Modelamiento geológico-numérico de la cuenca emergente colombiana Sinú-San Jacinto integrando complejidad estructural y estratigráfica

Mileina Yuliana Silva Cárdenas

Trabajo de Grado para optar al Título de Geóloga

Director

Francisco Alberto Velandia Patiño

Doctor en Geociencias

Codirector

Yesid Paul Goyes Peñafiel

Geólogo, PhD(c)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios

A mis padres Jairo Silva y Olga Lucía Cárdenas que me han apoyado incondicionalmente durante toda mi vida y me han brindado las herramientas para mi desarrollo personal y profesional.

A mi hermana Taty por ser un ejemplo para mí.

A mi nona Mariana por consentirme todo el tiempo.

A Jeison por estar siempre para mí, darme ánimos cuando me sentía abrumada y hacer mi vida aún más feliz.

Agradecimientos

Al profesor Francisco Velandia por sus enseñanzas durante la carrera y especialmente por su dirección en este proyecto.

A mi codirector Paul Goyes por orientarme y resolver todas mis dudas.

A las geólogas del proyecto 3925* Maria Alejandra Hernández, Ana Gabriela Mantilla y Maria Paula Bohórquez por asesorarme en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera, a la Escuela de Geología, personal administrativo, docente y compañeros de estudio.

*Este trabajo de grado fue realizado en el marco del proyecto No.3925. - "Modelamiento matemático - computacional para el mejoramiento de imágenes símicas en cuencas emergentes colombianas utilizando aprendizaje profundo con adaptación de dominio", financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander. El proyecto 3925 brindó el apoyo logístico para el uso de recursos computacionales, así como capacitación y asesoramiento.

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 12

1. Planteamiento y justificación del problema 13

2. Objetivos 15

2.1 Objetivo General 15

2.2 Objetivos Específicos 15

3. Marco teórico 16

3.1 Modelos geológico-numéricos 16

3.2 Modelamiento probabilístico de las propiedades que integran un modelo geológico-numérico 17

4. Marco Geológico 19

4.1 Cuencas emergentes 19

4.2 Tectónica y geología regional 20

5. Métodos y herramientas 24

5.1 FASES 24

5.1.1 FASE 1: Caracterización estratigráfica y estructural la cuenca Sinú-Jacinto a partir de la información disponible en las bases de datos de libre acceso. 24

5.1.2 FASE 2: Identificar posibles zonas de recursos de interés económico en la cuenca Sinú-San Jacinto con base en la revisión sistemática del estado del arte en el sector energético. 25

5.1.3 FASE 3: Construir modelos geológicos-numéricos con herramientas computacionales de libre acceso integrando las características estructurales y estratigráficas de la cuenca Sinú-San Jacinto. 25

5.1.4 FASE 4: Validar los modelos geológico-numéricos incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas 26
5.2 Funcionamiento de GemPy 26
6. Resultados 29
6.1 Estratigrafía y geología estructural de la cuenca Sinú-San Jacinto 29
6.1.1 Estratigrafía de la cuenca Sinú San Jacinto 29
6.1.1.1 Cretácico Tardío. 29
6.1.1.2 Paleoceno temprano. 30
6.1.1.3 Eoceno medio. 30
6.1.1.4 Eoceno tardío. 30
6.1.1.5 Mioceno temprano a medio. 31
6.1.1.6 Mioceno tardío a Plioceno. 32
6.1.2 Sistema petrolífero 33
6.1.2.1 Sistema petrolífero del Cinturón plegado del Sinú 34
6.1.2.1.1 Roca generadora. 34
6.1.2.1.2 Roca reservorio. 34
6.1.2.1.3 Roca sello. 35
6.1.2.1.4 Trampas. 35
6.1.2.2 Sistema petrolífero del Cinturón fallado de San Jacinto 35
6.1.2.2.1 Roca generadora. 35
6.1.2.2.2 Roca reservorio. 35
6.1.2.2.3 Roca sello. 35
6.1.2.2.4 Trampas. 35

6.1.3 Geología estructural de la cuenca Sinú San Jacinto 36

6.1.3.1 Estilos estructurales. 36

6.1.3.1.1 Cinturón plegado del Sinú. 37

6.1.3.1.2 Cinturón fallado de San Jacinto. 39

6.1.3.2 Síntesis de estilos estructurales 40

6.1.4 Potencial de Hidrocarburos 42

6.1.5 Potencial de shale gas 44

6.1.6 Potencial de agua subterránea 45

6.2 Zonas de interés energético en la cuenca Sinú-San Jacinto 48

6.3 Modelos geológicos-numéricos integrando las características estructurales y estratigráficas de la cuenca sedimentaria Sinú-San Jacinto 53

6.3.1 Recopilación de datos de densidad y la velocidad de las ondas P 53

6.3.1 Zona de interés 1: Manso 55

6.3.2 Zona de interés 2: Plaza Hormiga 56

6.3.3 Zona de interés 3: Cerro Cansona 57

6.3.4 Zona de interés 4: Bejuco 59

6.4 Validación los modelos geológico-numéricos incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas 61

7. Conclusiones 63

8. Trabajo futuro 65

Referencias Bibliográficas 67

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 Cuencas emergentes de Colombia: Área, Límites Geográficos y Contexto Tectónico. 23

Tabla 2 Sistemas petrolíferos generalizados de la cuenca Sinú-San Jacinto..... 34

Tabla 3 Resumen de estilos estructurales del Cinturón fallado de San Jacinto y del cinturón plegado del Sinú. 41

Tabla 4 Recopilación de propiedades físicas de cada formación geológica..... 54

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1 Modelos geológicos. 16

Figura 2 Campo de probabilidad 18

Figura 3 Mapa de localización de las cuencas emergentes colombianas. 21

Figura 4 Mapa de localización de la Cuenca Sinú-San Jacinto y provincias geológicas de la cuenca 21

Figura 5 Metodología establecida para el proyecto actual. 24

Figura 6 Campo escalar 27

Figura 7 Datos de entrada. 28

Figura 8 Columna generalizada de cuenca Sinú-San Jacinto 33

Figura 9 Elementos estructurales mayores de Sinú - San Jacinto. 37

Figura 10 Línea sísmica interpretada, (ANH-SS-2008-06) Cinturón Plegado del Sinú ... 38

Figura 11 Frente de Deformación del Sinú en el límite norte del Cinturón Plegado del Sinú 39

Figura 12 Línea sísmica interpretada que cruza la parte sur del anticlinorio de San Jacinto 40

Figura 13 Perfil geosísmico y diagrama estructural de los dominios tectónicos de la cuenca Sinú - San Jacinto 42

Figura 14 Distribución de filtraciones de petróleo, filtraciones de gas e indeterminadas de SFB 43

Figura 15 Mapa de áreas de Interés Shale-Gas cuenca Sinú - San Jacinto. 44

Figura 16 Localización general del Acuífero Morroa 46

Figura 17 Esquema del Acuífero Morroa 47

Figura 18 Columna estratigráfica generalizada de la provincia Sinú-San Jacinto 48

Figura 19 Mapa con líneas sísmicas y pozos utilizados en el proyecto sísmico Sinú sur 2008 y ubicación regional de las zonas de interés 49

Figura 20 Área de interés Manso 49

Figura 21 Área de interés Plaza Hormiga 50

Figura 22 Zonas de interés Cuenca Sinú – San Jacinto 52

Figura 23 Densidad y velocidad de ondas de los distintos tipos de roca 53

Figura 24 Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Manso 55

Figura 25 Proceso de elaboración del modelo geológico-numérico 3d Zona2. 56

Figura 26 Subzonas de interés 57

Figura 27 Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Zona 3 58

Figura 29 Zona de interés 4 Diapiro de Lodo 59

Figura 30 Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Zona 4 60

Figura 31 Modelos probabilísticos 62

Figura 32 Modelamiento sísmico 65

Figura 33 Ejemplo de configuración de fallas en llana (flat) y rampa (ramp) realizado en GemPy 66

Resumen

Título: Modelamiento geológico-numérico de la cuenca emergente colombiana Sinú-San Jacinto integrando complejidad Estructural y estratigráfica[*]

Autor: Mileina Yuliana Silva Cárdenas[**]

Palabras Clave: GemPy, error Monte Carlo, modelamiento probabilístico.

Este estudio se llevó a cabo en la cuenca emergente Sinú – San Jacinto la cual está ubicada en el extremo NW de Colombia. Esta cuenca que ha mostrado un gran potencial energético debido a su configuración estructural y estratigráfica. Se distinguen dos provincias geográficas, el cinturón plegado del Sinú que se caracteriza por amplios sinclinales delimitados por fallas y diapiros de lodo que actúan como trampas y sellos estructurales y en su zona offshore por pliegues imbricados de propagación de falla; y el cinturón fallado de San Jacinto que se distingue por un sistema de fallas inversas con vergencia al oeste que converge en una zona de despegue profunda. Además, se identificaron los sistemas petrolíferos con formaciones de interés económico como las formaciones Pajuil, San Jacinto y San Cayetano siendo las principales rocas reservorio de estas provincias. A partir de esta caracterización geológica y de estudios anteriores se encontraron cuatro zonas de interés y; utilizando el software GemPy, se realizaron modelos geológico-numéricos 3D a los cuales se les asignaron propiedades físicas como la densidad y la velocidad de las ondas P en diferentes tipos de roca. Finalmente, se validaron estos modelos incorporando distribución probabilística aplicando el método Montecarlo y así garantizar su utilidad y aplicabilidad práctica.

---

[*] Trabajo de Grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias. Codirector: rango Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD (c) en Ciencias de la computación.

Abstract

Title: Geological-numerical modeling of the emerging Colombian Sinú-San Jacinto basin integrating structural and stratigraphic complexity[*]

Author: Mileina Yuliana Silva Cárdenas[**]

Key Words: GemPy, Monte Carlo error, probabilistic modeling.

This study was carried out in the emerging Sinú – San Jacinto basin, which is located in the at the NW end of Colombia. This basin has shown great energy potential due to its structural and stratigraphic configuration. Two provinces are distinguished The Sinú folded belt is characterized by wide synclines delimited by faults and mud diapirs that act as traps and structural seals and in its offshore zone by imbricated folds of fault propagation; and the failed belt of San Jacinto which is distinguished by a system of reverse faults with vergence to the west that It converges on a deep take-off zone. In addition, the systems oil companies with formations of economic interest such as the Pajuil, San Jacinto formations and San Cayetano, being the main rocks reservoir of these provinces. From this geological characterization and previous studies, four areas of interest were found and; using the GemPy software, 3D geological-numerical models were made to which physical properties such as density and velocity of P waves were assigned in different types of rock. Finally, these models were validated by incorporating distribution probabilistic application of the Monte Carlo method and thus guarantee its usefulness and applicability practice.

---

[*] Bachelor Thesis

[**]Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño. PhD in Geosciences. Codirector: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD (c) in Computer Science.

Introducción

En el contexto de la exploración energética en Colombia es crucial la generación de conocimiento innovador acerca de las cuencas sedimentarias emergentes del país, ya que éstas tienen el potencial de convertirse en valiosas fuentes de energía. Según la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), en Colombia existen cinco cuencas emergentes, que corresponden a: (i) Valle Inferior del Magdalena (VIM), (ii) Guajira (GUA), (iii) Guajira offshore (GUAOFF), (iv) Cesar Ranchería (CR) y (v) Sinú-San Jacinto (SSJ). Estas cuencas emergentes son esenciales para el desarrollo energético. El enfoque particular de este trabajo es la cuenca Sinú San-Jacinto, donde se ha mostrado gran potencial energético, exhibiendo emanaderos de petróleo y gas. Además, su configuración estructural es clave para la distribución y acumulación de estos y otros recursos, como agua subterránea, o la posibilidad de almacenamiento de CO_2, así como para identificar oportunidades de explotación y desarrollo en el sector energético. Con el uso de herramientas avanzadas de modelamiento geológico y sistemas de información geográfica es posible integrar y visualizar la diversa información sobre la cuenca Sinú-San Jacinto para así promover el conocimiento y estudiar las propiedades de las zonas de interés.

En geología, los modelos geológicos son fundamentales en la comprensión de la complejidad estructural del subsuelo y la estratigrafía porque representan las características de formaciones geológicas, mientras que los modelos numéricos son un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de un sistema fisicoquímico, resueltas en un entorno de cálculo computacional (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, 2023). Sin embargo, es en la convergencia de estos dos enfoques donde emerge el concepto de modelos geológico-numéricos, en los cuales se integra la representación

geológica con la capacidad de análisis cuantitativo. Por ejemplo, Huaman (2023) usó el lenguaje de programación libre Python, en la herramienta GemPy, con bibliotecas para el modelamiento geológico en 3D incluyendo estructuras y redes de fallas; y la biblioteca Matplotlib que se encarga de la generación de gráficos. Es así como esta integración de datos estructurales y estratigráficos se puede incorporar en otros flujos de procesamiento geológico o geofísicos para el entendimiento de las cuencas emergentes.

El objetivo de este trabajo de grado es integrar la complejidad de las estructuras geológicas y las variaciones estratigráficas en diferentes modelos geológico-numéricos que exhiban estilos estructurales y cambios en la estratigrafía a partir de herramientas computacionales. Además, con ayuda de modelado probabilístico, se considera la incertidumbre en la distribución y extensión de las formaciones geológicas, lo cual es particularmente valioso cuando al trabajar con datos limitados o cuando se necesita explorar diferentes interpretaciones geológicas.

1. Planteamiento y justificación del problema

Si bien el país ha avanzado en la diversificación de su matriz energética, sigue siendo evidente su dependencia de los hidrocarburos como fuente primaria de energía. En este sentido, adquiere relevancia el estudio profundo y la generación de un mayor entendimiento de las cuencas emergentes colombianas. La información actual referente a las cuencas emergentes está dispersa, lo que dificulta una comprensión integral de sus características geológicas. Una forma de abordar este problema y contribuir a la exploración, específicamente de la cuenca emergente Sinú-San Jacinto que es el objeto de estudio de tesis, es la generación de modelos geológico-numéricos mediante la incorporación de software o

algoritmos como GemPy, el cual facilita la integración de diversos tipos de datos geológicos, como información de pozos, mapas estructurales y datos sísmicos, en un solo modelo cohesivo, esto con el fin de que los modelos tengan sentido, coherencia geológica y permitan la representación 3D de las estructuras del subsuelo.

La conversión de modelos geológicos a modelos geológico-numéricos otorga a las representaciones geológicas una base cuantitativa para integrarlos en análisis más amplios y avanzados; sin embargo, esta conversión presenta desafíos significativos debido a la necesidad de traducir conceptos geológicos y estructurales complejos, como fallas, en representaciones matemáticas y numéricas. Esto implica definir propiedades físicas y relaciones en términos cuantitativos, además de la selección y aplicación adecuada de herramientas computacionales; permitiendo una comprensión más profunda y precisa de las complejidades del subsuelo al incorporar datos y parámetros numéricos.

Finalmente, es importante validar estos modelos geológico-numéricos con fin de verificar su fiabilidad. Una forma de lograrlo es mediante la incorporación de la distribución probabilística de cada formación geológica, ya que permite capturar el campo de probabilidad de ocurrencia de una capa.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Elaborar modelos geológico-numéricos de la cuenca emergente colombiana Sinú-San Jacinto integrando complejidad estructural y estratigráfica a partir de la revisión en el estado del arte.

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar estructural y estratigráficamente la cuenca Sinú-San Jacinto a partir de la información disponible en las bases de datos de libre acceso.

Identificar posibles zonas de recursos de interés económico en la cuenca Sinú-San Jacinto con base en la revisión sistemática del estado del arte en el sector energético.

Construir modelos geológicos-numéricos con una herramienta computacional de libre acceso integrando las características estructurales y estratigráficas de la cuenca sedimentaria Sinú-San Jacinto.

Validar los modelos geológico-numéricos incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas

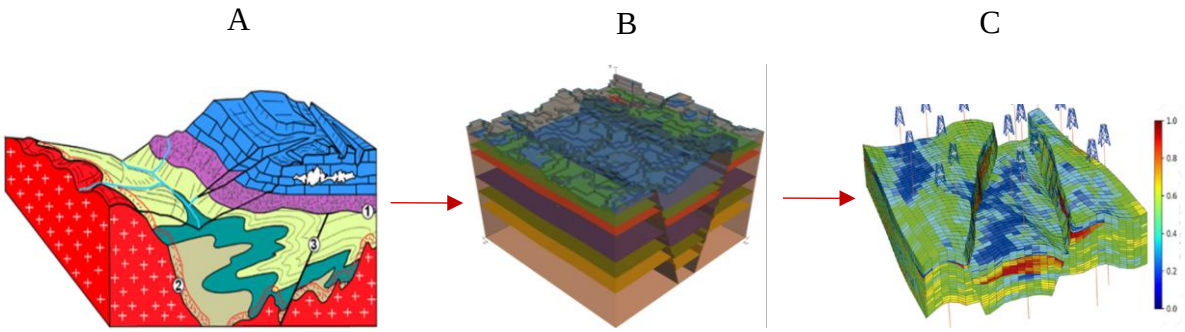
3. Marco teórico

3.1 Modelos geológico-numéricos

Un modelo geológico es una representación conceptual de una o más unidades geológicas, y se compone de litología, mineralogía, estructuras, entre otros fenómenos geológicos presentes (Figura 1) (H. Hernández, 2022). Estos incorporan información de diferentes disciplinas, como geofísica, geoquímica y estratigrafía, para entender y visualizar de una mejor forma cómo se distribuyen y comportan los sedimentos a lo largo del tiempo y el espacio. Este proceso implica la representación de fenómenos como la sedimentación, compactación y deformación de las formaciones geológicas, lo que ayuda a identificar zonas adecuadas para la exploración.

Figura 1

Modelos geológicos.



Nota: A. Modelo geológico elaborado manualmente. B. Modelo geológico computacional. C. Modelo geológico-numérico que permite asignar diversas propiedades físicas a las formaciones representadas, las cuales se visualizan mediante una escala de colores. Tomado de GemPy (n.d.); Net Brains, (n.d.).

