

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Caracterización de muestras geológicas y su influencia en la capacidad de
almacenamiento de CO₂ en un medio poroso a escala métrica

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Presentado por:

Diana Alejandra Mejía Cela

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a Dios, a mis queridos padres Ramón Mejía y Graciela Cela, quienes son los pilares de mi vida y siempre han creído en mí, sin ellos no hubiese podido lograr esta nueva meta.

A mis hermanos, Ambar, Darío y Daniel por sus palabras de aliento y apoyo cuando lo necesité.

Por último, a mis hermosas mascotas, quienes me acompañaron en este camino; un saludo al saludo al cielo.

¡Este logro es de ustedes familia!

- Diana Mejía

Agradecimientos

Mis más sinceros y profundos agradecimientos a mis queridos padres, quienes, con su amor incondicional, confianza y apoyo, me han acompañado en este proceso. Gracias por enseñarme con su ejemplo, el valor del esfuerzo, perseverancia, humildad, por acompañarme con paciencia y amor en los momentos difíciles. Cada logro alcanzado, también es suyo, porque ustedes son la fuerza que me impulsa. Quiero agradecer a mi tutor, el PhD Maurizio Mulas y la PhD. Priscila Valverde, por ser mis mentores, guiarme en esta etapa, brindarme su apoyo, orientarme con sabiduría y por transmitir sus conocimientos con generosidad. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi crecimiento profesional y personal. Sus enseñanzas e inspiración permanecerán en mi futuro desempeño. La confianza que ustedes me brindaron desde el inicio me dio la seguridad necesaria para afrontar los desafíos de este proyecto y transformarlos en oportunidades de aprendizaje y desarrollo. También, me gustaría agradecer a la PhD Jacquelin Cobos y al Ing. Kristoffer Eikehaug por su oportuna retroalimentación durante este proyecto brindándome no solo su apoyo profesional, sino también su calidez humana y extenderme una gran mano amiga durante mi estadía. Un sincero agradecimiento a la colaboración internacional entre la ESPOL y la Universidad de Bergen, que ha facilitado la transferencia de conocimiento y tecnología a la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL. Al apoyo financiero proporcionado por la Agencia Noruega para la Cooperación al Desarrollo (NORAD) bajo la subvención 71660 del proyecto NORHED II “Recuperación de Petróleo Mejorada con CO₂ para la Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono en Colombia y Ecuador: Una Iniciativa Energética Noruega”, proyecto FICT-300-2020.

A los técnicos de laboratorio de FICT, en especial al Ing. Washington Pincay, Ing. Cristhian Aguilar, MSc. Daniel Falquez, MSc. Arian Briones por su apoyo y disposición durante la realización de este proyecto, brindándome las herramientas necesarias para el desarrollo de este. A mis queridos amigos que el proyecto CCUS me brindó la oportunidad de conocer, ¡Jonathan, Kevin y Steeven, gracias, chicos! por su oportuna ayuda, compañía, apoyo y sincera amistad que hicieron de este camino una experiencia más enriquecedora y un hermoso capítulo en mi vida. A todas las personas que conocí este año y siempre me alentaron.

¡Les agradezco mucho a todos!

Declaración Expresa

Yo Diana Alejandra Mejía Cela acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de agosto del 2025.

.

Diana Alejandra Mejía Cela

Evaluadores

Nombre del tutor

PhD Maurizio Mulas

Nombre del co-tutor

PhD Priscila Valverde

Nombre del evaluador

MSc. Daniel Garcés León

Resumen

Las emisiones de CO₂ actualmente contribuyen de manera significativa al calentamiento global. Uno de los principales desafíos en el geoalmacenamiento es garantizar su permanencia en el subsuelo. Diversos factores como la forma, la redondez, la esfericidad y la distribución granulométrica afectan las propiedades petrofísicas de un entorno poroso como medio de retención de CO₂. Este proyecto tiene como objetivo evaluar la influencia de las características físicas en muestras de sedimentos utilizando arenas de río-playa y de cuarzo supermaduras mediante la construcción de modelos a escala de laboratorio para el análisis de la capacidad de almacenamiento de CO₂. El presente estudio empleó una metodología compuesta por cinco fases: (I) recolección de muestras en campo, (II) clasificación granulométrica por tamizado, (III) caracterización morfológica de partículas (IV) ensayos de propiedades físicas (gravedad específica, porosidad y permeabilidad) y (V) pruebas de inyección de CO₂. Los resultados indican que, la morfología de las arenas GCS (gruesas de cuarzo supermaduras) presentaron granos subredondeados con esfericidad de 74.25% y un porcentaje de granos ultra esféricos (16.75%) con una porosidad y permeabilidad de $\Phi=0.31 \pm 0.01$ y $k=4.80 \pm 1.90$ D, respectivamente. Las arenas GRP (gruesas de río-playa) mostraron un 59% de granos subredondeados de alta esfericidad, partículas subredondeadas con ultra esfericidad (12.25%) y granos subredondeados con esfericidad media en un 27.25%. Sus propiedades son: GRP $\Phi=0.39 \pm 0.02$ y $k = 1.29 \pm 0.16$ D. Las GRP presentan una mayor porosidad; en contraste, las GCS poseen una mejor conectividad, lo que les permite aprovechar de manera más eficiente el espacio poroso. Bajo condiciones de inyección lenta, las GRP alcanzan un mayor almacenamiento total debido a su elevada porosidad; no obstante, las GCS evidencian una mayor eficiencia en el llenado del espacio disponible. Los resultados indican que, las arenas GRP permiten un mayor almacenamiento total de los fluidos con un mayor espacio, aunque menos accesible por el fluido (baja permeabilidad) y las GCS presentan menos espacio, sin embargo, es mejor aprovechado por el flujo.

