad de poros.

Para futuros proyectos con enfoques y objetivos similares planteados para la realización de este proyecto de investigación sería de gran utilidad contar con datos e información de aplicaciones puntuales de las nanopartículas de sílice en proyectos piloto de recobro mejorado. En donde se contaría con datos de campo para realizar ajustes a los modelos y verificar los efectos de las nanopartículas y la eficiencia de la herramienta digital programada en un caso de estudio específico con condiciones reales.