Por otro lado, los modelos geológico-numéricos (Figura 1) son una representación teórica de un fenómeno natural, expresado en forma matemática (Instituto Geofísico del Perú, 2023) y se utilizan en diversos estudios para analizar y predecir, a través de la simulación, el comportamiento del subsuelo y las estructuras en interacción con él. En este sentido, un modelo geológico-numérico es una representación matemática de un sistema o proceso geológico real. Estos modelos utilizan herramientas computacionales para simular los fenómenos geológicos; en el estado del arte se destaca el uso de ModFlow (López, 2015), Leapfrog Geo (Vivanco, 2020), GemPy (Fandel et al., 2021; Haehnel et al., 2023; Wu y Sun, 2021) y Petrel (Caicedo, 2008).

En general, los modelos geológicos se basan en la interpretación cualitativa de las características y datos geológicos de la zona, mientras que los modelos geológico-numéricos utilizan métodos cuantitativos y computacionales para simular los procesos geológicos y modelar su comportamiento.

3.2 Modelamiento probabilístico de las propiedades que integran un modelo geológico-numérico

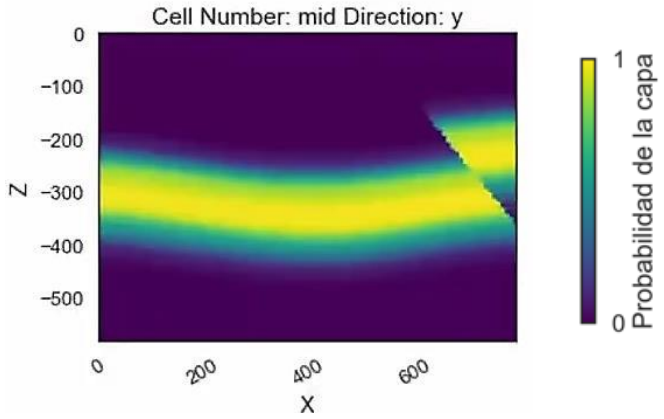
Los modelos numéricos se utilizan para diversos fines, como la elaboración de predicciones cuantitativamente precisas con fines prácticos o científicos (modelos de simulación) (Murray et al., 2016). La ventaja de este tipo de modelos radica en su capacidad para proporcionar resultados detallados que permiten un análisis minucioso de los procesos. Sin embargo, estos resultados suelen estar asociados a un nivel de incertidumbre debido al gran número de procesos involucrados y a la alta exigencia de calidad en los datos de entrada.

Con el modelamiento probabilístico se pueden explorar las posibilidades de evaluar

los niveles de incertidumbre (van der Wegen y Jaffe, 2013). Existen métodos establecidos para identificar y cuantificar la incertidumbre como las simulaciones Monte Carlo, Gaussiana, Bayesiana (M. Hernández, 2017) o bandas rotantes (Arredondo, 2016). Por ejemplo, las simulaciones Monte Carlo, son técnicas numéricas que usan datos distribuidos de manera normal y se utilizan en diversos campos para evaluar la incertidumbre al generar variables aleatorias y calcular posibles resultados a partir de un modelo conformado por vóxeles (del inglés volumetric pixel) los cuales constituyen la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional que incluye la variabilidad de los datos de entrada (González, 2015). Estos modelos resultantes proporcionan distribuciones estocásticas de las diferentes litologías para cada vóxel. En cuanto a todos los vóxeles dentro del volumen del modelo 3D, el resultado es un campo de probabilidad que muestra la definición de límites y, por lo tanto, la asignación de capas geológicas (Figura 2) (Frings et al., 2023).

Figura 2

Campo de probabilidad



Nota. Modelo probabilístico donde se muestra el campo de probabilidad de ocurrencia de una capa dada. La barra de color que indica la probabilidad de la capa, con valores desde 0 (azul, probabilidad baja) hasta 1 (amarillo, probabilidad alta). Tomado de GemPy, (2019).

4. Marco Geológico

4.1 Cuencas emergentes

Las cuencas emergentes se refieren a áreas geológicas que aún no han experimentado una explotación extensa de recursos naturales, pero que muestran un potencial significativo para futuras actividades de exploración y producción. Estas cuencas suelen estar en etapas iniciales de desarrollo y exploración en comparación con las cuencas maduras que han sido explotadas durante décadas. Flores (2016) menciona que las cuencas emergentes son potenciales reservorios que presentan características petrofísicas y estructurales muy importantes y se recomienda que deben ser estudiadas con mayor detalle para confirmarlas como objetivos reservorios primarios.

En Colombia las cuencas emergentes se encuentran al norte del país, en el caribe colombiano: Sinú - San Jacinto (SSJ), Valle Inferior del Magdalena (VIM), Cesar – Ranchería (CR), Guajira (GUA) y Guajira Offshore (GUAOFF) (Colombia está afectada tectónicamente por la interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramericana, lo que dio paso a estructuras regionales que desempeñan un papel crucial en la configuración y la dinámica de las cuencas emergentes. Se evidencia que las cuencas emergentes tienen un alto control estructural y por lo tanto su delimitación se puede expresar en términos de fallas regionales, como se muestra en la Figura 3.

La Cuenca Cesar-Ranchería está limitada hacia el NW por la Sierra Nevada de Santa Marta y al SE por la Serranía de Perijá, ambas con presencia de rocas pre-cretácicas. Esta cuenca posee una orientación N30°E y ha sido dividida en las subcuencas de Cesar al sur y Ranchería al norte, separadas por el alto de Verdesia, e incluye parcialmente los departamentos de Cesar y de LaGuajira. La cuenca de Sinú-San Jacinto se encuentra al NW

del país y limita al sur con la Cordillera Occidental. Las cuencas Guajira y Guajira Offshore se ubican en el extremo norte de Colombia y están afectadas por las fallas regionales de Cuiza y Oca (Tabla 1). La Cuenca del Valle Inferior del Magdalena está compuesta por las depresiones de Plato y San Jorge separadas por el Arco de Magangué y limita al suroriente con el Complejo Ígneo y Metamórfico de la Cordillera Central y la Serranía de San Lucas.

Figura 3).

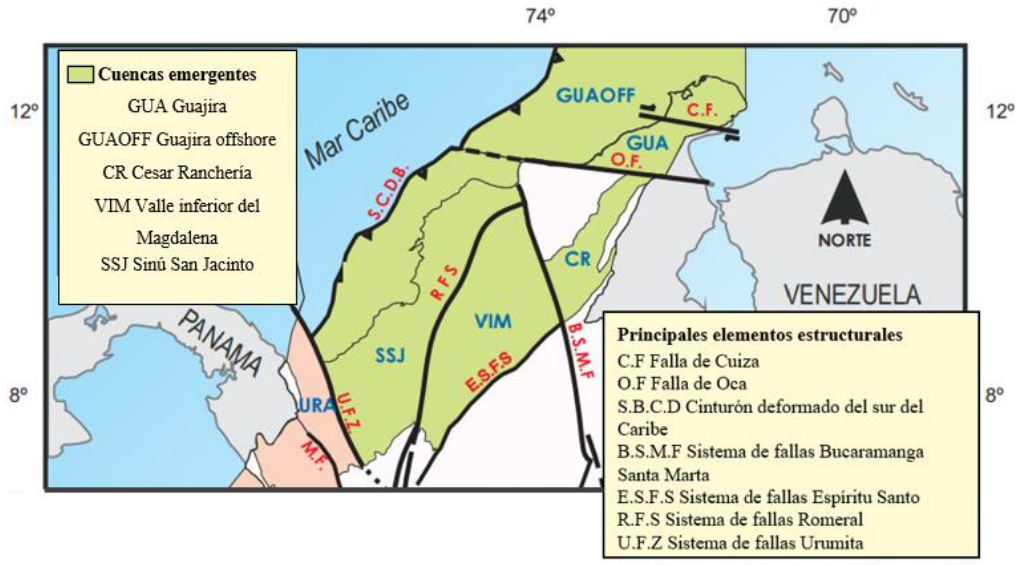
4.2 Tectónica y geología regional

Colombia está afectada tectónicamente por la interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramericana, lo que dio paso a estructuras regionales que desempeñan un papel crucial en la configuración y la dinámica de las cuencas emergentes. Se evidencia que las cuencas emergentes tienen un alto control estructural y por lo tanto su delimitación se puede expresar en términos de fallas regionales, como se muestra en la Figura 3.

La Cuenca Cesar-Ranchería está limitada hacia el NW por la Sierra Nevada de Santa Marta y al SE por la Serranía de Perijá, ambas con presencia de rocas pre-cretácicas. Esta cuenca posee una orientación N30°E y ha sido dividida en las subcuencas de Cesar al sur y Ranchería al norte, separadas por el alto de Verdesia, e incluye parcialmente los departamentos de Cesar y de LaGuajira. La cuenca de Sinú-San Jacinto se encuentra al NW del país y limita al sur con la Cordillera Occidental. Las cuencas Guajira y Guajira Offshore se ubican en el extremo norte de Colombia y están afectadas por las fallas regionales de Cuiza y Oca (Tabla 1). La Cuenca del Valle Inferior del Magdalena está compuesta por las depresiones de Plato y San Jorge separadas por el Arco de Magangué y limita al suroriente con el Complejo Ígneo y Metamórfico de la Cordillera Central y la Serranía de San Lucas.

Figura 3

Mapa de localización de las cuencas emergentes colombianas.



Nota. Ubicación y límites de las cuencas emergente colombianas. Modificado de ANH (2011).

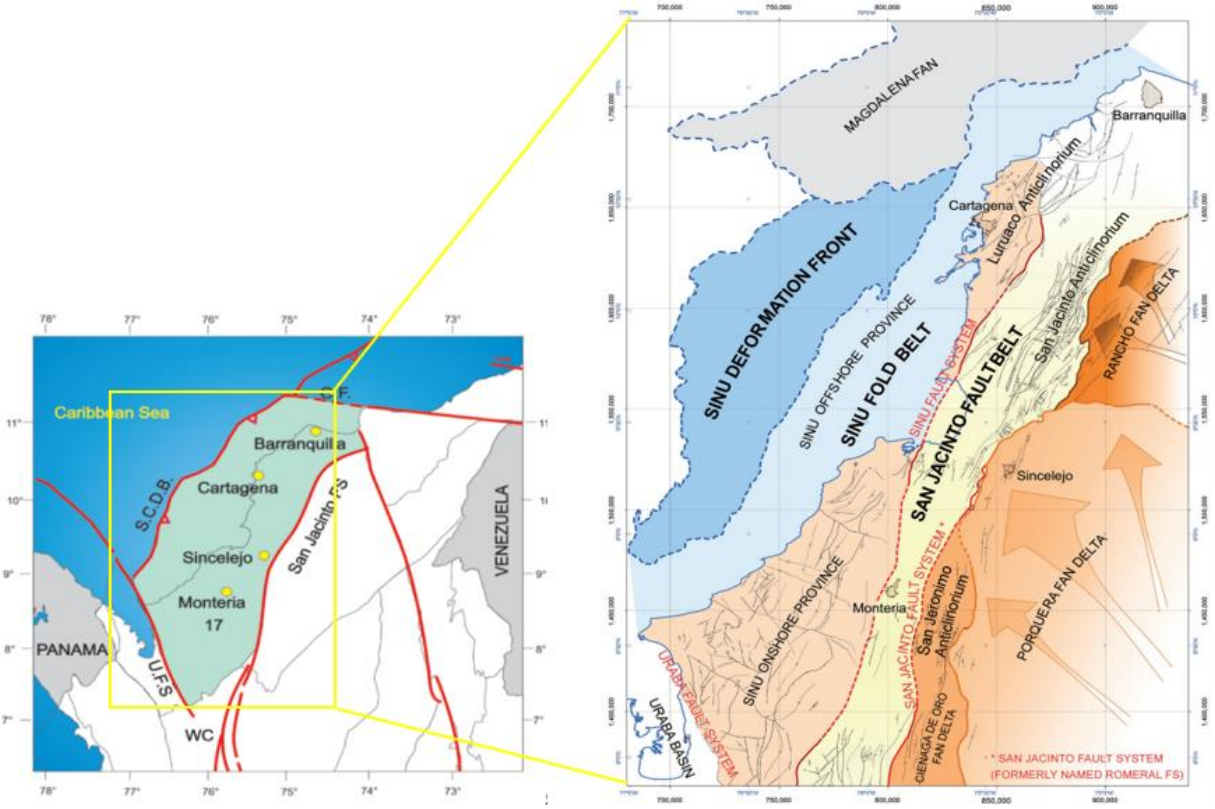
La Cuenca Sinú-San Jacinto, la cual es objeto de este trabajo, está ubicada en el extremo NW de Colombia (Figura 3), limita al este con el sistema de fallas de Romeral, al norte con la Falla de Oca, al noroeste con el frente de deformación del Cinturón de Deformación del Caribe Sur, al suroeste con el sistema de fallas de Uramita, y al sur con las rocas sedimentarias y volcánicas cretácicas de la Cordillera Occidental.

Basándose en la cartografía existente, la Cuenca Sinú-San Jacinto puede subdividirse en dos áreas principales conocidas como el Cinturón plegado del Sinú al oeste y el Cinturón fallado de San Jacinto al este. El lineamiento del Sinú representado de sur a norte por la Falla

del Sinú separa las rocas del Cretácico Superior y el Paleoceno del Cinturón de Fallas de San Jacinto de las rocas del Mioceno del Cinturón Plegado del Sinú (Figura 4) (Aguilera, 2011).

Figura 4

Mapa de localización de la Cuenca Sinú-San Jacinto y provincias geológicas de la cuenca



Nota. A. La cuenca emergente Sinú-San Jacinto resaltada en verde se encuentra al norte del país en el caribe colombiano B. Provincias geológicas de la cuenca: Cinturón plegado del Sinú y Cinturón fallado de San Jacinto. La frontera entre ambas está representada en el mapa geológico por la línea continua y discontinua roja. Tomado de Aguilera (2011) y Cediel (2011).

En la Tabla 1 se sintetiza la información relevante sobre el área, límites y tectónica de cada una de las cuencas emergentes en Colombia:

Tabla 1

Cuencas emergentes de Colombia: Área, Límites Geográficos y Contexto Tectónico.

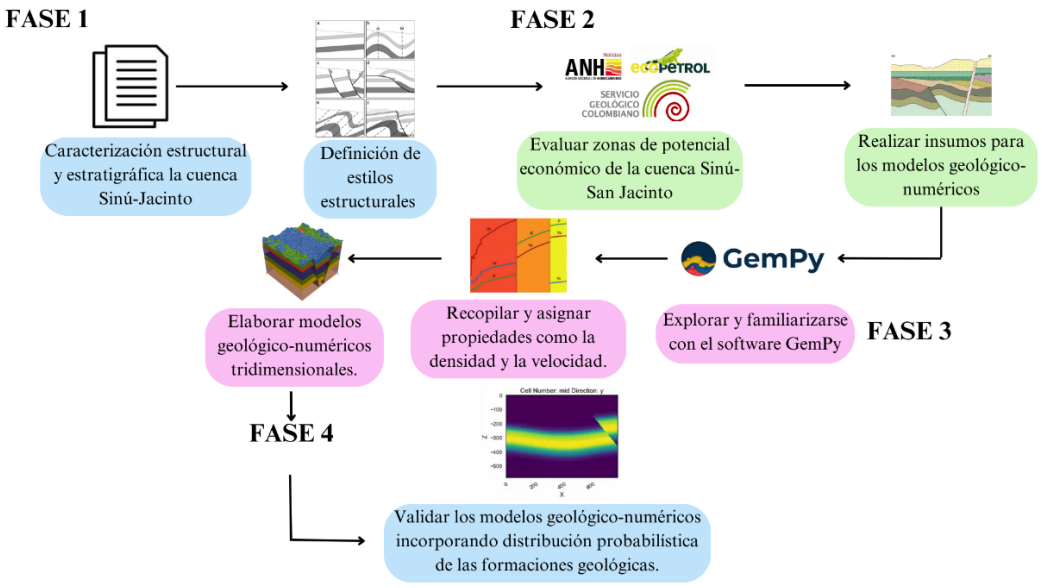
Cuenca emergente	Área km^2	Límites estructurales	Tectónica
Guajira (GUA)	66,639	Al norte la falla de Cuiza y al sur la falla de Oca.	Migración de la placa Caribe a lo largo de la placa suramericana, esto dio origen a las fallas de rumbo de Cuiza y Oca, las cuales tienen componente dextral. Las fallas generaron los altos de Cocinas,Jarara y Macuira que se encuentran ubicados al N de la cuenca; así como los depocentros Chimare, Cocinetas y Portete, estos depocentros tienen fallas normales con dirección NW-SE (UPME, 2018).
Guajira offshore (GUAOFF)		Limita al este con el cinturón deformado del sur del Caribe.	Se interpreta una tectónica diferencial en lo que se denomina el frente de deformación, principalmente asociado a los movimientos entre las placas Caribe y Sudamericana, con menor relevancia se identifican procesos de subducción lateral con edades recientes (Mioceno Superior al reciente). Se han identificado múltiples procesos superpuestos de generación de rocas basales que afectan estructural y estratigráficamente a la secuencia sedimentaria (ANH, 2011).
Cesar – Ranchería (CR)	11,668	Falla de Oca al norte y el sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta al oeste.	Un régimen compresivo en el cretácico inicia la formación de la cuenca antepaís de Cesar-Rancheríay el levantamiento de la Serranía del Perijá debido a la inversión de fallas normales rompiendo con losatajos de bajo ángulo de las principales fallas inversas, generando pliegues de propagación (UPME, 2018).
Valle Inferior del Magdalena (VIM)	38,017	Al noreste por el sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta, al sureste el sistema de fallas Espíritu santo y al oeste por el sistema de fallas Romeral.	Estructura de basamento: Asociada a bordes convergentes, registran los procesos transtensivos de lacordillera central. Sub-cuencas Plato y San Jorge: Tienen su origen en los procesos extensivos que sufrió al CordilleraCentral, lo que también produjo fallas normales y una cuenca transtensiva sobre fallas de desgarre. Zona de Fallas de San Jacinto: producto de esfuerzos transpresivos que produjeron la inversión de fallasnormales y retrocabalgamientos (UPME, 2018).
Sinú – San Jacinto(SSJ)	69,221	Sistema de fallas de Uramita al suroeste y sistema de fallas Romeral al este.	El alto exterior (prisma de acreción antiguo) en costa afuera caracterizado por fallamiento normal, pliegues de crecimiento y diapirismo de lodo, incluye el sector más hacia el este de la Cuña de Acreciónde l Sinú-Colombia y el cinturón plegado de San Jacinto, de edad Cretácico Superior a Mioceno Medio. Un sistema de fallas imbricado con vergencia hacia el mar que se desarrolla en el frente del prisma por deformación activa y acortamiento que dan un prisma de acreción activo (UPME, 2018).