Palabras Clave: miniFluidFlower, redondez, esfericidad, propiedades petrofísicas

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) emissions currently make a significant contribution to global warming, and one of the major challenges in geological storage lies in ensuring their long-term permanence within the subsurface. Several factors—including grain shape, roundness, sphericity, and grain-size distribution—directly influence the petrophysical properties of a porous medium and therefore its suitability for CO₂ retention. This study aims to evaluate the influence of these physical characteristics in sediment samples, specifically comparing river–beach sands with supermature quartz sands. To achieve this, laboratory-scale models were constructed to analyze CO₂ storage capacity under controlled conditions. The research followed a methodology structured in five stages, beginning with the collection of field samples, followed by granulometric classification through sieving and morphological characterization of particles. Subsequently, tests of physical properties such as specific gravity, porosity, and permeability were performed, culminating in CO₂ injection experiments. The results show that the morphology of GCS sands (coarse supermature quartz) was characterized by subrounded grains with an average sphericity of 74.25% and a proportion of ultra-spherical grains of 16.75%. These sands exhibited porosity and permeability values of $\Phi = 0.31 \pm 0.01$ and $k = 4.80 \pm 1.90$ D, respectively. In contrast, GRP sands (coarse river–beach) contained 59% subrounded grains with high sphericity, 12.25% subrounded particles with ultra-sphericity, and 27.25% subrounded grains with medium sphericity. Their measured properties were $\Phi = 0.39 \pm 0.02$ and $k = 1.29 \pm 0.16$ D. Overall, the GRP sands displayed higher porosity, while the GCS sands exhibited better pore connectivity, allowing for more efficient utilization of pore space. Under slow injection conditions, the GRP sands achieved greater total storage capacity due to their higher porosity; however, the GCS sands demonstrated greater efficiency in filling the available pore space. These findings suggest that GRP sands provide a larger storage volume, albeit with reduced accessibility due to lower permeability, whereas GCS sands offer a smaller storage capacity but allow the fluid to take greater advantage of the available pore network.

Keywords: miniFluidFlower, roundness, sphericity, petrophysical properties

Contenido

Capítulo 1	15
1. Introducción	16
1.1. Descripción del problema	18
1.2. Justificación del problema	19
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general.....	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Marco teórico	21
1.4.1. Captura y almacenamiento de carbono (CCS).....	21
1.4.2. Métodos utilizados para la inyección de CO ₂	22
1.4.3. Mecanismos de entrapamiento de CO ₂	23
1.4.4. Nueva tecnología experimental: FluidFlower	25
1.4.5. Propiedades físicas de los sedimentos.....	29
1.4.6. Caracterización morfológica de los sedimentos	32
Capítulo 2.....	34
2. Metodología	35
2.1 Fase 1: Recolección de muestras en campo	35
2.2 Fase 2: Clasificación granulométrica según la norma ASTM E-11	37
2.3 Fase 3: Caracterización morfológica de muestras geológicas y arenas de río-playa .	39
2.4 Fase 4: Ensayos de propiedades físicas (gravedad específica, porosidad y permeabilidad)	41
2.5 Fase 5: Inyección de CO ₂ en arenas gruesas de cuarzo supermaduras y de río-playa	45
Capítulo 3.....	47
3. Resultados y análisis de resultados	48
3.1. Resultados	48

3.1.1.	Distribución granulométrica de las arenas de río-playa y arenas de cuarzo supermaduras	48
3.1.2.	Morfología de las muestras	49
3.1.3.	Gravedad específica, presión litostática y porosidad.....	53
3.1.4.	Permeabilidad	54
3.1.5.	Inyección en arenas gruesas de cuarzo supermaduras y de río sin variación del caudal. 55	
3.2.	Análisis de resultados.....	72
Capítulo 4.....		75
4.	Conclusiones	76
Referencias.....		77
Apéndice		81

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
BTB	Azul de bromotimol
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
CCUS	Carbon Capture Usage and Storage
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCS	Arenas finas de cuarzo supermaduras
FRP	Arenas finas de río-playa
GCS	Arenas gruesas de cuarzo supermaduras
GRP	Arenas gruesas de río-playa
MCS	Arenas medias de cuarzo supermaduras
MRP	Arenas medias de río-playa
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
UTM	Universe Transversal Mercator

Simbología

C	Carbono
$C_{27}H_{28}Br_2O_5S$	Azul de bromotimol
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
CaO	Óxido de calcio
CO_2	Dióxido de carbono
Gton	Giga toneladas
H_2CO_3	Ácido carbónico
$MgCO_3$	Carbonato de magnesio
MgO	Óxido de magnesio
NaOH	Hidróxido de sodio
pH	Potencial de hidrógeno

Índice de Figuras

Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	20
Figura 2. Representación esquemática de la captura, transporte e inyección de CO_2 en yacimientos de gas vacíos.	22
Figura 3. Mecanismos de atrapamiento de CO_2 en el subsuelo.	25
Figura 4. Herramienta a escala de laboratorio "FluidFlower"	27
Figura 5. Diagrama de redondez y esfericidad propuesto por Krumbein y Sloss (1951).	30
Figura 6. Software Image J, versión 1.54P	33
Figura 7. Mapa de los puntos de muestreo en las provincias de Manabí y Santa Elena. Ubicación general del Ecuador (a). Ubicación de las provincias de la zona de estudio (b). Ubicación local de los puntos de muestreo (c).....	36
Figura 8. Equipos empleados para la obtención de las arenas gruesas, medias y finas. Muestra de sedimentos (a), tamices (b) y tamizadora analítica (c), marca AS 200 Basic. Rango de medida $20\mu m - 25 mm$. Horno: marca Memmert (d).....	38
Figura 9. Parámetros morfométricos de 107 partículas	40
Figura 10. Partículas de arenas GRRP (izquierda) y partículas de arenas GCS (derecha). Nótese el cambio de fondo debido al contraste de colores de cada partícula. Es decir, fondo blanco para partículas de color u oscuras y fondo negro para partículas blancas.	40
Figura 11. Introducción de la muestra (100 g) al frasco volumétrico (a), control de la temperatura del agua de ensayo y se registró de peso final (muestra de sedimento + agua) (c).	41
Figura 12. Permeámetro armado utilizado para los experimentos de permeabilidad (izq.) y nivel de referencia utilizado para saturar la muestra empleando el método de carga constante $h=30 cm$ (der.).....	42
Figura 13. Ejemplo de geometría S.	44
Figura 14. Esquema del funcionamiento del miniFluidflower. (A) inyección de NaOH, (B) inyección del agua de formación usando un caudal de $20 mL/min$ CO_2 bomba peristáltica que inyecta los fluidos, (D) sistema de válvulas, (E) controlador del flujo másico que inyecta a 4 caudales diferentes, (F) residuos obtenidos posterior a la inyección y (G) transferencia de imágenes cada 15s.....	46

Figura 15. Histograma de distribución de frecuencias de partículas de arena de río-playa. Apertura (mm) vs. porcentaje de peso retenido para arenas de río-playa y cuarzo super maduro.	49
Figura 16. Clasificación de Krumbein y Sloss (1951). Arenas de cuarzo supermaduras gruesas (GCS) (a), arenas de cuarzo supermaduras medianas (MCS) (b), arenas de cuarzo supermaduras finas (FCS) (c), arenas de río-playa gruesas (CRP) (d), arenas de río-playa medias (MRP) (e) y arenas finas de río-playa (FRP) (f).....	52
Figura 17. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 10 mL/min.	57
Figura 18. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 5mL/min.	59
Figura 19. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 3mL/min.	61
Figura 20. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 2 mL/min.	63
Figura 21. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 10 mL/min	65
Figura 22. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 5 mL/min	67
Figura 23. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 3 mL/min	69
Figura 24. Propagación del CO ₂ en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 2 mL/min	71
Figura 25. Ejemplo de las partículas utilizadas para la caracterización morfológica.	81

Índice de tabla

Tabla 1. Descripción de las facies carbónicas y la coloración del pH.	27
Tabla 2. Abreviaturas de las tipologías de arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.	38
Tabla 3. Masa de las arenas utilizadas para la construcción de la geometría S y N con su respectivo tamaño de grano.	45
Tabla 4. Resultados de la porosidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.	54
Tabla 5. Resultados de la permeabilidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.	55
Tabla 6. Caudal empleado en los experimentos de inyección CO ₂	74
Tabla 8. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas GRP.	82
Tabla 9. Ejemplo de porosidades calculadas para las muestras.	
Tabla 10. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas GRP.	82
Tabla 11. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas GQS.	84
Tabla 12. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas MRP.	86
Tabla 13. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas MQS.	88
Tabla 14. Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas FPR.	90
Tabla 15. Gravedades específicas de las muestras de río-playa y de cuarzo supermaduras.	92
Tabla 16. Porcentajes de las capas de arenas reservorio, transición y sello según la profundidad del pozo.	93
Tabla 17. Presiones litostáticas obtenidas.	93
Tabla 18. Ejemplo de porosidades calculadas para las muestras.	94
Tabla 19. Ejemplo de porosidades calculadas para las muestras.	94

Capítulo 1

1. Introducción

El calentamiento global es impulsado por el incremento de los gases de efecto invernadero (GHG), principalmente por el CO₂ proveniente de actividades antropogénicas. Las emisiones anuales de CO₂ fósil han incrementado de ~ 11 mil millones de Ton desde 1690 a ~36.6 mil millones de Ton (Presupuesto Global de Carbono 2023). Este aumento indiscriminado de CO₂ contribuye de forma significativa al deterioro climático (p.ej. acidificación en los océanos, pérdida de la biodiversidad, eventos climáticos extremos, derretimiento de polos y glaciares) (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022).

Existen diferentes estrategias para disminuir y mitigar las exposiciones de CO₂ en la atmósfera, por ejemplo, la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes limpias (energías renovables), así como nuevas tecnologías para reducir los niveles netos de CO₂ en la atmósfera (Ajayi et al., 2019; Li et al., 2022).

CCUS también conocido como captura, utilización y almacenamiento de carbono es un método eficaz para disminuir las emisiones de CO₂ derivados de los GHG (Liu et al., 2020). CCUS (CCU (captura y utilización de carbono) y CCS (captura y almacenamiento de carbono)) es un conjunto de estrategias viables y prometedoras para el geoalmacenamiento, principalmente en yacimientos de petróleo y gas agotados, vetas de carbón no explotables, formaciones de basalto y acuíferos salinos (Bashir et al., 2024; Rezk & Ibrahim, 2025).

El sistema CCS es la tecnología empleada para el almacenamiento seguro del dióxido de carbono a largo plazo en entornos confinados. Para optimizar esta fase, es clave emplear sistemas experimentales que permitan tanto la simulación de las condiciones del subsuelo como la visualización del fluido gaseoso. En este contexto, el concepto “FluidFlower” toma especial relevancia por ser una herramienta a escala de laboratorio con un panel transparente relleno de

arenas no consolidadas que simulan las complejidades del subsuelo (Eikehaug et al., 2024; Fernø et al., 2024a; Jammoul et al., 2024).