5. Métodos y herramientas

Con el fin alcanzar los objetivos específicos planteados se llevó a cabo la siguiente metodología dividida en fases:

Figura 5

Metodología establecida para el proyecto actual.



5.1 FASES

5.1.1 *FASE 1: Caracterización estratigráfica y estructural la cuenca Sinú-Jacinto a partir de la información disponible en las bases de datos de libre acceso.*

ACTIVIDAD 1.1. Recopilar información sobre la cuenca Sinú-Jacinto teniendo en cuenta su ubicación, área, tipo de cuenca, ambiente de formación, cartografía e historia geológica.

ACTIVIDAD 1.2. Caracterización de la estratigrafía y la tectónica definiendo los estilos estructurales de la cuenca Sinú-San Jacinto, que incluyen fallas inversas, fallas normales,

pliegues anticlinales, sinclinales, pliegues asimétricos, entre otros.

5.1.2 *FASE 2: Identificar posibles zonas de recursos de interés económico en la cuenca Sinú-San Jacinto con base en la revisión sistemática del estado del arte en el sector energético.*

ACTIVIDAD 2.1. Identificar el potencial energético de la cuenca Sinú-San Jacinto, mediante un análisis del interés económico de posibles recursos naturales presentes, como hidrocarburos, gas y agua subterránea a partir de la información disponible en estudios realizados por la ANH, ECOPETROL, el Servicio Geológico Colombiano, entre otros.

ACTIVIDAD 2.2. Identificar zonas de interés debido a su potencial energético evaluando características geológicas de las formaciones para su posterior incorporación en los modelos geológicos-numéricos.

ACTIVIDAD 2.3. Desarrollar insumos esenciales para los modelos geológicos, como la creación de cortes del subsuelo.

5.1.3 *FASE 3: Construir modelos geológicos-numéricos con herramientas computacionales de libre acceso integrando las características estructurales y estratigráficas de la cuenca Sinú-San Jacinto.*

ACTIVIDAD 3.1. Explorar el software GemPy comprendiendo sus funciones y características principales con el fin de utilizarlo de manera efectiva en la elaboración de modelos que integren aspectos estructurales y estratigráficos de forma rápida y eficiente.

ACTIVIDAD 3.2. Recopilar información de propiedades como la densidad y la velocidad de las ondas S y P, para las secuencias estratigráficas definidas en la actividad 2.2, teniendo

en cuenta los diferentes tipos de roca.

ACTIVIDAD 3.3. Elaborar modelos geológicos-numéricos usando el software GemPy. Se incluirán diferentes escenarios que simulan configuraciones geológicas representativas de acuerdo con la complejidad estructural (fallas, capas inclinadas y pliegues) y estratigráfica (variaciones laterales o cambios de facies) para el análisis la cuenca.

5.1.4 *FASE 4: Validar los modelos geológico-numéricos incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas*

ACTIVIDAD 4.1. Analizar las distribuciones de probabilidad más apropiadas para modelar la distribución de las capas geológicas.

ACTIVIDAD 4.2. Realizar diferentes experimentos que permiten verificar la aplicabilidad y precisión del modelo en relación con las distribuciones probabilísticas. Esto permitirá evaluar cómo la incertidumbre influye en la estructura y las interpretaciones del modelo.

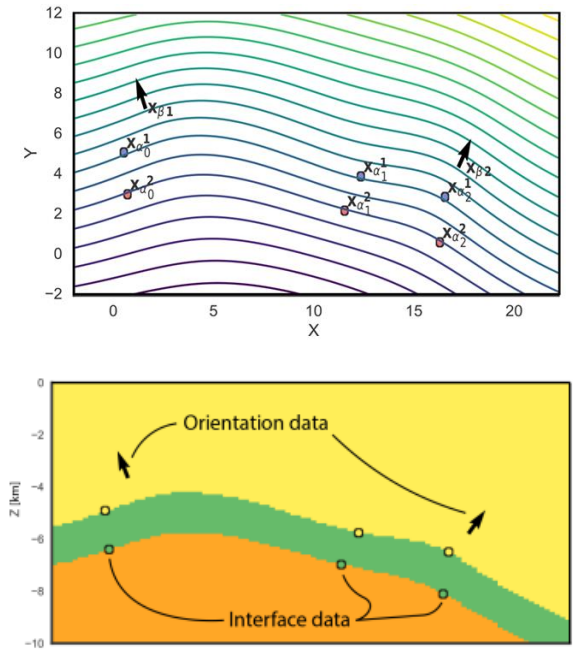
5.2 Funcionamiento de GemPy

GemPy utiliza técnicas de interpolación, como kriging, para calcular el campo escalar (parámetro adimensional) en función de los datos de entrada (puntos de superficie, fallas, etc.), esto significa que se interpola entre los puntos conocidos para estimar valores en ubicaciones desconocidas dentro del modelo. Un campo escalar (Figura 6) es una función de varias variables en las que a cada punto de su dominio se le asigna un valor (una magnitud) y es un concepto clave porque permite representar la continuidad y los cambios graduales de las propiedades geológicas en el subsuelo. Se construye con una función de interpolación $\mathbf{Z}(\boldsymbol{x}_0)$ donde $\boldsymbol{x}$ es cualquier punto en el espacio continuo tridimensional $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$, que

describe el dominio D como un campo escalar. Para caracterizar el campo escalar en la interpolación se utilizan dos tipos de parámetros: (i) los puntos x de la interfaz de capa que describen las respectivas isosuperficies de interés, normalmente la interfaz entre dos capas; y (ii) los gradientes del campo escalar, x, o en términos geológicos, polos de la capa, es decir, vectores normales al plano de buzamiento. Por lo tanto, los gradientes estarán orientados perpendicularmente a las isosuperficies y pueden situarse en cualquier lugar del espacio. El gradiente del campo escalar seguirá la orientación plana de la estratigrafía en todo el volumen o, en otras palabras, cada posible isosuperficie del campo escalar representará cada deposición de la capa (de la Varga et al., 2019).

Figura 6

Campo escalar



Nota: Ejemplo de campo escalar. Los datos de entrada están formados por seis puntos distribuidos en dos capas (X^1_α y X^2_α) y dos orientaciones ($X_{\beta 1}$ y $X_{\beta 2}$). Una isosuperficie conecta los puntos de la interfaz y el escalar f es perpendicular al gradiente de foliación.

Es decir, para realizar el modelado geológico, GemPy necesita dos conjuntos de datos de entrada (Figura 7): el primero incluye coordenadas 3D (x, y, z) que definen los límites entre diferentes elementos geológicos, como interfaces de capas, planos de fallas y discontinuidades. El segundo conjunto contiene las orientaciones de los polos, las cuales son perpendiculares al buzamiento de las superficies en cualquier punto del espacio 3D (de la Varga et al., 2019).

Figura 7

Datos de entrada.

A

```
X,Y,Z,formation
3005.1964,0,-4527.5628,El Floral
3585.0031,0,-4445.5811,El Floral
4335.1494,0,-4317.1249,El Floral
3010.2055,0,-5187.9001,San Cayetano
3635.1513,0,-5236.4677,San Cayetano
4534.3788,0,-5236.4677,San Cayetano
5881.4840,0,-4750.7922,San Cayetano
```

B

```
X,Y,Z,azimuth,dip,polarity,formation
5701.2047,0,-4389.3996,90,80,1,Falla1
8095.5429,0,-4710.3246,270,60,1,Falla2
6331.7044,0,-3275.0949,90,0,1,El Floral
7966.1881,0,-2841.6512,90,30,1,Fm1
6772.6116,0,-4932.2247,90,27,1,San Cayetano
6714.1660,0,-5959.1398,90,22,1,Cansona
5800.3589,0,-5236.4677,90,0,1,San Cayetano
```

Nota: A) Datos necesarios para definir la superficie de cada formación en el espacio 3D. B) Datos de orientaciones para cada superficie incluyendo planos de falla.

Esta información (X, Y, Z, azimut de buzamiento, ángulo de buzamiento, nombre de la superficie) puede ser obtenida de trabajo de campo, cortes geológicos, y líneas o cubos sísmicos. Para las zonas 1 y 2 se obtuvieron las coordenadas (x, y, z) de los puntos que componen las formaciones geológicas, así como la orientación de los estratos y la falla: rumbo, buzamiento y polo, (necesarios para definir la ubicación tridimensional de la orientación de la estructura geológica en el espacio), haciendo uso de las herramientas de medición de coordenadas y ángulos del software AutoCAD. Teniendo estos datos es posible iniciar el modelo en GemPy. Para esto hay que definir el extent o dominio en el espacio en las direcciones X, Y, Z y la resolución que determina el número de vóxeles.

En los casos donde la configuración geológica incluya fallas y/o discontinuidades, GemPy calcula campos escalares independientes. Es decir, se asignan a diferentes series geológicas y se debe tener en cuenta el orden cronológico de los eventos estratigráficos y estructurales.

6. Resultados

6.1 Estratigrafía y geología estructural de la cuenca Sinú-San Jacinto

6.1.1 *Estratigrafía de la cuenca Sinú San Jacinto*

El Cinturón Plegado de San Jacinto se desarrolló en el Eoceno y consiste principalmente de rocas sedimentarias y volcánicas desprendidas de la placa del Caribe. El Cinturón del Sinú es más joven y consiste en depósitos sedimentarios a lo largo del margen noroccidental de Colombia, incorporados más tarde al prisma de acreción durante el Mioceno (Barrero et al., 2007). A continuación, se describen las principales formaciones geológicas de la cuenca, además la Figura 8 exhibe la columna estratigráfica generalizada de la zona.

6.1.1.1 Cretácico Tardío. La formación más antigua es la Formación Cansona (Ksc), que se encuentra discordante sobre el basamento y consiste en arenitas, lodolitas calcáreas con alto contenido de foraminíferos, cherts y conglomerados dentro de una secuencia transgresiva–regresiva. Con un espesor de 400 m (Alfonso et al., 2009) que se adelgaza hacia el este. El ambiente de depositación de la Formación Cansona ha sido interpretado como un ambiente subóxicos a anoxico que progresivamente se eleva a un ambiente marino proximal (Juliao et al., 2011).

6.1.1.2 Paleoceno temprano. El desarrollo de la cuenca Sinú-San Jacinto está registrado en la Formación Arroyo Seco, con un espesor de 500 m aproximadamente (Bermúdez e Hincapié, 2008). La parte inferior de la Formación Arroyo Seco se correlaciona con la Formación San Cayetano (Pgsc) en el Cinturón de San Jacinto (Alfonso et al., 2009). Corresponde a secuencias granodecrecientes de litoarenitas arcósicas, con intercalaciones menores de lodolitas interestratificadas con arenitas grises, cemento calcáreo, bioturbadas, con abundante yeso y azufre secundario (García et al., 2009).

6.1.1.3 Eoceno medio. Para Guzmán et al., (2004), el límite entre el Eoceno temprano y el Eoceno medio corresponde a un hiato que es representado por una disconformidad entre las formaciones San Cayetano y Maco. Para esta serie, de acuerdo con la estratigrafía, corresponden las Formaciones Maco, Arroyo Seco (Miembro Superior) y Chengue.

Guzmán et al., (2004) describe la Formación Maco, como una secuencia de litoarenitas arkosicas, con algunos fragmentos calcáreos, y fragmentos angulares de calizas y rocas ígneas e intercalaciones de lodolitas.

Alfonso et al., (2009) definió el Miembro Superior de la Formación Arroyo Seco como intercalaciones de capas de litoarenitas con estratificación cruzada, con lodolitas silíceas con laminación paralela y ligeramente ondulada. Este se correlaciona al sur con la Formación Maco.

La Formación Chengue suprayace la Formación Maco. Guzmán et al., (2004) la describen como una serie de calizas bioespariticas con algas y lodolitas calcáreas (margas).

6.1.1.4 Eoceno tardío. En este intervalo, un nuevo aumento relativo del nivel del mar permite el establecimiento de carbonatos y ambientes deltaicos, progradando sobre una plataforma somera (Bermúdez e Hincapié, 2008). Se encuentra representado por una

discordancia regional, que es el contacto entre las formaciones Maco y Maralú (Pgma) en el sur de la cuenca, entre las formaciones Arroyo Seco y Toluviejo en la parte central, y entre las formaciones Chengue y San Jacinto en el norte.

En el sur de la cuenca está la Formación Maralú (Pgma), que consiste en margas intercaladas con lutitas carbonosas. (Guzmán et al. 2004).

En la parte central de la cuenca se encuentra la Formación Toluviejo del Oligoceno temprano y las formaciones Ciénaga de Oro - El Floral del Oligoceno tardío (Alfonso et al., 2009). La Formación Ciénaga de Oro, según Guzmán et al., (2004) está constituida por areniscas, limolitas, pizarras ligeramente calcáreas, esquistos carbonosos y carbón, con un espesor de 300 - 1000 m (Bermúdez e Hincapié, 2008). Alfonso et al., (2009) definió la Formación El Floral, en su base, como litoarenitas con cemento calcáreo, y limolitas. Hacia el techo, la unidad se hace más lodosa y calcárea con yeso. Esta formación tiene un espesor de 150m (Bermúdez e Hincapié, 2008).

En la parte norte, se encuentra la Formación San Jacinto (Pgsj) y las formaciones Arjona y Carmen. La Formación San Jacinto en su parte inferior consta de capas gruesas de areniscas cuarzosas sub-arcosicas, y hacia arriba de conglomerados con fragmentos de lodolitas ferruginosas y calcáreas, granito y pórfidos, clastos de caliza, cuarzo lechoso y chert (Guzmán et al., 2004). El estimado del espesor de esta formación con base en cortes geológicos varía entre 300 y 400 m (Barrera et al., 2001) .

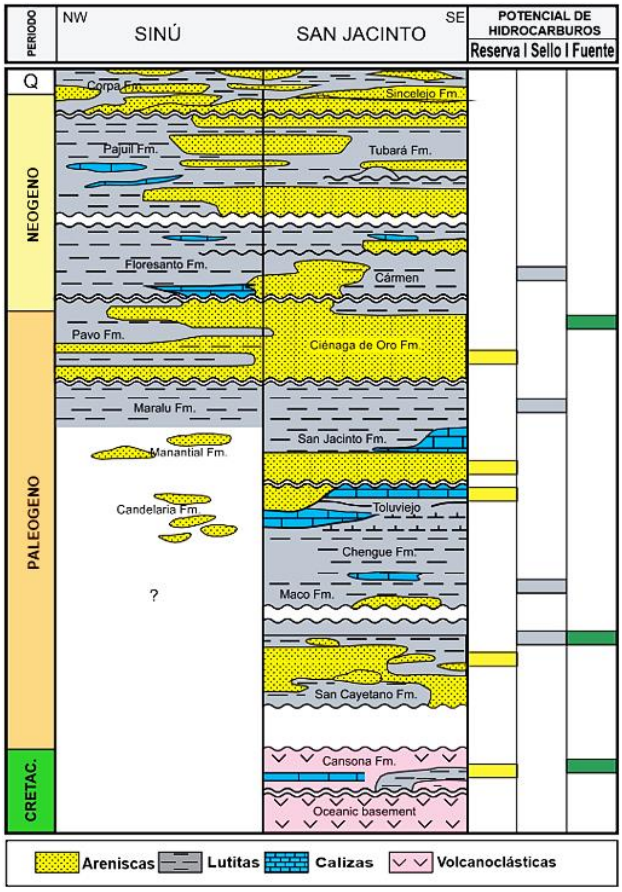
6.1.1.5 Mioceno temprano a medio. En este intervalo, al sur de la cuenca, de W a E, están las Formaciones Pavo (Ngp) y Floresanto (Ngf) en el cinturón del Sinú y Porquera en el Cinturón de San Jacinto.

La Formación Pavo en su parte inferior presenta areniscas líticas, con cemento calcáreo, intercalada con lutitas y turbas; y en la parte superior, hay lutitas y niveles arenáceos a la base. Se estima que ésta puede tener cerca de 4.000 m de espesor (INGEOMINAS, 2003). Se correlaciona al este con la Formación Floresanto (Ngf), la cual hacia su base contiene areniscas ligeramente calcáreas, granodecrecientes; y hacia el tope se encuentran capas de lutitas intercaladas con limolitas calcáreas y areniscas líticas. Esta unidad se depositó en un ambiente marino en profundidades batiales (Aguilera, 2011) y tiene un espesor de 1200m (INGEOMINAS, 2003).

6.1.1.6 Mioceno tardío a Plioceno. Bermúdez e Hincapié (2008) describen la progradación de los ambientes de costa y facies arenáceas en el Cinturón plegado de San Jacinto, representando la Formación el Cerrito y sus equivalentes. Así mismo, este periodo representa la inconformidad que pone en contacto la Formación Porquera con la Formación Cerrito, en el Cinturón de San Jacinto, al norte las formaciones Jesús del Monte y Hibácharo con la Formación Tubará y en el área del Sinú las formaciones Pavo y Floresanto con la Formación Pajuil. Al sur de la cuenca del Sinú-San Jacinto incluye de oeste a este: el Pajuil, Morrocoy - El Pantano, Arenas Monas, Corpa y El Cerrito. La parte central incluye la Formación El Cerrito y la suprayacente Formación El Descanso. Al norte, las formaciones Bayunca y Tubará se correlacionan entre sí. La Formación Pajuil con 800 m de espesor, hacia la base contiene areniscas calcáreas intercaladas con lutitas y limolitas con restos de plantas, y hacia el tope es una secuencia lutítica, con areniscas, restos de plantas, moluscos y conchas (Guzmán et al., 2004).