El FluidFlower ha sido empleado en diferentes investigaciones que buscan capturar los mecanismos de almacenamiento de CO₂ y analizar los efectos de la heterogeneidad geológica mediante simulaciones numéricas. Por ejemplo, Tian et al., (2024) empleó modelados numéricos para calibrar los parámetros petrofísicos (porosidad y permeabilidad) utilizando datos de concentración de trazadores y un modelo de baja dimensión (seis facies y dos fallas) y otro modelo con malla no estructurada y mayor resolución espacial. Asimismo, Saló-Salgado et al., (2024) propone una evaluación de la precisión de modelos numéricos en el almacenamiento de CO₂ comparándolos con observaciones experimentales en el FluidFlower. Los resultados señalan que estos modelos numéricos reproducen cualitativamente el CO₂ gaseoso, ácido carbónico y mezcla por convección. Aunque los modelados numéricos reproducen con fidelidad los patrones observados en el FluidFlower, al momento de aplicar a sistemas geológicos reales, es necesario considerar la heterogeneidad del medio natural, por ejemplo, la morfología de las capas reservorios y sellos, su variación granulométrica, distribución de facies, porosidad, permeabilidad que condicionan los mecanismos de entrapamiento del gas.

Actualmente, existe un conocimiento limitado sobre la influencia de las diferentes características físicas (forma, esfericidad y redondez) de los sedimentos de cuarzo super maduros y de río-playa en el almacenamiento de CO₂ en el país. Para lograr este propósito, se plantea utilizar el “FluidFlower”, con el objetivo de evaluar la influencia de las características físicas en muestras de sedimentos utilizando arenas de río y playa y mediante la construcción de una geometría base en un medio poroso a escala métrica para el análisis de su capacidad en el almacenamiento de CO₂.

1.1.Descripción del problema

El incremento de las concentraciones de CO₂ es uno de los gases que contribuyen e intensifican el calentamiento global y a pesar de las diferentes alternativas (energías renovables o mejoras en la eficiencia energética) utilizadas para disminuir las emisiones globales, las concentraciones de CO₂ se mantienen elevadas (p.ej., Europa presenta 548 GtonCO₂, América del Norte 496 GtonCO₂, China 273 GtonCO₂, India 63 GtonCO₂) (Claude, 2025). En este contexto, la captura, uso y almacenamiento de carbono, representa una alternativa eficaz para mitigar las emisiones de CO₂ (Liu et al., 2020). Sin embargo, uno de los principales desafíos en el geoalmacenamiento es garantizar su permanencia en el subsuelo.

Diversas propiedades físicas como la forma, redondez, esfericidad y distribución granulométrica afectan las condiciones petrofísicas de un entorno poroso como medio de retención de CO₂ (Glover & Luo, 2020). Estos parámetros son importantes para determinar el comportamiento de gas, su movilidad y almacenamiento en el subsuelo. En los antecedentes revisados se evidencia una limitación en los estudios orientados a la caracterización morfológica completa. Esta falta de información puede provocar incertidumbres en la selección de óptimos reservorios para el geoalmacenamiento, por ejemplo, sobrestimación de la capacidad del reservorio, posibles bloqueos de flujo.

Ecuador presenta formaciones geológicas con potenciales para almacenamiento de CO₂ pero la falta de una caracterización detallada de la información sobre la morfología de sus sedimentos y propiedades petrofísicas es limitada.

1.2. Justificación del problema

El incremento de CO₂ en la atmósfera debido a la combustión de fósiles es uno de los principales factores que contribuyen al deterioro climático. Las emisiones antropogénicas contribuyen de manera significativa al calentamiento global y sus múltiples consecuencias ambientales. Ante esta problemática, CCS es una solución viable, eficaz y necesaria para reducir las emisiones netas.

Sin embargo, la eficiencia de una formación geológica para retener fluidos gaseoso depende en gran medida de la selección adecuada de estratos rocosos que puedan actuar como reservorios seguros, estables y de alta capacidad. En este contexto, la morfología de las arenas que conforman estos reservorios sedimentarios representa un parámetro geológico crítico, pero poco explorado en el país. Propiedades como la redondez, esfericidad, rugosidad y distribución de tamaño de los granos tienen una influencia directa en la porosidad efectiva, la conectividad de los poros y la permeabilidad del medio, variables clave que determinan la capacidad de almacenamiento y la seguridad del confinamiento del CO₂.

Adicionalmente, en el marco sostenible del proyecto, se desea contribuir con los objetivos a los objetivos de desarrollo sostenible ODS 7.2, ODS 9.4, ODS 12.4 y ODS 13.2, pues en el país existe información limitada sobre la caracterización morfológica de las zonas con potencial para almacenar CO₂. La falta de información es una brecha en la planificación de alternativas sostenibles para la mitigación del cambio climático y disminución del calentamiento global.

Esta investigación propone un análisis detallado de cómo las características morfológicas del sedimentos afectan en la eficiencia y rendimiento del almacenamiento geológico para optimizar con el objetivo de optimizar materiales y métodos que permitan la mejora de la eficiencia energética de los procesos (ODS 7), modernizar la infraestructura industrial con tecnologías bajas

en carbono (ODS 9), disminuir el impacto ambiental de la producción mediante soluciones responsables (ODS 12) y también, contribuir directamente a las acciones globales para combatir el cambio climático (ODS 13) en el país.

Figura 1.
Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).



1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de las características físicas en muestras de sedimentos mediante la construcción de modelos a escala de laboratorio para el análisis de la capacidad de almacenamiento de CO₂.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar físicamente muestras de arenas de río-playa y de arenas de cuarzo supermaduras para determinar sus propiedades texturales.
- Analizar la capacidad de almacenamiento de CO₂ según las propiedades petrofísicas de muestras de río-playa y cuarzo supermaduras mediante la construcción de una geometría a escala de laboratorio para determinar el comportamiento del flujo en un material natural.