Figura 8

Columna generalizada de cuenca Sinú-San Jacinto



Nota: Tomado de Barrero et al. (2007).

6.1.2 *Sistema petrolífero*

En la cuenca Sinú – San Jacinto hay manifestaciones importantes de hidrocarburos representadas por campos y emanaderos de aceite y gas. La mayoría han sido clasificadas como termogénicas; y todas las evidencias indican la existencia de sistemas petrolíferas activos. A su vez, en la cuenca Sinú – San Jacinto se presenta el mayor número de manifestaciones de hidrocarburos en superficie del país. Aguilera (2011), define un sistema petrolífero para la subcuenca Sinú y la Subcuenca San Jacinto (Tabla 2).

Tabla 2

Sistemas petrolíferos generalizados de la cuenca Sinú-San Jacinto

	Subcuenca Sinú	**Subcuenca San Jacinto**
Trampas	Pliegues y fallas inversas con truncamientos estratigráficos	Anticlinales, fallas inversas, truncamiento.
Roca Sello	Fm. Maralú y Porquera (Arcilla)	Fm. Ciénaga de Oro, Porquera, El Carmen, Tubará (Lodolitas)
Roca Reservorio	Fm. Pavo (Areniscas), Pajuil y Floresanto	Fm. San Jacinto, Maco y San Cayetano (Areniscas)
Roca Fuente	Fm. Floresanto y Fm. Maralú (shales)	Fm. Cansona (Lutitas)

Nota: Fm (Formación)

6.1.2.1 Sistema petrolífero del Cinturón plegado del Sinú

6.1.2.1.1 ***Roca generadora.*** Las rocas que pueden considerarse generadoras en esta cuenca son los shales de la Formación Floresanto, formados en ambientes de gran profundidad durante el Mioceno Temprano a Medio, y los shales de la Formación Maralú del Oligoceno (Sánchez y Permanyer, 2006).

6.1.2.1.2 ***Roca reservorio.*** Corresponde a niveles arenosos pertenecientes a la Formación Pavo (Oligoceno) al occidente; las areniscas de San Rafael y Pavo en la

Formación Floresanto en el este; algunas areniscas de la Formación Pajuil y, potencialmente, conglomerados y areniscas de la parte basal de la Formación Manantial (Caro y Rey, 2009).

6.1.2.1.3 ***Roca sello.*** Las arcillas marinas del Cenozoico de las Formaciones Maralú y Porquera pueden actuar como sellos para las acumulaciones de hidrocarburos.

6.1.2.1.4 ***Trampas.*** Las trampas están asociadas con fallas de empuje a lo largo del prisma de acreción; pliegues y fallas inversas con truncamientos estratigráficos de los yacimientos en contra de diapiros, y truncamientos relacionados con discordancias sindeposicionales causadas por deformaciones asociadas con el desplazamiento vertical de diapiros de lodo.

6.1.2.2 Sistema petrolífero del Cinturón fallado de San Jacinto

6.1.2.2.1 ***Roca generadora.*** La principal roca generadora de la cuenca es la Formación Cansona (Campaniano Maastrichtiano), compuesta por lutitas negras, limolitas y calizas. La roca fuente secundaria corresponde a algunos niveles lodosos y calcáreos de las Formaciones Ciénaga de Oro (Mioceno Superior) y Porquera (Mioceno).

6.1.2.2.2 ***Roca reservorio.*** Las principales rocas de reservorio son areniscas cenozoicas de origen deltaico-marino de las Formaciones San Jacinto (Oligoceno), Maco (Eoceno) y San Cayetano (Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano), y localmente calizas fracturadas del Oligoceno de la Formación Toluviejo (Marin, 2010).

6.1.2.2.3 ***Roca sello.*** Las facies lodosas de la Formación Ciénaga de Oro (Oligoceno Tardío) presentan buenas condiciones como roca sellante, al igual que las Formaciones Porquero (Mioceno Medio), El Carmen (Oligoceno) y Tubará (Mioceno Tardío).

6.1.2.2.4 ***Trampas.*** En la cuenca se pueden identificar varios tipos de trampas: pliegues relacionados con el prisma de acreción con la formación de anticlinales en sistemas

imbricados de fallas que convergen hacia el noreste; pliegues relacionados con diapiros de lodo en la parte sur de la cuenca; trampas estratigráficas relacionadas con unidades arenosas que se agotan ubicadas en el prisma de acreción; trampas estratigráficas relacionadas con el truncamiento producido por ciclos repetidos de levantamiento y sedimentación sufridos por la cuenca.

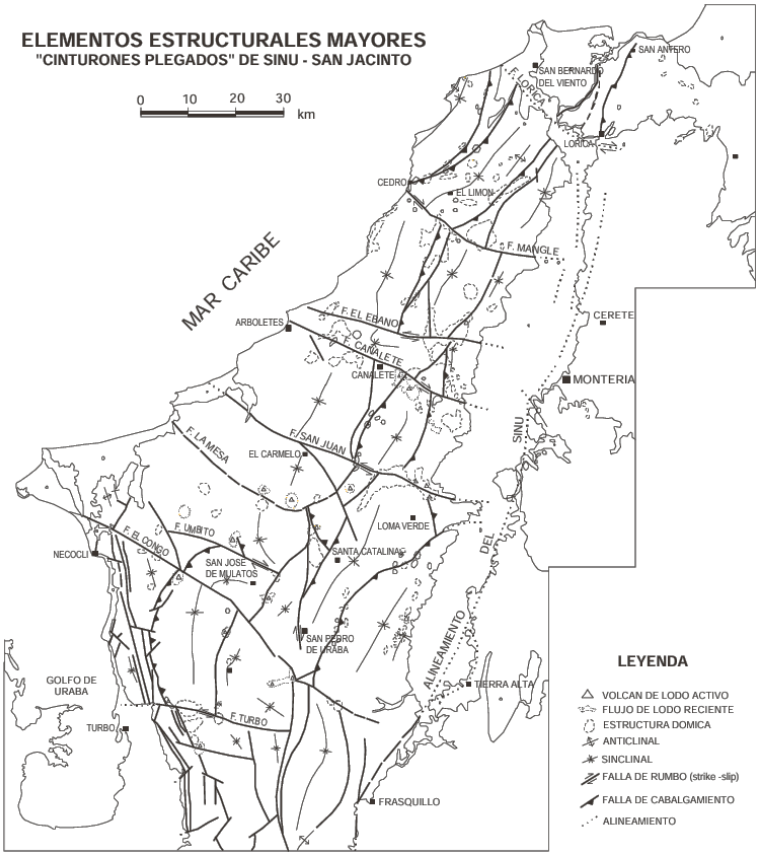
6.1.3 *Geología estructural de la cuenca Sinú San Jacinto*

6.1.3.1 Estilos estructurales. Estructuralmente la región estudiada está definida por un sistema conjugado de fallas de rumbo (strike slip) y cabalgamientos (thrusts) (Figura 9). Las primeras tienen una orientación preferencial que varía aproximadamente de EW a SE-NW (Figura 9). La dirección de movimiento de estas estructuras alterna sucesivamente entre sinestral y dextral, a la vez que delimitan grandes bloques con desplazamientos laterales en direcciones aproximadas NW y SE. Dentro de cada uno de los bloques formados por las fallas de rumbo se desarrollan fallas de cabalgamiento cuyos planos buzan generalmente hacia el SE, y en algunas localidades presentan retrocabalgamientos (backthrust) con convergencia al este.

Dentro de los grandes bloques se desarrollan amplios sinclinales, aparentemente simétricos, delimitados en sus flancos por fallas longitudinales, principalmente cabalgamientos (INGEOMINAS, 2003).

Figura 9

Elementos estructurales mayores de Sinú - San Jacinto.



Nota. Elementos estructurales mayores de la cuenca Sinú - San Jacinto. En rojo se observa al sur la Falla turbo y al norte la Falla Lorica. Tomado de INGEOMINAS, (2003).

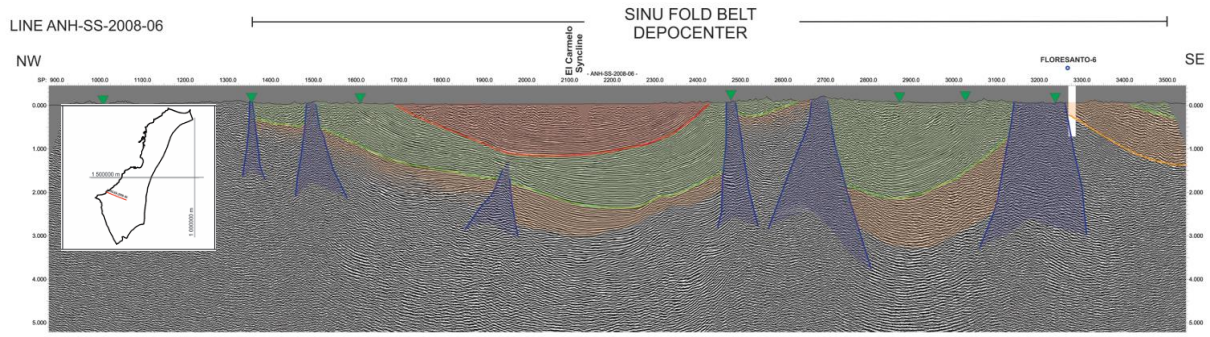
6.1.3.1.1 Cinturón plegado del Sinú. En la parte onshore de la SFB (Sinú Fold Belt) las estructuras tienen una orientación predominante NNE-SSW, y en la parte meridional cerca del sistema de fallas de Uramita, las tendencias estructurales cambian a una tendencia general N-S.

En general, el estilo estructural de esta zona es coherente con el desarrollo de un prisma sedimentario en el Neógeno, evidenciando partición de la cuenca por diapiros de lodo

(Figura 10). Los anticlinales con núcleo de lodo bordean los sinclinales y rompen la secuencia sedimentaria en minicuencas, las cuales tienen forma ovalada en la superficie. En el subsuelo se puede observar el desarrollo de sucesiones sedimentarias ligeramente asimétricas dentro de los sinclinales, con el desarrollo de pliegues de arrastre y estratos de crecimiento con desarrollo progresivo de discordancias sindeposicionales en los flancos de los diapiros de lodo (Aguilera, 2011).

Figura 10

Línea sísmica interpretada, (ANH-SS-2008-06) Cinturón Plegado del Sinú

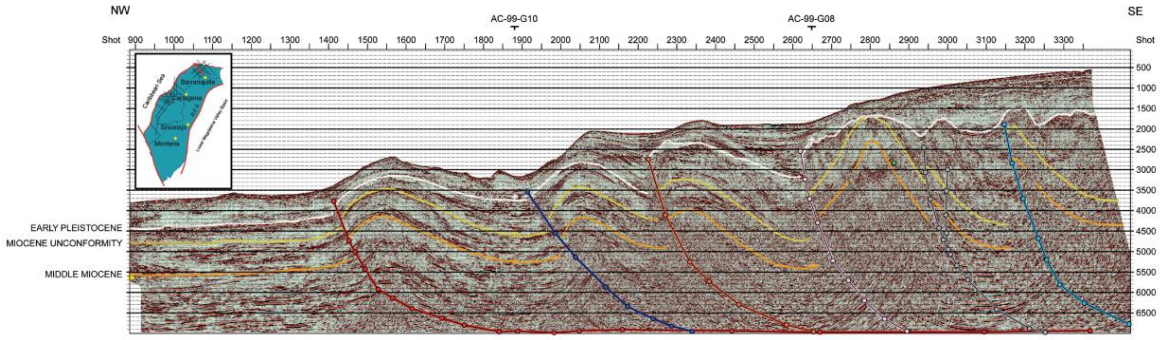


Nota. Línea sísmica interpretada, (ANH-SS-2008-06) que muestra cómo el depocentro del Cinturón Plegado del Sinú en la Provincia de Deformación en Tierra está compartimentado en minicuencas por diapiros de lodo (en azul). Obsérvense las variaciones de espesor en la secuencia estratigráfica y los pliegues de arrastre a los márgenes de los diapiros como resultado de la deformación vertical por diapirismo de lodo. Tomado de Aguilera, 2011.

La siguiente figura muestra la deformación observada en la parte costa afuera del Cinturón plegado del Sinú que muestra el desarrollo de un cinturón de cabalgamiento de pliegues imbricados de propagación de fallas (Figura 11) en el Frente de Deformación del Sinú.

Figura 11

Frente de Deformación del Sinú en el límite norte del Cinturón Plegado del Sinú



Nota. Línea sísmica interpretada del Frente de Deformación del Sinú en el límite norte del Cinturón Plegado del Sinú. Tomado de Aguilera (2011).

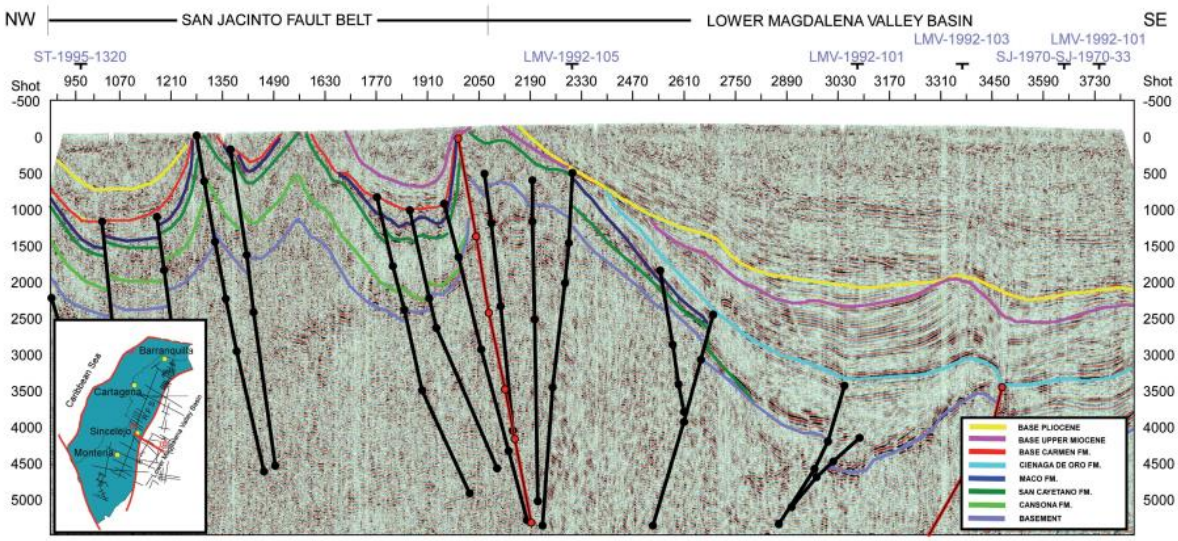
6.1.3.1.2 Cinturón fallado de San Jacinto. Como resultado de la transpresión a lo largo del margen noroccidental de Sudamérica, tres zonas elevadas, no superiores a 700 m, se han desarrollado en el Cinturón de Fallas de San Jacinto, las cuales corresponden a los anticlinorios de Luruaco en el norte, San Jacinto y San Jerónimo. Estas tres serranías se consideran anticlinorios por su complejidad estructural.

Los Anticlinorios de Luruaco y San Jacinto presentan pliegues orientados principalmente NNE-SSW y con una disposición oblicua respecto a las fallas que indica un componente dextral. En la mayoría de los casos, las rocas del núcleo de estas estructuras son de edad Cretácico y Paleógeno. Las fallas observadas en la zona muestran buzamiento NW, con alto ángulo de inclinación y desplazamientos de rumbo dextral (Bermúdez e Hincapié, 2008), las cuales muestran un estilo estructuras de flor positiva (Figura 12).

El anticlinorio de San Jerónimo presenta en la parte norte pliegues y fallas que tienden a estar orientados N-S, mientras que en el sur tienden a estar orientados NNE y NE. Regionalmente, se observa que este anticlinorio se hunde hacia el norte.

Figura 12

Línea sísmica interpretada que cruza la parte sur del anticlinorio de San Jacinto



Nota. Línea sísmica interpretada que cruza la parte sur del anticlinorio de San Jacinto, mostrando el desarrollo del plegamiento causado por fallas inversas oeste y este, estrechamente espaciadas, desarrolladas en un ambiente tectónico transpresivo (estructura de flor positiva). Tomado de Aguilera (2011).

6.1.3.2 Síntesis de estilos estructurales. En la siguiente tabla se sintetizan los estilos estructurales de las provincias geológicas de la cuenca Sinú San Jacinto.

Tabla 3

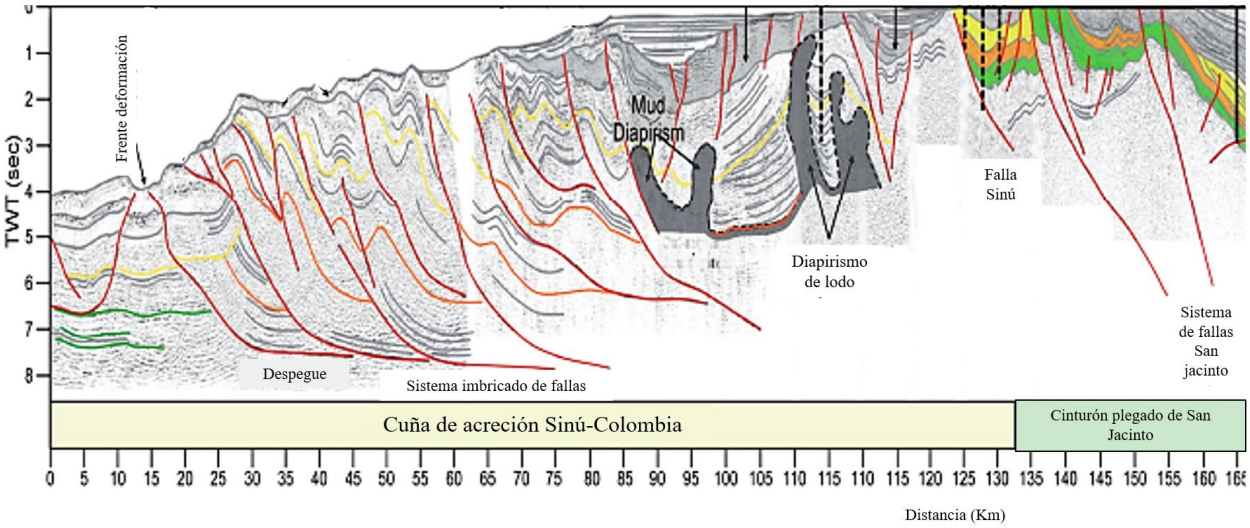
Resumen de estilos estructurales del Cinturón fallado de San Jacinto y del cinturón plegado del Sinú.

Cinturón plegado del Sinú	
División de la cuenca debido a la presencia de diapiros de lodo. Los anticlinales, con núcleo de lodo, delimitan los sinclinales y causan la interrupción de la secuencia sedimentaria formando pequeñas cuencas.	Cinturón de cabalgamiento de pliegues imbricados de propagación de fallas.
Cinturón fallado de San Jacinto	
El área de San Jacinto presenta principalmente un sistema imbricado de fallas inversas con vergencia al oeste, que converge en profundidad a una zona de despegue profunda.	Pliegues anticlinales que involucran las formaciones San Cayetano y Cansona.

La Figura 13 muestra un corte regional en la cuenca Sinú San Jacinto, destacando las estructuras geológicas presentes. Se pueden observar cinturones el Cinturón plegado del Sinú y el Cinturón fallado de San Jacinto, cada uno con sus estilos estructurales característicos. Esta visualización es fundamental para comprender las diferencias y similitudes en los patrones estructurales de cada cinturón, proporcionando una perspectiva valiosa sobre la dinámica geológica de la región.

Figura 13

Perfil geosísmico y diagrama estructural de los dominios tectónicos de la cuenca Sinú - San Jacinto



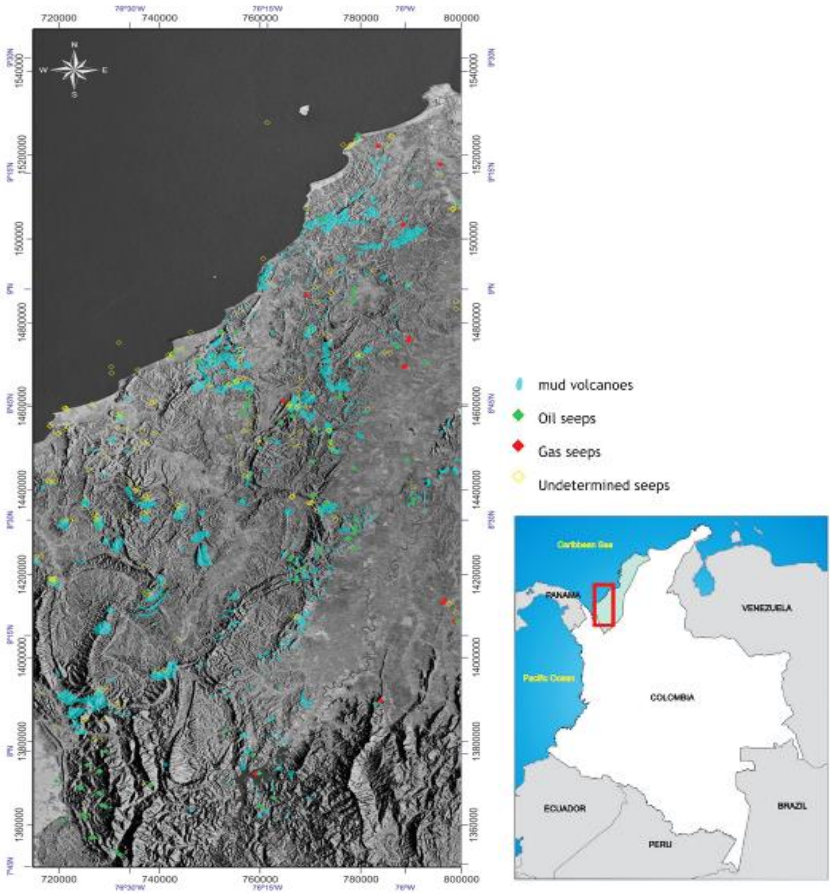
Nota: Perfil geosísmico y diagrama estructural de los dominios tectónicos de la cuenca Sinú - San Jacinto mostrando empujes y pliegues relacionados, fallas y diapiros de lodo. Tomado de Aguilera (2011).

6.1.4 Potencial de Hidrocarburos

La división de la cuenca debido a los diapiros de lodo mencionados anteriormente da lugar a la formación de los amplios sinclinales y estrechos anticlinales en los que la presencia generalizada de volcanes de lodo y filtraciones de petróleo y gas han sido cartografiados (Figura 14).

Figura 14

Distribución de filtraciones de petróleo, filtraciones de gas e indeterminadas de SFB



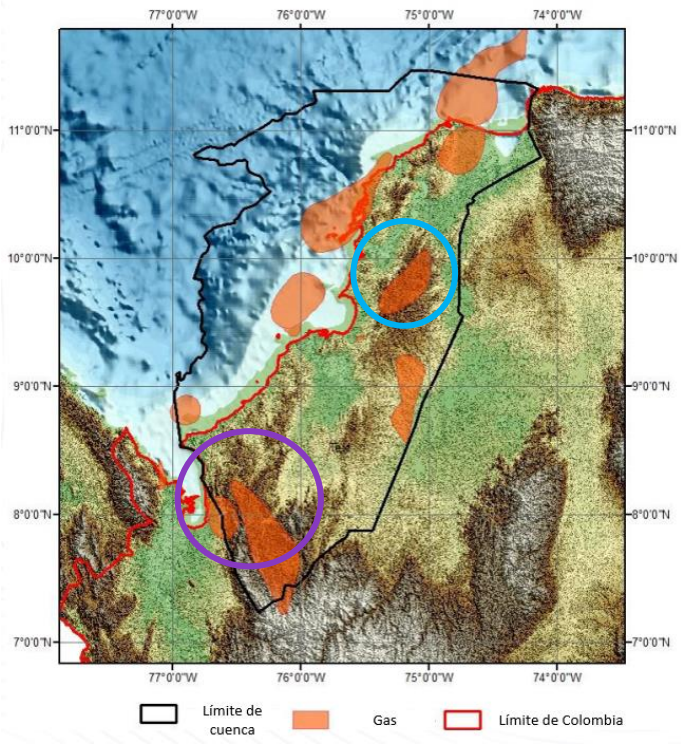
Nota. Imagen de radar de la Provincia Onshore del Cinturón Plegado del Sinú, mostrando la amplia distribución de filtraciones de petróleo (rombos verdes), filtraciones de gas (rombos rojos) y filtraciones indeterminadas (rombos amarillos) con los márgenes de amplios sinclinales. (rombos rojos) y rezumaderos indeterminados (rombos amarillos) con los márgenes de amplios sinclinales bordeados por diapiros de lodo y volcanes cartografiados en superficie (zonas azul claro). Tomado de Aguilera, 2011.

6.1.5 Potencial de shale gas

En un informe suministrado por el Servicio Geológico Colombiano (2016), se han propuesto las áreas de interés de exploración de hidrocarburos no convencionales para shale gas en la cuenca Sinú-San Jacinto (Figura 15). Este fue resultado del procesamiento de las señales magnéticas y gravimétricas.

Figura 15

Mapa de áreas de Interés Shale-Gas cuenca Sinú - San Jacinto.



Nota. Áreas Interés Shale-Gas cuenca Sinú - San Jacinto. Tomado de Camacho (2016).

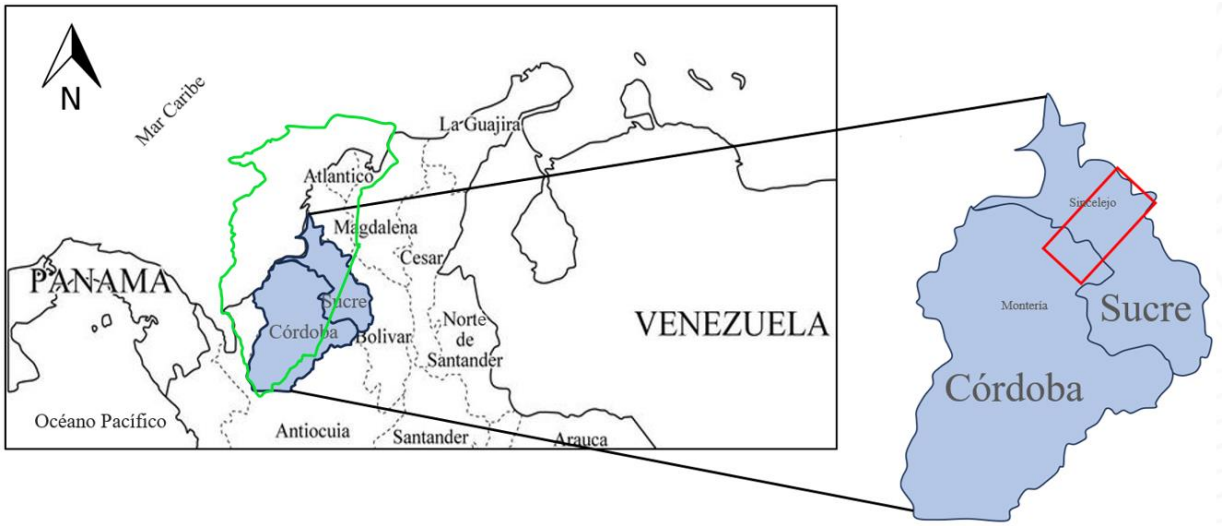
6.1.6 Potencial de agua subterránea

La cuenca Sinú-San Jacinto abarca los extremos septentrionales de los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre, Bolívar, Magdalena y todo el departamento del Atlántico, y en esta se destaca la presencia de sedimentos recientes (depósitos eólicos, de playa y sedimentos fluviales), y rocas sedimentarias consolidadas y poco consolidadas de origen continental a marino. Los sedimentos recientes dan lugar a acuíferos libres con permeabilidad primaria, las rocas de origen continental y marino conforman acuíferos de libres a confinados con porosidad primaria a secundaria.

El acuífero de Morroa está ubicado entre los departamentos de Sucre y Córdoba, en la cuenca Sinú-San Jacinto (Figura 16). Este acuífero constituye la única fuente de abastecimiento de agua potable asequible, de la cuál de abastecen más de quinientos mil (500.000) habitantes de las zonas urbanas y rurales de los municipios Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Corozal, San Juan de Betulia, Sincelejo y Sampués. La red hidrográfica del área está conformada por un sistema de corrientes superficiales temporales (solo llevan agua en épocas de lluvia).

Figura 16

Localización general del Acuífero Morroa



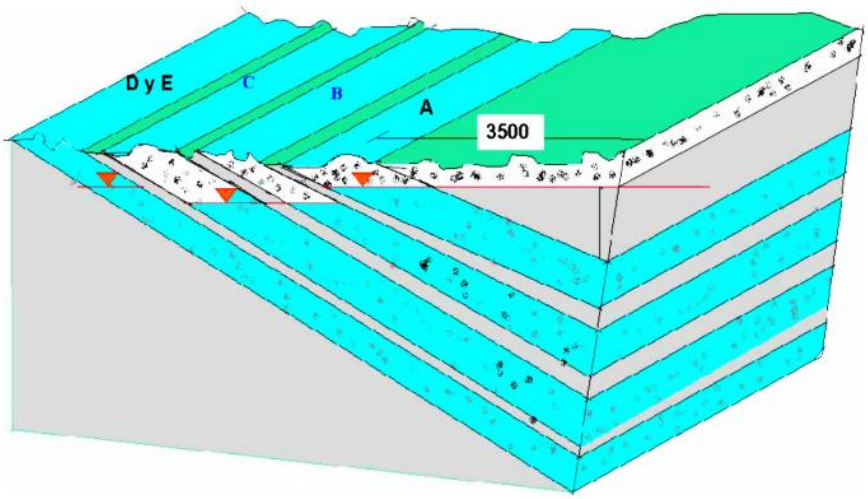
Nota: El polígono verde muestra el límite de la cuenca Sinú-San Jacinto y el polígono rojo el límite del acuífero Morroa respectivamente. Modificado de Donado et al. (2002).

El Miembro Sincelejo Superior o Miembro Morroa es una secuencia continental predominantemente arenosa con intercalaciones de areniscas medias a gruesas, conglomerados y arcillolitas. Se extiende como una franja continua de más de 5 km de ancho y 60 km de largo con dirección N10E, que atraviesa prácticamente todo el departamento de Sucre. El acuífero es complejo, continuo y de extensión regional, constituido por capas semiconfinadas y confinadas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas. Estructuralmente este acuífero se encuentra dispuesto en forma monoclinal con dirección general N25°E y con buzamientos entre 5 y 20° hacia el oriente (Donado et al., 2002) (Figura 17). Cuenta con un espesor variable de hasta 500 m, con

transmisividades de entre 7.5 y 603 m^2/día, conductividades hidráulicas entre 4 y 12 m/día y coeficientes de almacenamiento del orden de 1.1 x 10^{-3} y 1.1 x 10^{-4} (CARSUCRE, 2003).

Figura 17

Esquema del Acuífero Morroa

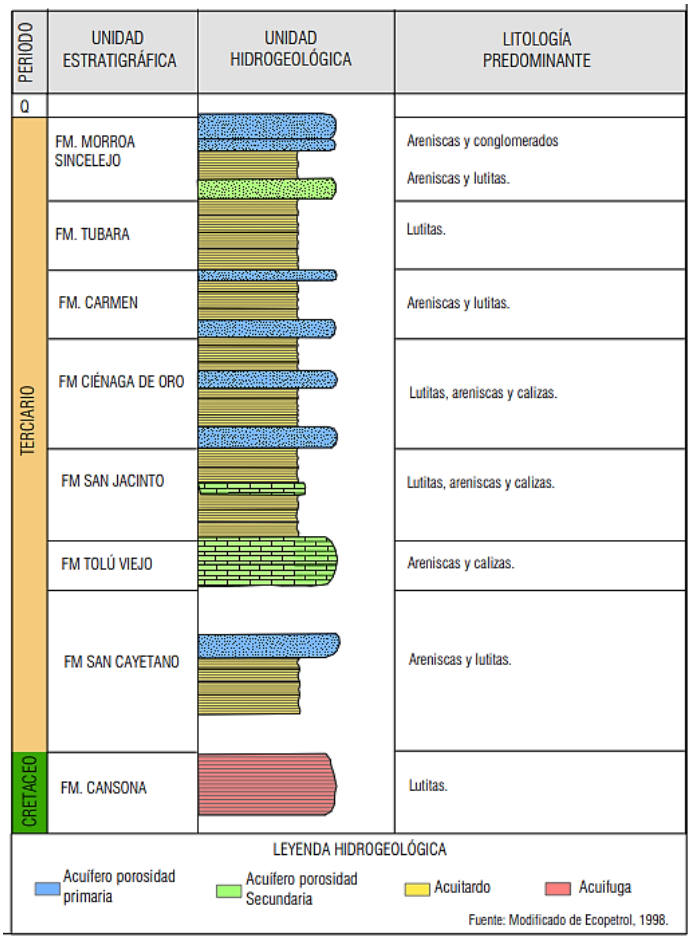


Nota: Tomado de CARSUCRE (2003).

Sin embargo, la Formación Morroa no es la única que puede presentar características que la conviertan en una fuente de agua subterránea. La Formación Ciénaga de Oro presenta acuíferos de porosidad primaria al igual que la Formación San Cayetano, y de porosidad secundaria como la Formación Tolú Viejo (Figura 18).

Figura 18

Columna estratigráfica generalizada de la provincia Sinú-San Jacinto



Nota: Tomado de IDEAM (2010).

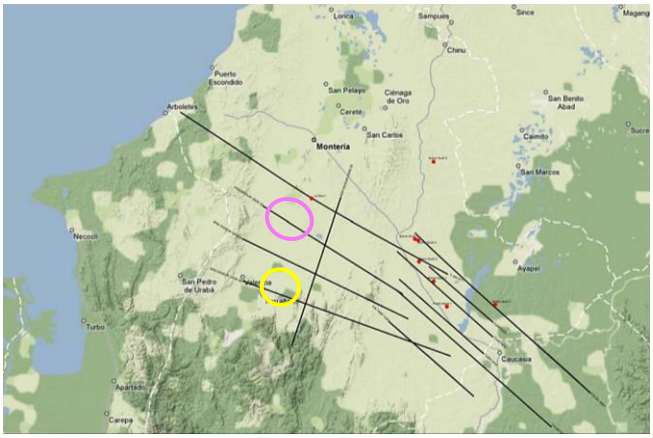
6.2 Zonas de interés energético en la cuenca Sinú-San Jacinto

En el Cinturón de San Jacinto se encuentran dos áreas de interés exploratorio (Figura 19): Manso (Figura 20) y Plaza Hormiga (Figura 21). Son áreas de interés prospectivo asociadas a trampas estructurales (ANH, 2009), las cuales muestran anticlinales fallados, formados en el bloque colgante de fallas inversas, como es el caso de la zona Plaza Hormiga y cierres asociados al bloque yacente de fallas inversas que cortan flancos de sinclinales

someros en la zona de Manso; en las dos áreas la Formación San Cayetano constituye la principal roca almacenadora.