1.4.Marco teórico

En el capítulo 1, se presentan conceptos, técnicas y herramientas fundamentales que sustentan el desarrollo de esta investigación. Este capítulo incluye definiciones, procedimientos y métodos que permiten comprender el análisis de la morfología y su influencia en el entrapamiento de CO₂, dinámica del flujo, comportamiento y almacenamiento del fluido gaseoso en una formación geológica.

1.4.1. Captura y almacenamiento de carbono (CCS)

La captura y almacenamiento de CO₂, también conocida como “CCS (Carbon capture and storage)”, por sus siglas en inglés, constituye una herramienta clave para la transición energética y consiste en la separación del CO₂ provenientes de fuentes industriales y energéticas, su transporte hacia un lugar de almacenamiento y su aislamiento en espacios aislados a largo plazo (Metz et al., 2005).

El CO₂ se comprime y transporta para su almacenamiento en formaciones geológicas, en el océano, en carbonatos o para su uso en procesos industriales (Figura 2). Entre las grandes fuentes puntuales de CO₂, se incluyen las grandes instalaciones de energía de combustibles fósiles o biomasa, industrias emisoras de CO₂, producción de gas natural y plantas de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles.

Figura 2.

Representación esquemática de la captura, transporte e inyección de CO_2 en yacimientos de gas vacíos.



Nota: Obtenido de EBN Energising the transition.

1.4.2. Métodos utilizados para la inyección de CO_2

Existen diferentes opciones para el almacenamiento de CO_2 , las cuales se distinguen entre sí, según el entorno poroso en el que se confinan y el proceso empleado. Entre las alternativas más analizadas se encuentran:

- **Acuíferos salinos profundos:** corresponden a son rocas sedimentarias saturadas con aguas de formación que contienen altas concentraciones de sales disueltas (Metz et al., 2005). Estas formaciones se encuentran a profundidades mayores a 800 m permitiendo el estado supercrítico del CO_2 . El CO_2 es inyectado en la roca reservorio, desplazando el agua salina en donde el fluido gaseoso queda atrapado por las capas impermeables, mineralización entre sales con CO_2 y disolución minimizando las fugas. La capacidad mundial de almacenamiento de CO_2 de los acuíferos salinos profundos oscila entre 100 y 10 000 Gton CO_2 (Bruant et al., 2002).
- **Yacimientos de petróleo y gas agotados:** corresponden a reservorios naturales los cuales almacenaron hidrocarburos durante millones de años. Estos procesos consisten en separar el CO_2 y el H_2S del flujo de petróleo o gas producido, son comprimidos y transportados

por tuberías hasta un pozo de inyección para su confinamiento en una formación (Vishal & Singh, 2016)

- Inyección en capas de carbón no explotables: es un proceso mediante la perforación de un pozo y la inserción de una sonda de inyección (pozo de inyección), que permite bombear CO_2 a la veta. Estas vetas de carbón ubicadas a grandes profundidades (no rentables para la minería) pueden utilizarse para este propósito (Perera, 2017). En el carbón, el 98 % del CO_2 se almacena en fase adsorbida (la adsorción es el principal mecanismo de almacenamiento de gas) y solo una pequeña fracción se almacena como gas libre. Por lo tanto, el CO_2 existe de forma más estable en las vetas de carbón profundas, con un menor riesgo de fuga a la superficie.
- Inyección en rocas basálticas o ultramáficas: se refiere a la fijación de CO_2 mediante óxidos alcalinos y alcalinotérreos, como el MgO y el CaO presentes en rocas ultramáficas (Gunnarsson et al., 2018) y las reacciones químicas entre los materiales y el CO_2 producen carbonato de magnesio (MgCO_3) y el carbonato de calcio (CaCO_3), comúnmente conocido como la caliza (Metz et al., 2005)

1.4.3. Mecanismos de entrapamiento de CO_2

Los mecanismos de entrapamiento de CO_2 pueden clasificarse según la forma en la que este fluido gaseoso queda atrapado en las formaciones geológicas, y se agrupan en dos tipos: físicos (entrapamiento estático y entrapamiento residual de gas) y químicos (solubilidad, mineralización y adsorción) (Ballesteros et al., 2007).

- Entrapamiento estático: consiste en el almacenamiento estratigráfico y estructural de las formaciones geológicas. El entrapamiento estructural ocurre cuando la roca reservorio está cubierta por una capa impermeable o una capa sello. El entrapamiento estratigráfico

se basa principalmente en la heterogeneidad del medio poroso, cuando el CO₂ se desplaza por el entorno poroso, puede toparse con unidades estratigráficas de menor porosidad y permeabilidad, dando lugar a la formación de pequeñas acumulaciones de CO₂ (Raza et al., 2016).