Figura 19

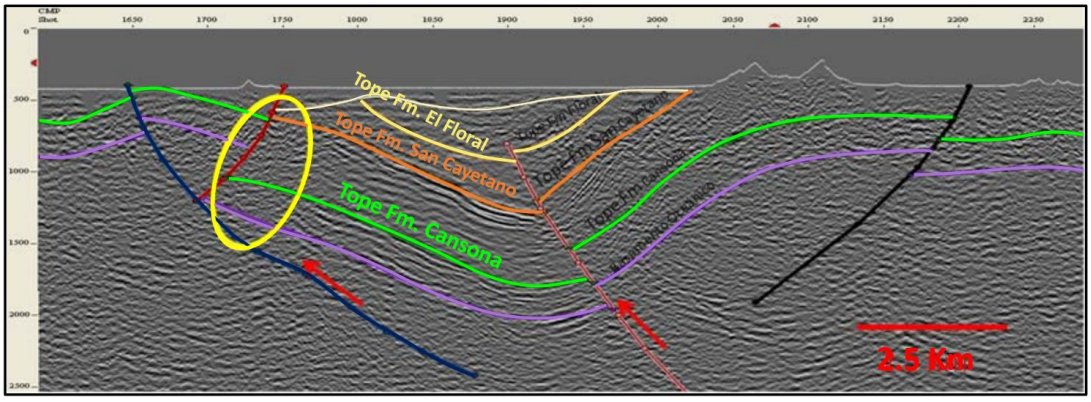
Mapa con líneas sísmicas y pozos utilizados en el proyecto sísmico Sinú sur 2008 y ubicación regional de las zonas de interés



Nota: Se observa en amarillo el área de interés Manso y en rosa el área de interés Plaza Hormiga. Tomado de ANH (2009).

Figura 20

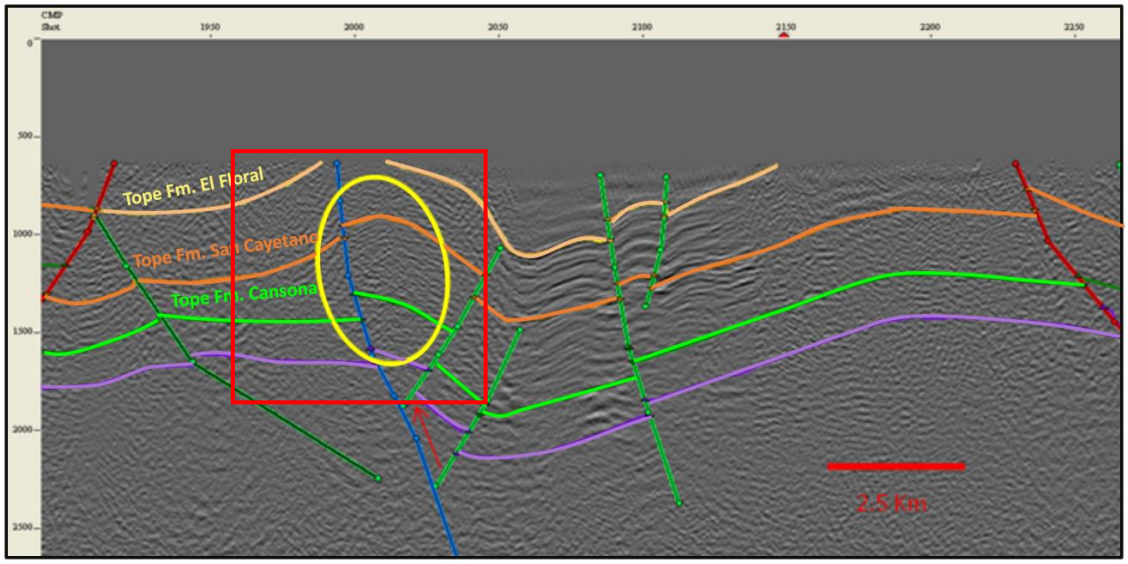
Área de interés Manso



Nota. Sección sísmica ANH-SSSUR-2008-03 El circulo amarillo muestra la zona de interés (Formación San Cayetano) en un flanco del Sinclinal de Manso. Tomado de ANH (2009).

Figura 21

Área de interés Plaza Hormiga



Nota. Sección sísmica L-1984-07. Tomado de ANH (2009).

Se observa que las dos áreas de interés delimitadas en el proyecto sísmico Sinú sur 2008 (Figura 19) se superponen con el área de shale gas delimitado con el polígono morado (Figura 15), lo que tiene sentido ya que allí se encuentra la Formación Cansona que se compone de cherts, shales y calizas y se detectó querógeno tipo I y II (ANH, 2009), los cuales pueden generar tanto petróleo como gas natural.

Aparte de las áreas de las delimitadas en el proyecto mencionado se seleccionaron otras dos (Figura 22) en base al mapa de Distribución de filtraciones de petróleo y gas (Figura 14), al Mapa de áreas de Interés Shale-Gas cuenca Sinú - San Jacinto (Figura 15) y principalmente al Mapa Geológico de Sinú San Jacinto y borde oeste del Valle inferior del Magdalena (Guzmán et al., 2003).

La tercera zona se localiza en el cinturón fallado de San Jacinto donde se encuentra la Formación Cansona (Roca Fuente) y las formaciones San Jacinto y San Cayetano (Rocas

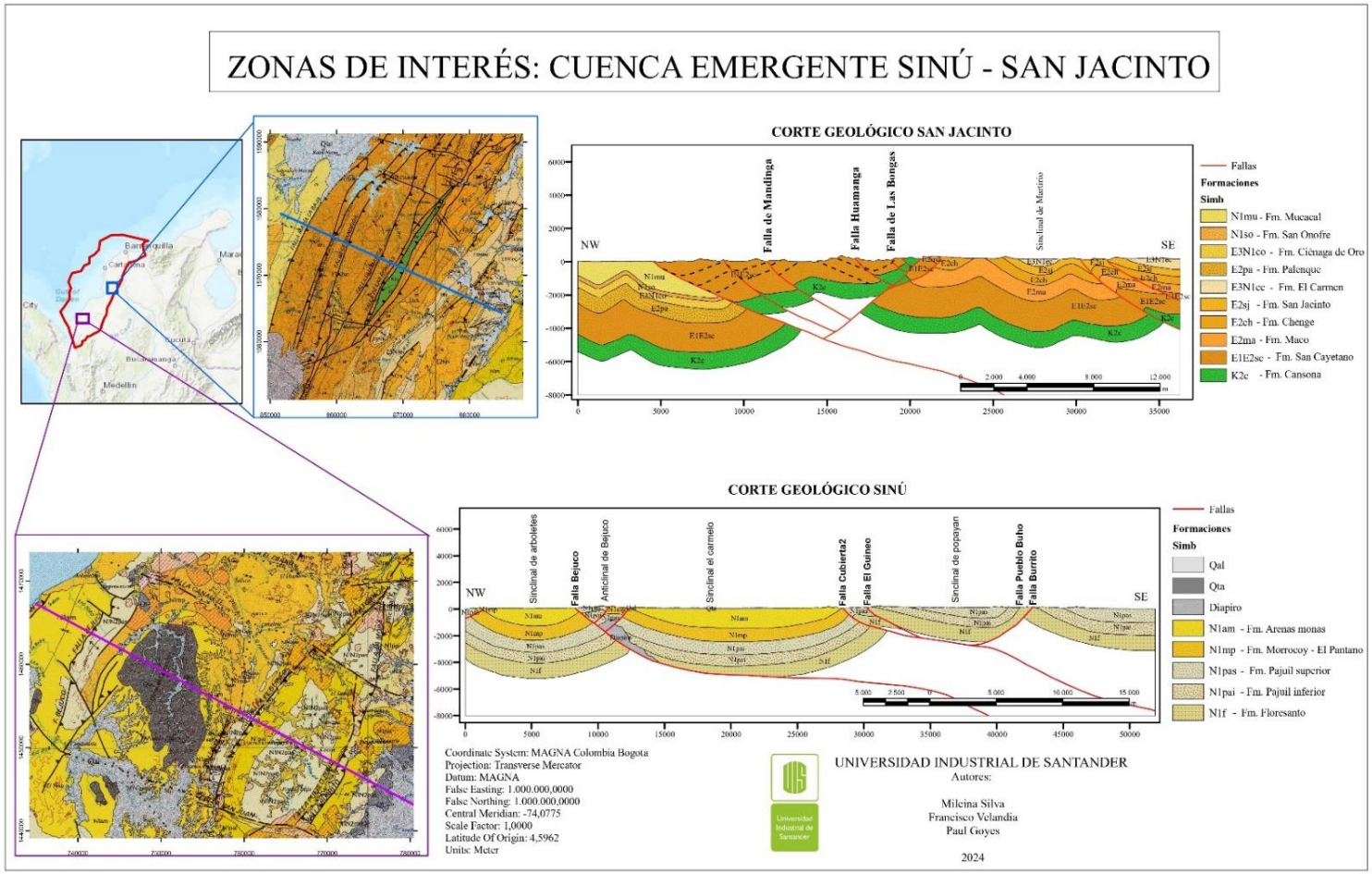
Reservorio) (Tabla 2), además de pozos productores no comerciales los cuales son pozos perforados en los que, a través de pruebas de presión – producción se registran volúmenes de hidrocarburos cuya extracción no es rentable al momento de clasificar el pozo (CNH, 2017). Este tipo de pozo es importante porque podría convertirse en un pozo productor comercial en el futuro debido a varios factores. Los desarrollos tecnológicos en técnicas de perforación y extracción, como la recuperación mejorada de petróleo, pueden aumentar la rentabilidad de estos pozos al reducir costos operativos y aumentar la cantidad de hidrocarburos extraídos. Además, las fluctuaciones en los precios del mercado pueden hacer que pozos anteriormente no rentables se vuelvan viables económicamente, especialmente si hay un aumento significativo en los precios del petróleo o del gas.

La cuarta zona se localiza en el Cinturón plegado del Sinú donde se encuentran las formaciones Pajuil y Floresanto (Reservorios). Además, se presenta diapirismo de lodo, el cual está estrechamente relacionado con los hidrocarburos: el ascenso de lodo puede deformar las capas de roca suprayacentes, creando estructuras de trampa que son favorables para la acumulación de hidrocarburos. Estas trampas pueden incluir pliegues anticlinales, fallas y fracturas asociadas con el movimiento del lodo.

Finalmente, datos geoquímicos indican que las rocas finogranulares con potencial generador (lutitas y lodolitas) corresponden de manera predominante con un querógeno de tipo III; es decir, de materia orgánica terrestre generadora de gas. Sin embargo, con la evidencia en superficie de hidrocarburos líquidos (Figura 14), también se sugiere la existencia de rocas con mejores propiedades para generar aceite. Además, la abundante presencia de rezumaderos indica la existencia de sistemas petrolíferos activos.

Figura 22

Zonas de interés Cuenca Sinú – San Jacinto



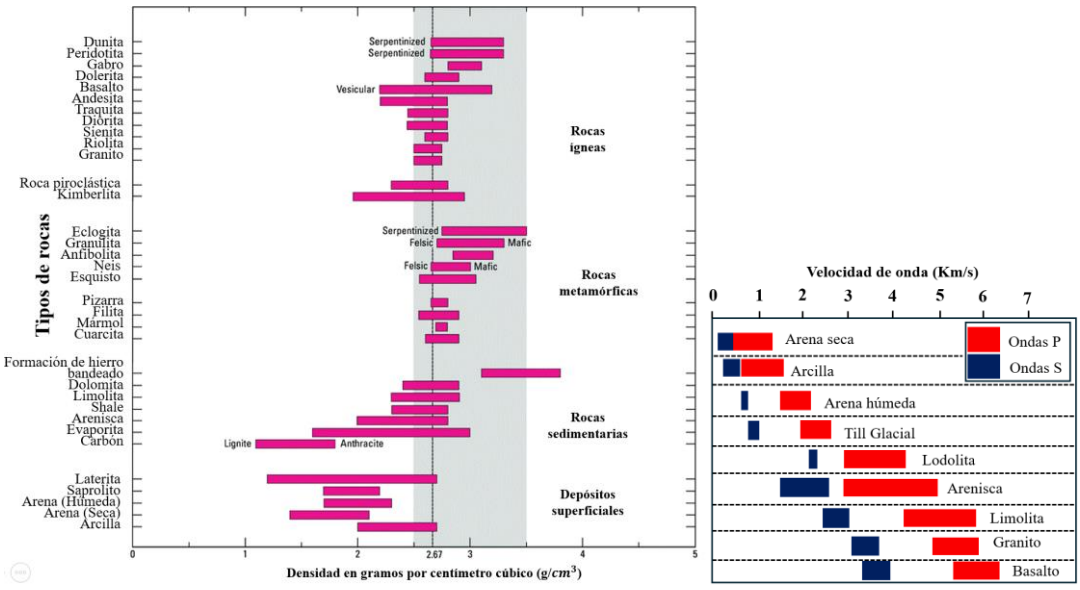
6.3 Modelos geológicos-numéricos integrando las características estructurales y estratigráficas de la cuenca sedimentaria Sinú-San Jacinto.

6.3.1 Recopilación de datos de densidad y la velocidad de las ondas P

En los modelos geológicos generados con GemPy, es posible asignar propiedades físicas a las formaciones geológicas, como la densidad y la velocidad de ondas P. Estos valores se determinaron en función de la litología, siguiendo los gráficos presentados en la figura 23 y recopilados en la Tabla 4. Cabe destacar que cualquier parámetro, como la densidad, los parámetros elásticos, la atenuación, entre otros, puede ser ajustado de esta manera para obtener simulaciones más complejas. Una de las ventajas de utilizar GemPy para crear estos modelos sintéticos es que pueden ser usados con una amplia gama de propiedades del material. Esto es posible remodelando la matriz para que encaje en los nuevos parámetros requeridos.

Figura 23

Densidad y velocidad de ondas de los distintos tipos de roca



Nota: Densidad en gramos por centímetro cúbico y Velocidades típicas de onda P (rojas) y ondas S (azules) en sedimentos y en rocas corticales sólidas. Tomado de Dentith y Mudge (2018) y EPA U.S.A (2016).

Tabla 4

Recopilación de propiedades físicas de cada formación geológica

Modelo	Unidades	Nomenclatura	Litología	Densidad (g/cm3)	Vp (m/s)
ZONA_1: Manso	Fm. El Floral	Pgf	Areniscas y lodolitas	2,42	3500
	Fm. San Cayetano	E1E2sc	Arenitas líticas arcosas	2,32	4000
	Fm. Cansona	K2c	Lodolitas	2,40	3100
	Basamento oceánico	--	Basalto	2,8	6000
ZONA_2: Plaza Hormiga	Fm. El Floral	Pgf	Lodolitas levemente calcáreas	2,42	3500
	Fm. San Cayetano	E1E2sc	Arenitas líticas arcosas	2,6	4000
	Fm. Cansona	K2c	Lodolitas	2,40	3100
ZONA_3: Cerro Cansona	Fm. Mucacal	N1mu	Areniscas Cuarzosas	2,7	3500
	Fm. San Onofre	N1so	Lodolitas y shales	2,5	3200
	Fm. Ciénaga de Oro	E3N1co	Areniscas y limolitas	2,8	4500
	Fm. Palenque	E2pa	Litoarenitas	2,3	4000
	Fm. El Carmen	E3N1ec	Arcillolitas	2,5	3000
	Fm. San Jacinto	E2sj	Arenitas cuarzosas y conglomerados	2,1	2800
	Fm. Chenge	E2ch	Calizas y lodolitas	2,54	3200
	Fm. Maco	E2ma	Litoarenitas arcósicas	2,5	4200
	Fm. San Cayetano	E1E2sc	Arenitas líticas arcosas	2,6	4300
	Fm. Cansona	K2c	Lodolitas	2,40	3100
ZONA_3: Bejuco	Fm. Arenas Monas	N1am	Conglomerado arenoso, arenitas y lutitas	2,0	3000
	Fm. Morrocoy-El Pantano	N1mp	Arenitas líticas	2,2	4200
	Fm. Pajuil Superior	N1pas	Lutitas	2,40	3100
	Fm. Pajuil Inferior	N1pai	Arenitas calcáreas	2,3	3700
	Fm. Floresanto	N1f	Arenitas y lutitas	2,35	3000

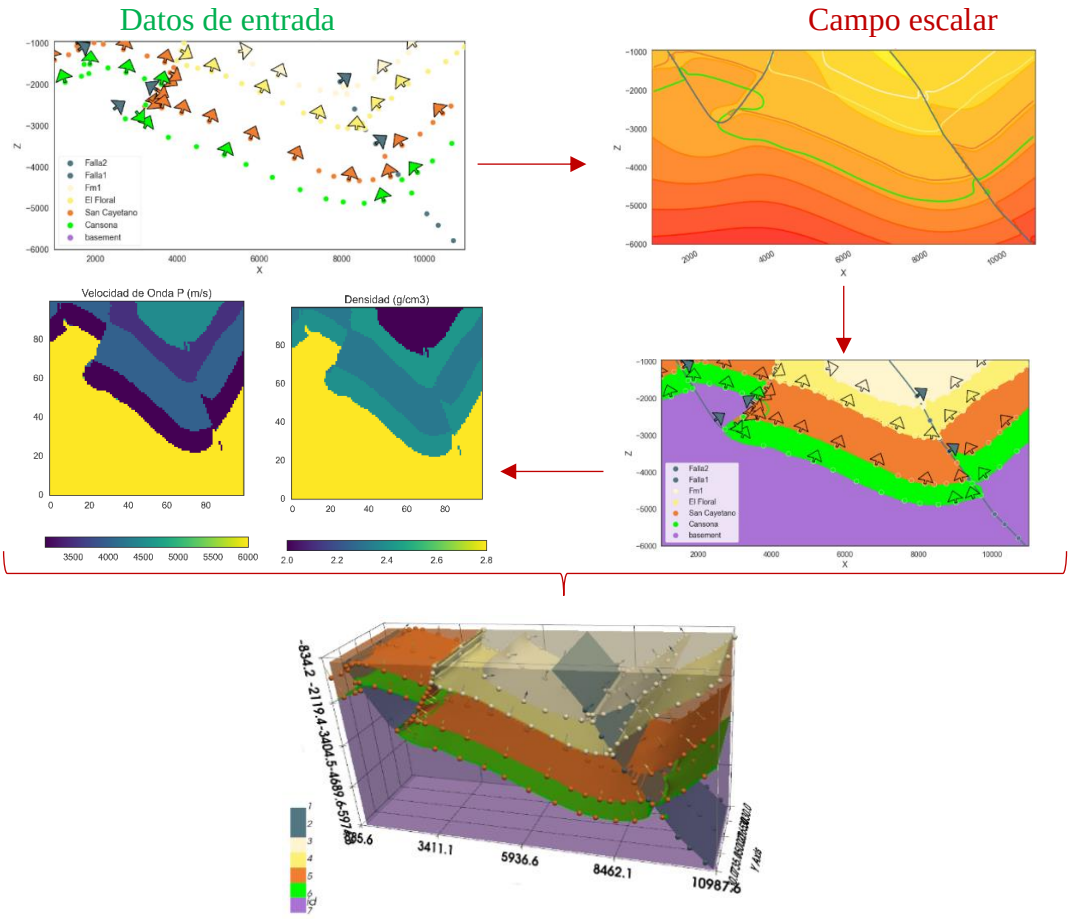
Nota: Los valores asignados son aproximados teniendo en cuenta la litología predominante.

6.3.1 Zona de interés 1: Manso

Esta zona de interés (Figura 24) presenta un sinclinal y un anticlinal al oeste del corte el cual está afectado por dos fallas inversas las cuales forman trampas estructurales que facilitan la acumulación de hidrocarburos especialmente en la Formación San Cayetano. En la imagen del campo escalar muestra como el software GemPy les da continuidad a las interfases aun cuando hay desplazamiento a causa de una falla, así interpola los datos a lo largo del espacio tridimensional del modelo; sin embargo, esto no significa que no haya desplazamiento en el modelamiento final de la formación geológica.

Figura 24

Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Manso

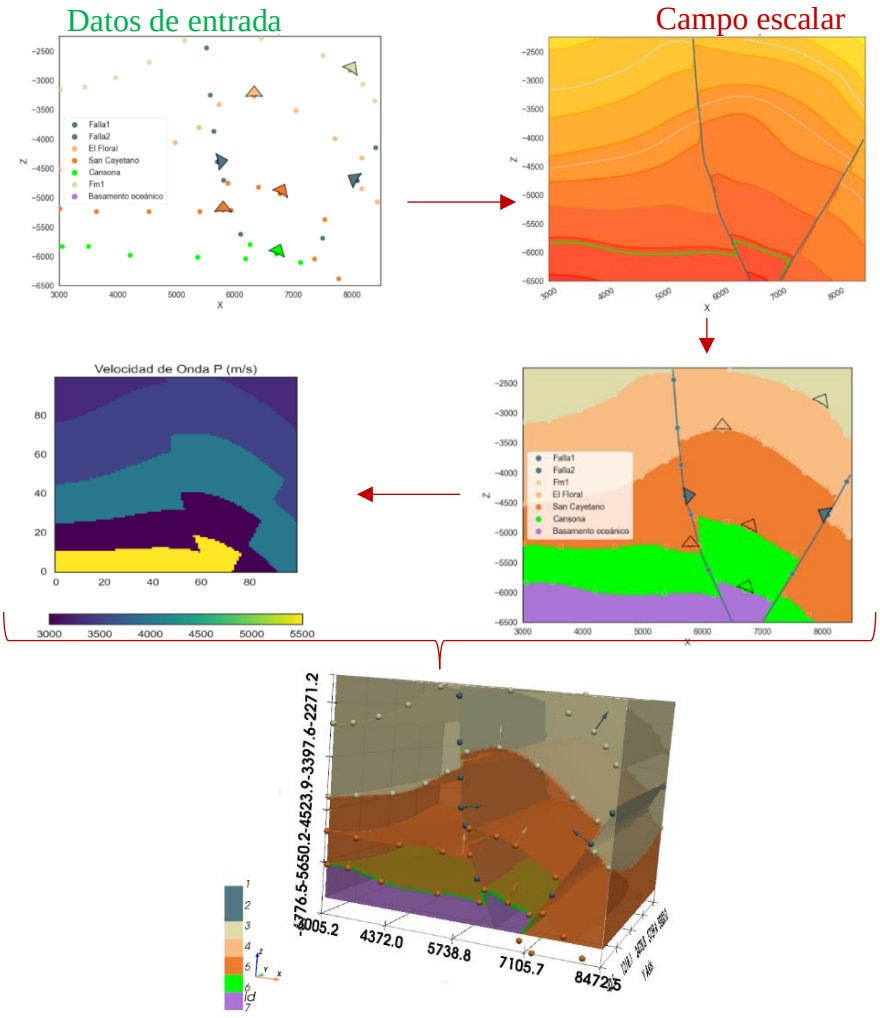


6.3.2 Zona de interés 2: Plaza Hormiga

Esta área (Figura 25) muestra dos fallas inversas que afectan a las formaciones Cansona, San Cayetano y El Floral. El movimiento inverso de las fallas ocasiona la generación de pliegues anticlinales los cuales actúan como trampas estructurales para hidrocarburos, junto con las fallas. Como se observa en los datos de entra muestran que para realizar este modelo solo fueron necesarios de uno a dos vectores polo para cada superficie debido a la baja complejidad estructural.

Figura 25

Proceso de elaboración del modelo geológico-numérico 3d Zona2.



6.3.3 Zona de interés 3: Cerro Cansona

En esta zona (Figura 26) se observa diversas las fallas Mandinga, Huamanga, Las Bongas, entre otras. Las estructuras son de tipo inverso con vergencia es hacia el NW lo que evidencia el régimen compresivo de la zona. La falla principal Maria La Baja, en especial, desplaza a las formaciones San Cayetano y Cansona ubicándolas encima de formaciones más jóvenes como Mucacal, San Onofre, Ciénaga de oro y Palenque. Al haber una discontinuidad, es necesario añadir una considerable cantidad de vectores polo (Figura 27A) con el fin de guiar los límites y el espacio de cada formación geológica. La zona central es de interés ya que afloran la Formación San Cayetano y la Formación Cansona. Debido a la alta complejidad estructural de estas dos zonas los campos escalares no se observan tan precisos como deberían (Figura 27B). Finalmente, al este se encuentra la Formación San Jacinto la cual es roca reservorio y está afectada por dos fallas formando un anticlinal (trampa estructural) (Figura 27C).

Figura 26

Subzonas de interés

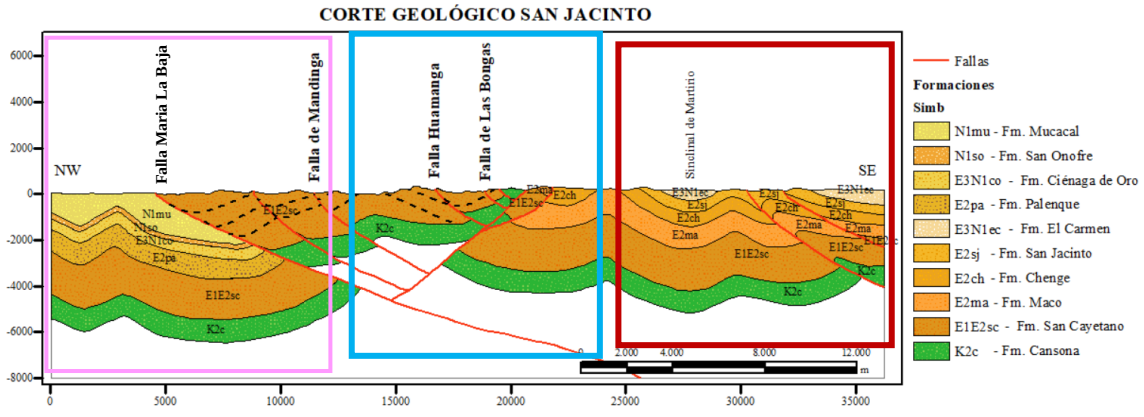
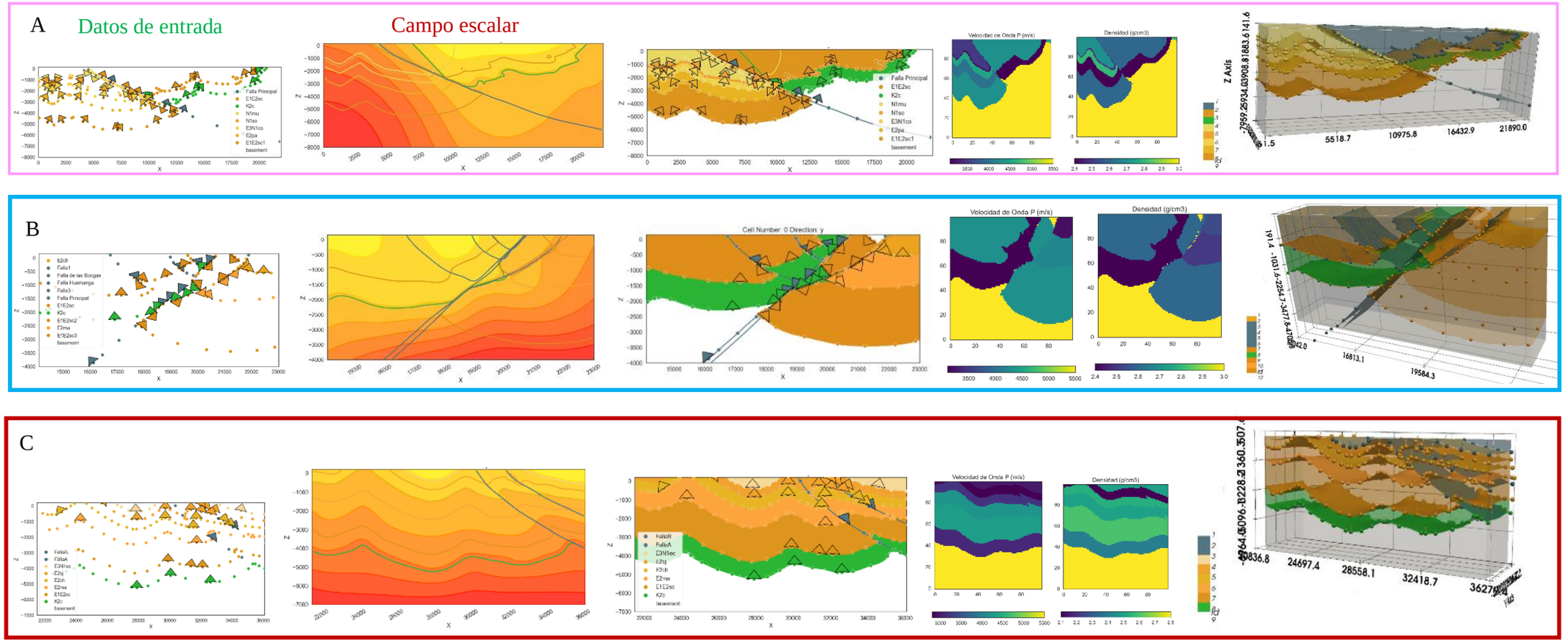


Figura 27

Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Zona 3



6.3.4 Zona de interés 4: Bejuco

El área del Sinú destaca por la alta presencia de amplios sinclinales y Diapiros de lodo. El corte (Figura 28) muestra un diapiro que debido a su movimiento ascendente deforma a las formaciones geológicas, especialmente a la Formación Pajuil Superior creando trampas estructurales como fallas y pliegues anticlinales; además, el diapiro puede actuar como roca sello o puede fracturar las rocas adyacentes, facilitando la migración de fluidos permitiendo que los hidrocarburos se desplacen hacia zonas de menor presión. El corte realizado muestra amplios sinclinales como se menciona en la caracterización estructural del cinturón plegado de San Jacinto.

GemPy calcula un campo escalar para cada serie estratigráfica o de falla, en este caso se puede observar el campo escalar para el diapiro siendo esto interesante debido a que es un cuerpo irregular y cerrado (Figura 29).

Figura 28

Zona de interés 4 Diapiro de Lodo

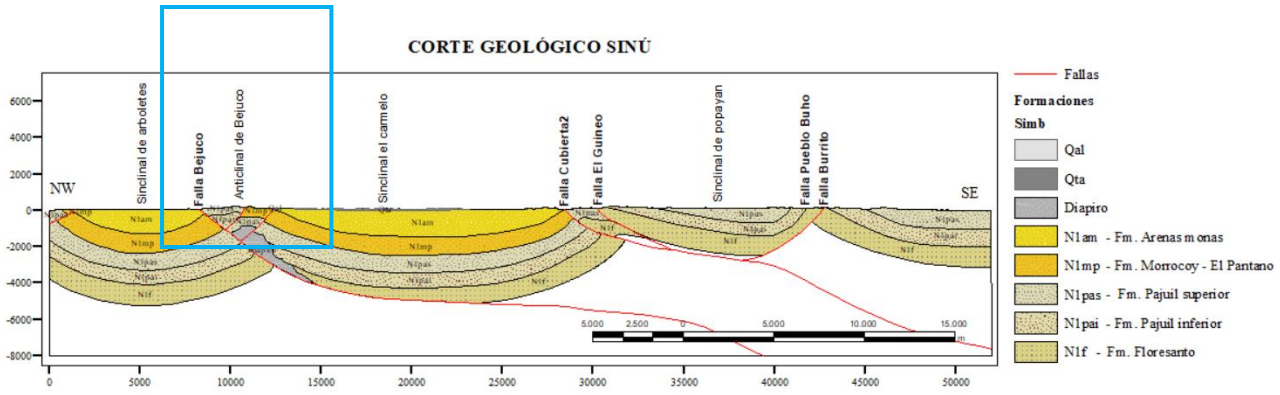
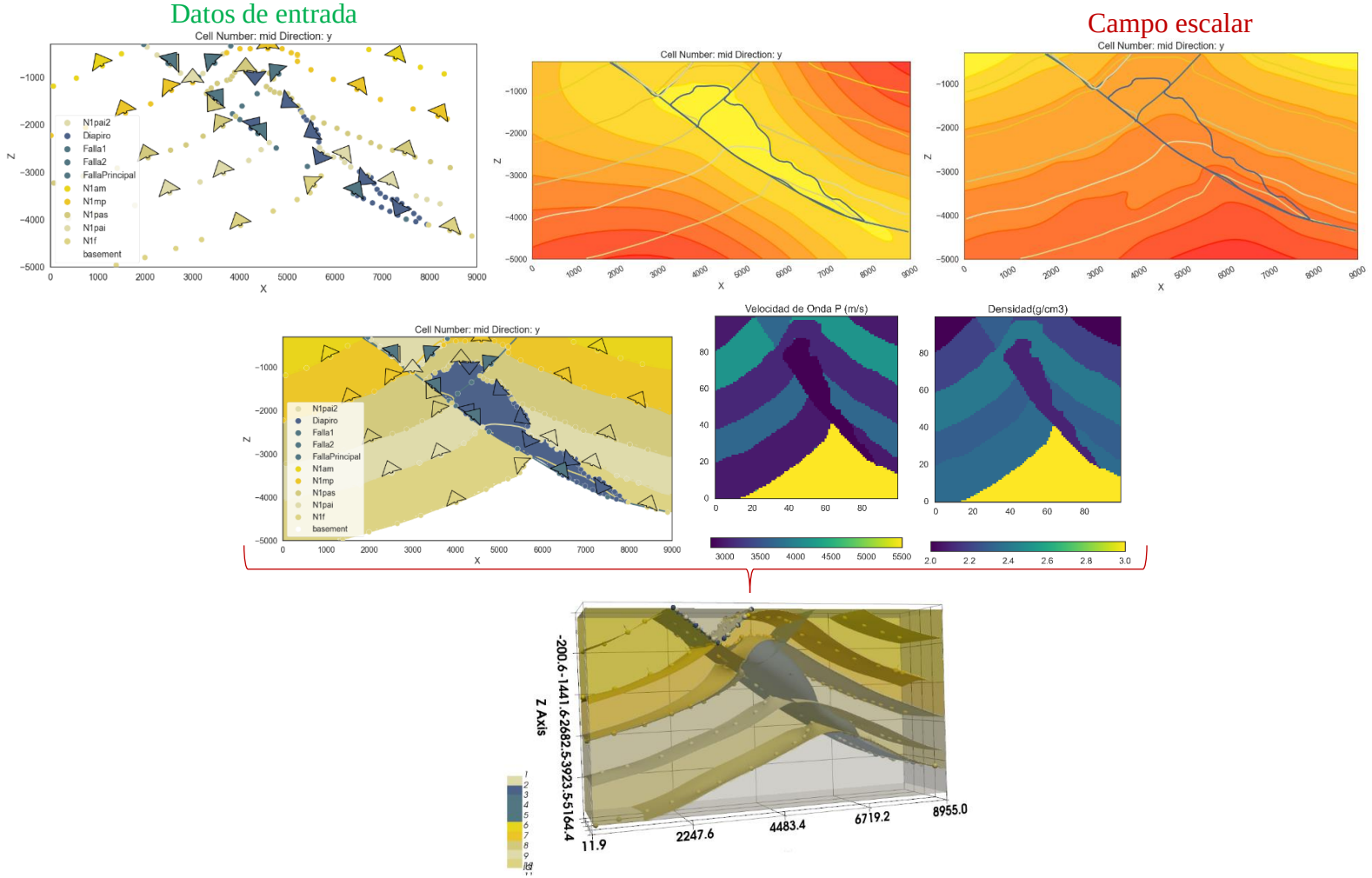


Figura 29

Proceso de creación del modelo geológico-numérico 3d Zona 4



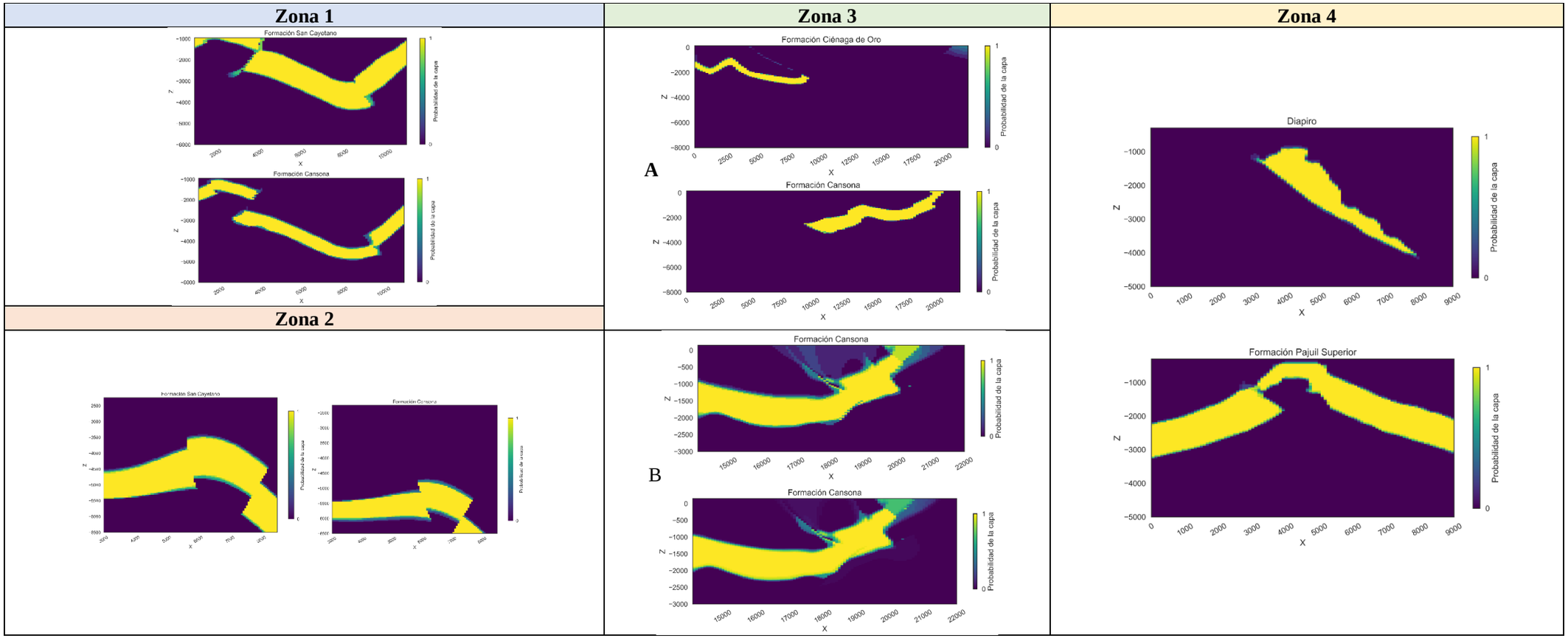
6.4 Validación los modelos geológico-numéricos incorporando la distribución probabilística de las formaciones geológicas

Al trabajar con datos geológicos, siempre hay un margen de incertidumbre. Esta puede deberse a errores en los dispositivos, diferentes interpretaciones o suposiciones. El modelado probabilístico permite tomar parte de esta falta de certeza y convertirla en algo que se puede medir y representar con probabilidades. Para la validación de los modelos se llevó a cabo el procedimiento realizado por de la Varga et al. (2019). Así, se ajustó una distribución normal con una desviación estándar alrededor del eje Z de los puntos de interfaz en cada modelo inicial. Luego, se calculan los modelos geológicos que describen estos nuevos datos y así representar la variabilidad natural de la geología, permitiendo evaluar riesgos y planificar mejor.