- Capilaridad: es el entrampamiento por capilaridad ocurre cuando CO₂ se almacena tras la presencia de barreras capilares (Gilmore et al., 2020). El CO₂ es impulsado por las fuerzas de flotación y viaja en el medio poroso cuya presión, permeabilidad y entrada capilar varían, la presión capilar

$$P_c = \frac{2 * \gamma * \cos(\theta)}{r} \quad 1$$

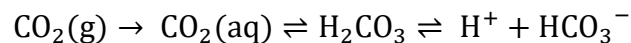
P_c= presión capilar (Pa o N/m²)

γ = tensión superficial del líquido (N/m)

θ = ángulo de contacto entre el líquido y la pared del capilar

r = radio del tubo capilar (m)

- Disolución: es un proceso a largo plazo que ocurre cuando el CO₂ se disuelve en fluidos subterráneos y reacciona químicamente con la matriz rocosa (Raza et al., 2016). En este tipo de entrampamiento el CO₂ disuelto no puede migrar a la superficie, no obstante, puede moverse si el agua se desplaza. Ejemplo de la reacción-



- Reacción mineralógica: corresponde a la reacción entre los iones de bicarbonato/carbonato que se han formado en la disolución con otros minerales de las rocas cuya composición presenta calcio magnesio o hierro. El CO₂ es disuelto y se fija químicamente con otros minerales para formar minerales sólidos, los cuales, son estables durante millones de años. Ejemplo de la reacción

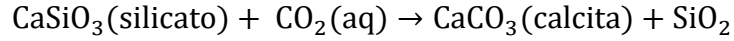
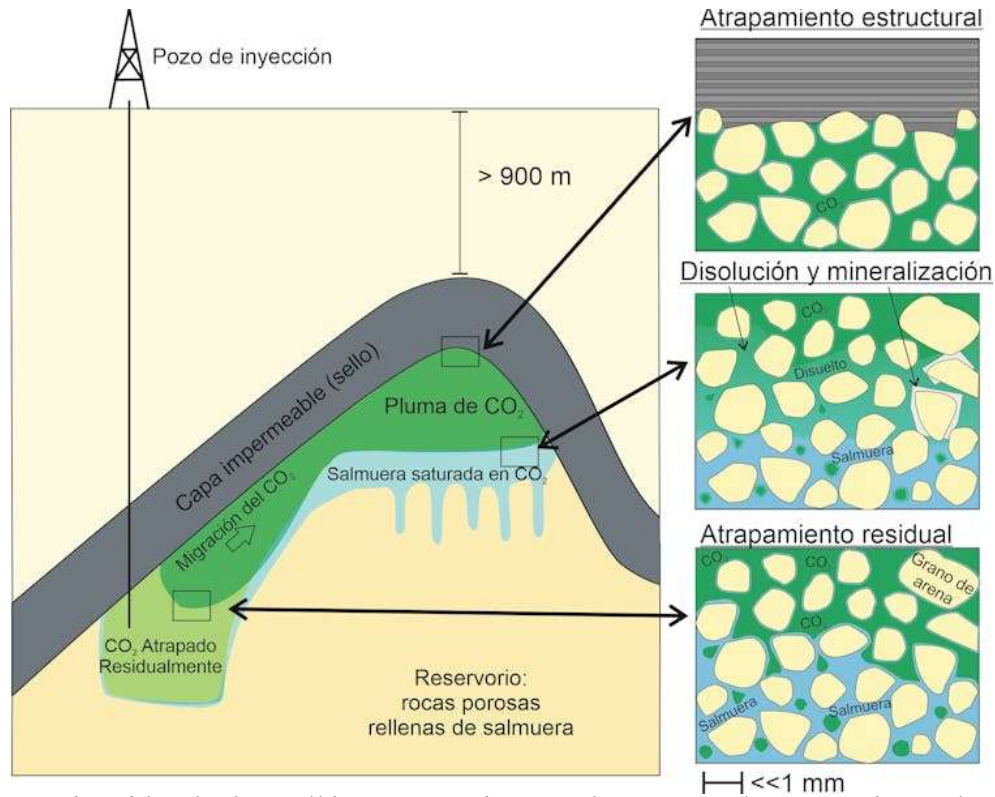


Figura 3.
Mecanismos de atrapamiento de CO_2 en el subsuelo.



Nota: Obtenido de <https://theconversation.com/captura-y-almacenamiento-de-co-sub-2-sub-por-que-no-debemos-temer-a-las-fugas-133274>.

1.4.4. Nueva tecnología experimental: FluidFlower

En las últimas décadas, el interés por el estudio del almacenamiento geológico de CO_2 ha aumentado de manera notable debido a la necesidad de reducir las emisiones de CO_2 con el fin de mitigar el cambio climático de acuerdo con los reportes del IPCC. Frente a este desafío, una de las estrategias de la tecnología de CCS es el uso de un sistema experimental denominado “FluidFlower”.

Este sistema desarrollado por la Universidad de Bergen (Noruega), consiste en sistema cuasi 2D transparente con puertos de inyección y extracción; Nordbotten et al., (2024), diseñaron un sistema experimental a escala métrica para estudiar los procesos de almacenamiento geológico de CO₂ operado bajo presión atmosférica, con inyección controlada de CO₂ y trazadores visuales.

El sistema MiniFlower constituye una infraestructura experimental reciente, diseñada para estudios en laboratorio. Consiste en un panel de acrílico con dimensiones de 20 x 30 x 1 cm y un volumen útil de 500 mL (Eikehaug et al., 2024). Este dispositivo incorpora cuatro puertos: tres de inyección, dispuestos equidistantemente en la parte inferior, separados 10 cm desde el centro, y un puerto de extracción ubicado en la parte superior. Estos puertos están conectados a un conjunto de válvulas y a una bomba peristáltica, lo cual permite la introducción controlada de fluidos en un medio poroso.

El MiniFlower ha sido desarrollado para reproducir configuraciones geológicas complejas como fallas, domos y antiformes mediante el uso de arenas no consolidadas de granulometría inferior a 2 mm. Asimismo, facilita la simulación de inyecciones de CO₂ bajo condiciones controladas y el análisis del comportamiento de flujo multifásico (Eikehaug et al., 2024). Esta herramienta ha sido ampliamente aplicada en investigaciones para la visualización del desplazamiento del CO₂, la validación de modelos numéricos con datos experimentales, el ajuste de parámetros en simulaciones, y el desarrollo y calibración de gemelos digitales (digital twins) (Eikehaug et al., 2024; Nordbotten et al., 2024; Tian et al., 2024).

Figura 4.
Herramienta a escala de laboratorio "FluidFlower"



Nota: Obtenido de Eikehaug et al., (2024)

En los experimentos de modelado físico del movimiento de CO_2 en medios porosos utilizan indicadores ácido-base para una mejor visualización del patrón del fluido gaseoso. El azul de bromotimol ($\text{C}_{27}\text{H}_{28}\text{Br}_2\text{O}_5\text{S}$) es un indicador de pH cuyo rango de colores según la acidez o basicidad del medio varían (Tabla 1).

Tabla 1.
Descripción de las facies carbónicas y la coloración del pH.

Color	pH	Descripción
	5	CO_2 (g)
	5.2-5.5	H_2CO_3
	6-7.6	Zonas de transición

Por otro lado, diferentes investigaciones sobre CCS emplean la tecnología FluidFlow desde aspectos como, simulaciones para predecir la migración del CO₂ empleando modelos numéricos globales, validaciones de simuladores empleando datos de FluidFlow, análisis del impacto de diferentes modelos en la precisión de las predicciones hasta análisis de la reproducibilidad y capacidad predictiva en diferentes geometrías empleando esta herramienta.

Fernø et al., (2024) evaluaron la variabilidad física entre inyecciones de CO₂ en geometrías falladas en el FluidFlow y observaron variaciones en el patrón de migración entre experimentos inducida por fallas geológicas, cuantificaron la dispersión especial de la pluma de CO₂ empleando el software DarSIA y realizaron una validación cruzada entre geometrías análogas y modelos calibrados. Por su parte, Wapperom et al., (2024) compararon dos esquemas TPFA (Two-Point Flux Approximation) vs MPFA (Multi-Point Flux Approximation para evaluar el movimiento del CO₂ entre las celdas de los modelos simulados.

Los resultados indican que el modelo TPFA en geometrías angulosa tiende a simplificar el cálculo del flujo en celdas, lo que provoca una sobrestimación del entrampamiento de CO₂, mientras que, el modelo MPFA usa información de múltiples puntos alrededor para estimar el flujo con mayor precisión y Captura anisotropía (cuando la permeabilidad varía con la dirección) y heterogeneidad (cuando cambia en el espacio).

Asimismo, Green et al., (2024), modelaron experimentos realizados con el sistema FluidFlow y diferentes trazadores químicos para inferir la permeabilidad del medio poroso y analizar las incertidumbres para validar los procesos físicos como, disolución, mezcla y entrampamiento de CO₂. Adicionalmente, Jammoul et al., (2024) investigaron la evolución de la pluma de CO₂ utilizando el simulador IPARS en el montaje FluidFlow, destacando que la

incertidumbre en la caracterización petrofísica afecta significativamente la predictibilidad de los modelos.

Adicionalmente, Haugen et al., (2024) cuantificaron la variabilidad física entre múltiples inyecciones en geometrías con fallas, encontrando diferencias relevantes en los patrones de migración, lo cual pone en evidencia la sensibilidad del sistema incluso bajo condiciones controladas. También, Keilegavlen et al., (2024) propusieron un gemelo digital para FluidFlow, integrando simulaciones físicas con corrección basada en observaciones experimentales en tiempo real, logrando mejorar la concordancia entre modelo y realidad.

Por el contrario, Tian et al., (2024) llevaron a cabo un estudio de History Matching para el benchmark FluidFlow, utilizando métodos adjuntos y gradientes para ajustar modelos de diferente complejidad, y demostraron que la sensibilidad a propiedades como la permeabilidad condiciona la capacidad de predicción.

Finalmente, Saló-Salgado et al., (2024) realizaron una comparación directa entre simulaciones y experimentos de CO₂ en FluidFlow, evidenciando que, aunque las simulaciones reproducen adecuadamente la migración observada durante la inyección, su precisión disminuye con el tiempo. Además, resaltaron que incluso pequeñas variaciones en la permeabilidad y presión capilar pueden alterar significativamente los resultados.

1.4.5. Propiedades físicas de los sedimentos

Existen diversos parámetros que permiten describir la forma de las partículas, que abarcan los aspectos de su morfología externa, esfericidad, forma, redondez y textura superficial. La *forma* de una partícula hace referencia a la configuración a la geometría del grano y se considera la forma tridimensional del grano (Krumbrein & Sloss, 1951).

La **redondez** describe que tan redondeados están los bordes o las esquinas de los granos de un sedimento, mientras que, la **esfericidad** describe la medida en que los granos se aproximan a una esfera. Existen relaciones matemáticas para calcular la esfericidad basadas en la medición de tres ejes ortogonales y las longitudes relativas de los ejes de las partículas (Boggs, 2006).