La Figura 30 muestra los resultados más relevantes de los modelos geológico-numéricos. Las Zonas 1 y 2 muestran el campo de probabilidad para formaciones geológicas que se encuentran en un contexto de baja complejidad estructural por lo que el resultado es bastante acertado mostrando la capa en amarillo y los limites bastante definidos. Si al ver los resultados se observan zonas con resultados no tan precisos se deben revisar los datos de entrada del modelo inicial y hacer modificaciones, tales como cambiar o añadir vectores polos o puntos de superficie y así obtener un mejor resultado. El resultado también depende del número de iteraciones realizadas en pro de repetir y refinar lo resultados; sin embargo, esto está sujeto a las limitaciones computacionales (Figura 30B). Finalmente, se realizó el cálculo de probabilidad para el diapiro de la zona 4 con el fin de validar y mostrar los límites para cuerpo irregular y cerrado, el resultado muestra una gran definición de estos y al cuerpo en color amarillo lo que indica una probabilidad alta que es lo esperado.

Figura 30

Modelos probabilísticos



Nota. La barra de color que indica la probabilidad de la capa, con valores desde 0 (azul, probabilidad baja) hasta 1 (amarillo, probabilidad alta).

7. Conclusiones

- Se logró desarrollar modelos geológico-numéricos 3D para la cuenca emergente Sinú-San Jacinto. Estos modelos integran de manera efectiva la complejidad estructural y estratigráfica de la región representando las características geológicas representativas de la cuenca, lo que será útil para futuras investigaciones y aplicaciones en la zona.

- La cuenca Sinú – San Jacinto de divide en dos provincias geográficas: el Cinturón plegado del Sinú que se caracteriza por amplios sinclinales delimitados por fallas y diapiros de lodo que actúan como trampas y sellos estructurales y en su zona offshore destacan pliegues imbricados de propagación de falla; y el Cinturón fallado de San Jacinto que se distingue por un sistema de fallas inversas con vergencia al oeste, también fallas de rumbo y estructuras de flor positiva. Además, los sistemas petrolíferos incluyen formaciones de importancia económica como las formaciones Pajuil, Floresanto, San Jacinto, Maco y San Cayetano que son las principales rocas reservorio de esta cuenca. Esta información geológica recolectada y organizada fue necesaria para crear los modelos.

- A partir de la caracterización geológica se destacan cuatro zonas de interés que presentan un potencial económico considerable debido a diversos factores. La Zona 1 Manso muestra cierres asociado al bloque yacente de fallas inversas que cortan flancos de sinclinales someros. La Zona 2 Plaza Hormiga presenta anticlinales fallados, formados en el bloque colgante de fallas inversas. La tercera zona se localiza en el cinturón fallado de San Jacinto donde se encuentra la Formación Cansona (Roca Fuente) y las formaciones San Jacinto y San Cayetano (Rocas Reservorio). Finalmente, la cuarta zona se localiza en el cinturón plegado del Sinú donde se encuentran las formaciones Pajuil y Floresanto (Reservorios), y,

además, se presenta diapirismo de lodo, el cual está estrechamente relacionado con los hidrocarburos.

-Con base en la información previa y los cortes geológicos realizados, los cuales fueron insumos claves, se generaron seis modelos geológico-numéricos para representar las estructuras de la cuenca Sinú – San Jacinto, estos muestran continuidad espacial de las formaciones geológicas y permitieron exhibir las estructuras geológicas mencionadas, tales como sistemas de fallas, pliegues y diapiros.

-A partir de la creación de los modelos geológico-numéricos de la cuenca Sinú-San Jacinto se notó que es fundamental contar con una cantidad adecuada de datos geológicos. Si la cantidad de datos es insuficiente, el modelo resultante podría no ser preciso. Por otro lado, si se utilizan demasiados datos, el proceso matemático interno podría volverse computacionalmente exigente y difícil de manejar. Esto también puede suceder si los datos son ambiguos o contradictorios.

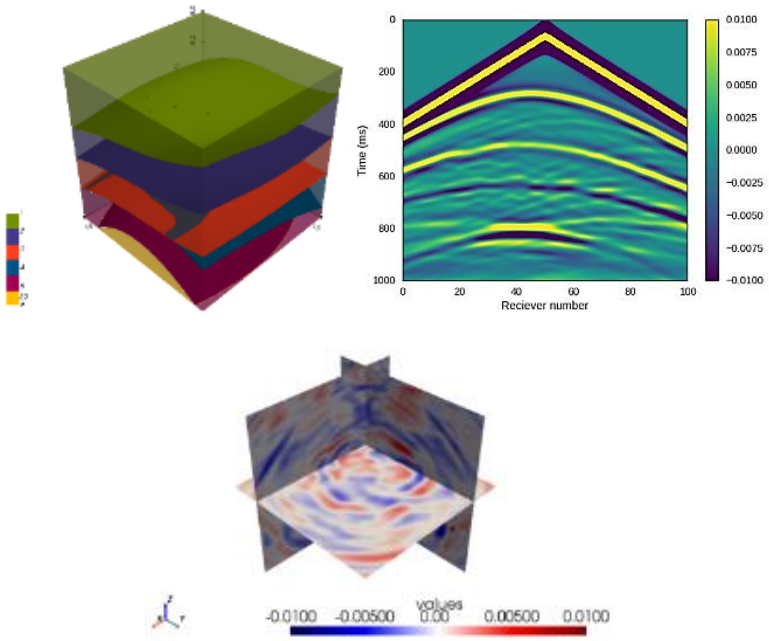
-Al validar los modelos geológico-numéricos, se determinó para cada capa, una distribución probabilística. Esto evidenció una probabilidad de ocurrencia alta (valor 1) de cada capa presente en las zonas de interés. Esta alta probabilidad de ocurrencia indica que los modelos están bien construidos, ya que las capas se representan en las ubicaciones donde se espera que aparezcan según la información geológica recopilada. Además, la distribución probabilística mostró que la probabilidad de ocurrencia de una capa disminuye en zonas de falla, lo que es coherente con la dinámica geológica esperada en estas áreas.

8. Trabajo futuro

Como se ha mencionado estos modelos pueden ser la herramienta base para otros estudios en diversas áreas. En la geofísica para realizar modelamiento sísmico (Figura 31) lo que permite comprender como se comportan las ondas sísmicas a través de los distintos tipos de roca, información que puede ser comparada con datos reales y así tener análisis más precisos. En la geoeducación especialmente para ilustrar temas de geología estructural (Figura 32) o para planificación de Infraestructura Energética ubicando áreas geológicamente adecuadas minimizando riesgos, entre otras.

Figura 31

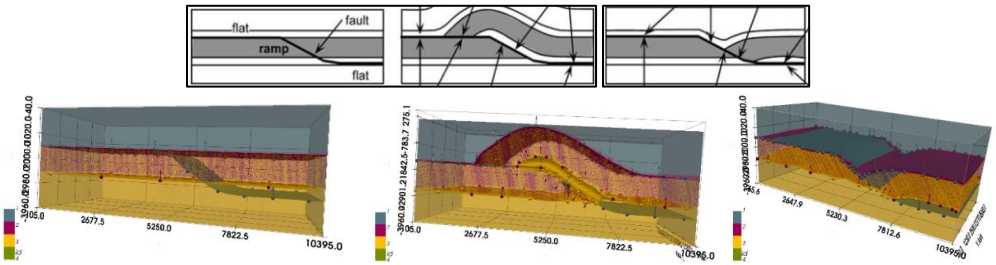
Modelamiento sísmico



Nota. Modelamiento sísmico a partir de un modelo geológico-numérico 3D de GemPy. El proceso muestra un shot con las capas reflejadas y las imágenes sísmicas finales.

Figura 32

Ejemplo de configuración de fallas en llana (flat) y rampa (ramp) realizado en GemPy



Nota: Ejemplo del desarrollo y configuración de fallas en llana y rampa. a) Estado inicial de la secuencia sin deformación. b) Estado deformado de la secuencia luego de ser comprimido. c) corresponde al estado deformado luego de la extensión. Tomado de Groshong (2006).

Referencias Bibliográficas

Aguilera, R. (2011). Geology and hydrcarbon potencial Sinu and San Jacinto Basins (Vol. 12).

Alfonso, M., Herrera, J., Navarrete, R., Bermúdez, H., Calderón, J., Parra, F., Sarmiento, G., Vega, F., y Perrilliat, M. (2009). Cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras y análisis bioestratigráficos. Sector Chalán.

ANH. (2009). Interpretación programa sísmico 2d Sinú sur 2008. https://www.anh.gov.co/documents/2764/SISMICA_SINU_SUR_2D_2008.pdf

ANH. (2011). Informe final de interpretación sísmica. https://www.anh.gov.co/documents/4139/INTERPRETACION_2011_SINU_SAN_JACINTO_2D_2005.pdf

Arredondo, L. (2016). Simulación geoestadística de bandas rotantes aplicada a la identificación de facies en el Batolito Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia.

Barrera, R., Reyes, G., Guzmán, G., y Franco, J. (2001). Memoria Explicativa Plancha 31 campo de la cruz.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., y Martínez, J. F. (2007). Colombia Sedimentary Basins. https://www.anh.gov.co/documents/12/colombian_sedimentary_basins.pdf

Bermúdez, H., y Hincapié, G. (2008). Cartografía y geología estructural provincias tectónicas y evolución geológica.

Caicedo, M. (2008). El flujo de trabajo de modelamiento geológico en petrel. Aplicación práctica en un campo de la cuenca oriente, ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Camacho, W. (2016). Informe preliminar de áreas de interés regional para encontrar yacimientos de hidrocarburos no convencionales (shale gas) a partir de información geofísica (magnetometría y gravimetría) en la cuenca Sinú-San jacinto.

Caro, M., y Rey. (2009). Main geological characteristics of the Sinú subbasin from seismic interpretation.

CARSUCRE. (2003). Proyecto de protección integral de aguas sub-terraneas Acuífero Morroa sector Sincelejo-Corozal-Morroa.

Cediel, F. (2011). Geological map of the San Jacinto Fault Belt and the Sinú Fold Belt. Compiled and edited at scale 1:300.000.

CNH. (2017). Lineamientos de Perforación de Pozos. https://cnh.gob.mx/media/2556/pozos-anexo-iii.pdf

de la Varga, M., Schaaf, A., y Wellmann, F. (2019). GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. Geoscientific Model Development, 12(1), 1–32. https://doi.org/10.5194/gmd-12-1-2019

Dentith, M., y Mudge, S. T. (2018). Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. xv–xv. https://doi.org/10.1017/CBO9781139024358.002

Donado, L., Buitrago, J., Vargas, M., y Granados, J. (2002). Modelo hidrogeológico conceptual de la zona de recarga del acuífero Morroa (departamentos de sucre y córdoba).

Duque Caro, H. (1980). Geotectónica y evolución de la región noroccidental colombiana en: Boletín geológico del Ingeominas vol. 23 n 3.

Fandel, C., Ferré, T., Chen, Z., Renard, P., y Goldscheider, N. (2021). A model ensemble generator to explore structural uncertainty in karst systems with unmapped conduits. Springer.

Flores, A. (2016). Cuencas emergentes-Potencial hidrocarburífero de los reservorios carbonatados del Jurásico y Paleozoico en la Faja Subandina Peruana (Vol. 19).

Frings, K., von Hagke, C., Wellman, F., Heim, E., de la Varga, M., Ortner, H., y Luijendik, E. (2023). Constraining the 3-D Geometry of Fold-Thrust Belts Using Section Balancing vs. 3-D Interpolative Structural and Probabilistic Modeling. Tektonika, 1(2). https://doi.org/10.55575/tektonika2023.1.2.21

García, A., Guzmán, W., y Ramirez, C. (2009). Análisis petrográfico y diagenético a partir de núcleos de perforación de las rocas sedimentarias de la cuenca Sinú - San Jacinto y el área especial Sinú de la ANH en el departamento de sucre. Universidad de caldas.

GemPy. (2019). Open-source software for implicit 3D structural geological modeling in Python. https://www.gempy.org/documentation

González, J. (2015). Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo. Universitat Politècnica de Catalunya.

Groshong, R. H. (2006). 3-D Structural Geology. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31055-6

Guzmán, G., Cáceres, C., y Cediel, F. (2003). Mapa Geológico de Sinú San Jacinto y borde oeste del Valle inferior del Magdalena.

Guzmán, G., Clavijo, J., y Barrera, R. (1994). Geología bloque santero, secciones estratigráficas.

Guzmán, G., Gómez, E., y Serrano, B. (2004). Geología de los cinturones del Sinú, san jacinto y borde occidental del valle inferior del magdalena-caribe colombiano.

Haehnel, P., Freund, H., Greskowiak, J., y Massmann, G. (2023). Development of a three-dimensional hydrogeological model for the island of Norderney (Germany) using <scp>GemPy</scp>. Geoscience Data Journal. https://doi.org/10.1002/gdj3.208

Hernández, H. (2022). Introducción al modelamiento geológico implícito.

Hernández, M. (2017). Inferencia Bayesiana conjunta de modelos hidrológicos y modelos de error generalizados, para la evaluación de las incertidumbres predictiva y de los parámetros. Universitat Politecnica de_Valencia.

Huaman, J. (2023). Modelo estructural estocástico de subsuelo de bofedal mediante interpolación 3d de las conductividades eléctricas con GemPy, microcuenca Apacheta, Ayacucho [Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/5016/1/TESIS%20CF46_Hua.pdf

IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2010.compressed.pdf

INGEOMINAS. (2003). Memoria Explicativa Geología de los cinturones Sinú - San jacinto planchas 50 Puerto escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 montería, 69 Necoclí, 70 San pedro de Urabá, 71 Planeta rica, 79 Turbo, 80 Tierralta.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (2023). Modelos numéricos meteorológicos.

Juliao, T., Carvalho, M., Torres, D., Plata, A., y Parra, C. (2011). Definición de paleoambientes de la formación cansona a partir de palinofacies, cuenca Sinú–San jacinto.

Landmark-Halliburton. (2007). Informe ejecutivo proyecto "Consultoría para realizar la evaluación (geología del petróleo), la integración, interpretación y reinterpretación de la información suministrada y la que deba ser consultada para generar los paquetes de información técnica requeridos para llevar a cabo la Ronda Caribe.

López, S. (2015). Actualización del modelo numérico del acuífero Morroa utilizando Visual Modflow Flex. Universidad de los Andes.

Marin, J. (2010). Open Round Colombia 2010.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia (R. Ávila, Ed.).

Murray, A. B., Gasparini, N. M., Goldstein, E. B., y van der Wegen, M. (2016). Uncertainty quantification in modeling earth surface processes: more applicable for some types of models than for others. Computers y Geosciences, 90, 6–16. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.008

Sánchez, C., y Permanyer, A. (2006). Origin and alteration of oils and oil seeps from the Sinú-san jacinto basin, Colombia. In Organic geochemistry (Vol. 37).

UPME. (2018). Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales: Vol. Contrato c-041 2018.

EPA U.S.A. (2016). Geomechanical (Engineering) Properties. https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/geomechanical_(engineering)_properties.html

van der Wegen, M., y Jaffe, B. E. (2013). Towards a probabilistic assessment of process-based, morphodynamic models. Coastal Engineering, 75, 52–63. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.009

Vivanco, L. (2020). Modelo geológico de la ocurrencia y distribucion espacial del molibdeno en el yacimiento rosario, Región de Tarapacá, Chile. Universidad de Chile.

Wu, J., y Sun, B. (2021). Discontinuous mechanical analysis of manifold element strain of rock slope based on open source Gempy.