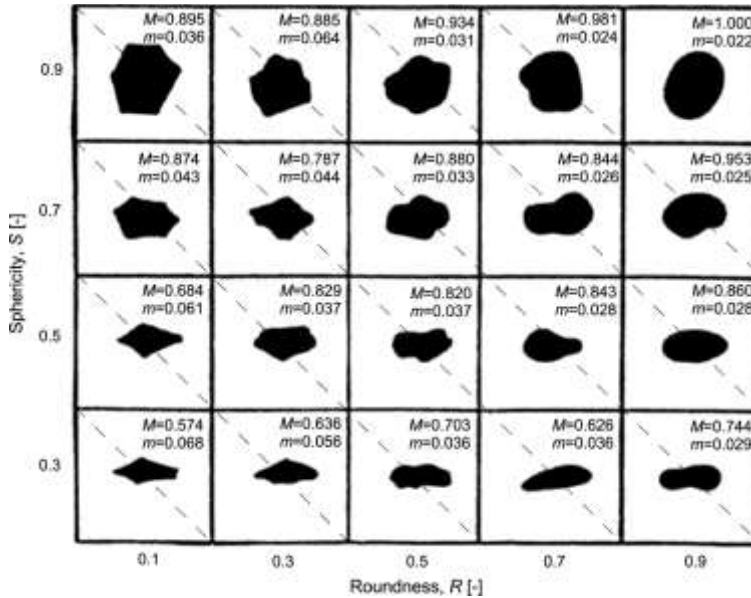
Se parte del principio teórico de que un grano se aproxima más a la forma de una esfera cuando sus tres ejes ortogonales (corto, intermedio y largo) son similares. Por ejemplo, una expresión para calcular la esfericidad propuesta por Krumbein, (1941) es:

$$\Psi_1 = \sqrt[3]{\frac{D_S D_I}{D_L^2}} \quad 2$$

donde D_S es la longitud del eje corto de la partícula, D_I es la longitud del eje intermedio y D_L a la longitud del eje largo. Para evaluación visual de las características de las partículas, Krumbein & Sloss, (1951) desarrollan un esquema de clasificación morfológica para aproximar la redondez y esfericidad, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Diagrama de redondez y esfericidad propuesto por Krumbein y Sloss (1951).



Nota: Obtenido de Guida et al., (2020)

La porosidad es definida como la relación entre el volumen poroso y el volumen total de la roca. Matemáticamente viene expresada como:

$$n = e / 1 + e \quad 3$$

$$e = V_v / V_s \quad 4$$

$$V_v = V_f - V_s \quad 5$$

Donde: V_f es el volumen del recipiente, V_v es el volumen de vacío, V_s corresponde al volumen del sólido, e es relación de vacíos y n es la porosidad.

Según la interconexión del volumen poroso, la porosidad se define en tres porosidades: absoluta, efectiva y no efectiva. La porosidad absoluta corresponde al volumen poroso de la roca esté o no interconectado. La porosidad efectiva es el volumen poroso interconectado con el volumen de la roca e indica los espacios disponibles que tiene la roca para almacenar y mover fluidos y la porosidad no efectiva es la diferente entre la porosidad absoluta y efectiva.

La permeabilidad es la capacidad que tiene el medio poroso para permitir el flujo de fluidos. Para flujo lineal la ley de Darcy dice que la velocidad de un fluido homogéneo en un medio poroso es proporcional a la fuerza de empuje (gradiente de presión) e inversamente proporcional a la viscosidad. Darcy requiere que el fluido se adhiera a los poros de la roca, sature 100% el medio y el flujo sea homogéneo y laminar (Escobar, 2012) y viene dada por la siguiente expresión:

$$k = \left(\frac{V * L * C_v}{A * H * t} \right) \quad 6$$

Donde, Donde, V : volumen de agua descargado, L : longitud del espécimen,
 A : área de la sección transversal del espécimen, h : carga hidráulica,
 t : tiempo que dura la descarga y C_v : coeficiente de viscosidad del agua

La gravedad específica corresponde a la propiedad física que mide la densidad del suelo en relación con la densidad del agua, permite calcular la porosidad y capacidad de retención de agua del suelo. Se expresa con la siguiente ecuación (7)

$$G_t = \frac{W_s}{W_{mw} - (W_{mws} - W_s)} \quad 7$$

Donde, W_s es el Peso de la muestra seca, W_{mw} es el Peso de Frasco, sedimento y agua y W_{mws} es = Peso de Matraz, sedimento y agua.

1.4.6. Caracterización morfológica de los sedimentos

La caracterización morfológica corresponde al estudio de las características físicas de los sedimentos, comprende el análisis de las formas, estructuras y texturas de minerales, rocas, sedimentos o estructuras geológicas como, formas del relieve, fallas o pliegues.

La caracterización morfológica permite evaluar el secuestro mineral del CO_2 ya que determina la formación de carbonatos debido a las interacciones químicas con otros minerales. Asimismo, permite analizar la capacidad de almacenamiento del CO_2 en formaciones geológicas. Existen diferentes metodologías para el análisis de la caracterización morfológica:

1.4.6.1. Análisis granulométrico por tamizado

Es uno de los métodos ampliamente utilizados en la caracterización de sedimentos para obtener fracciones arenosas (0.063-2.00 mm). Este método utiliza diferentes tamices con aberturas menores para separar las partículas de los sedimentos según su tamaño.

Los sedimentos se someten a una vibración mecánica durante 15 minutos, posterior a esto, las fracciones arenosas retenidas por tamiz se pesan para calcular el porcentaje de retenido respecto al total de sedimentos analizados.

Capítulo 2

Este capítulo abarca los métodos y procesos realizados para la obtención de las muestras geológicas para las pruebas de almacenamiento geológico, así como, el detalle de los métodos empleados para realizar la caracterización morfológica de sedimentos, ensayos de porosidad, permeabilidad e inyección de CO₂. Este enfoque metodológico permitió una comparación sistemática de las propiedades físicas de 2 tipos de reservorios (arenas de cuarzo supermaduras y arenas de río-plata), particularmente en lo referente a su forma, redondez y esfericidad.

2. Metodología

El presente estudio se desarrolló en 5 fases: (I) recolección de muestras en campo, (II) clasificación granulométrica por tamizado, (III) caracterización morfológica de partículas (IV) ensayos de propiedades físicas (gravedad específica, porosidad y permeabilidad) y (V) pruebas de inyección de CO₂.

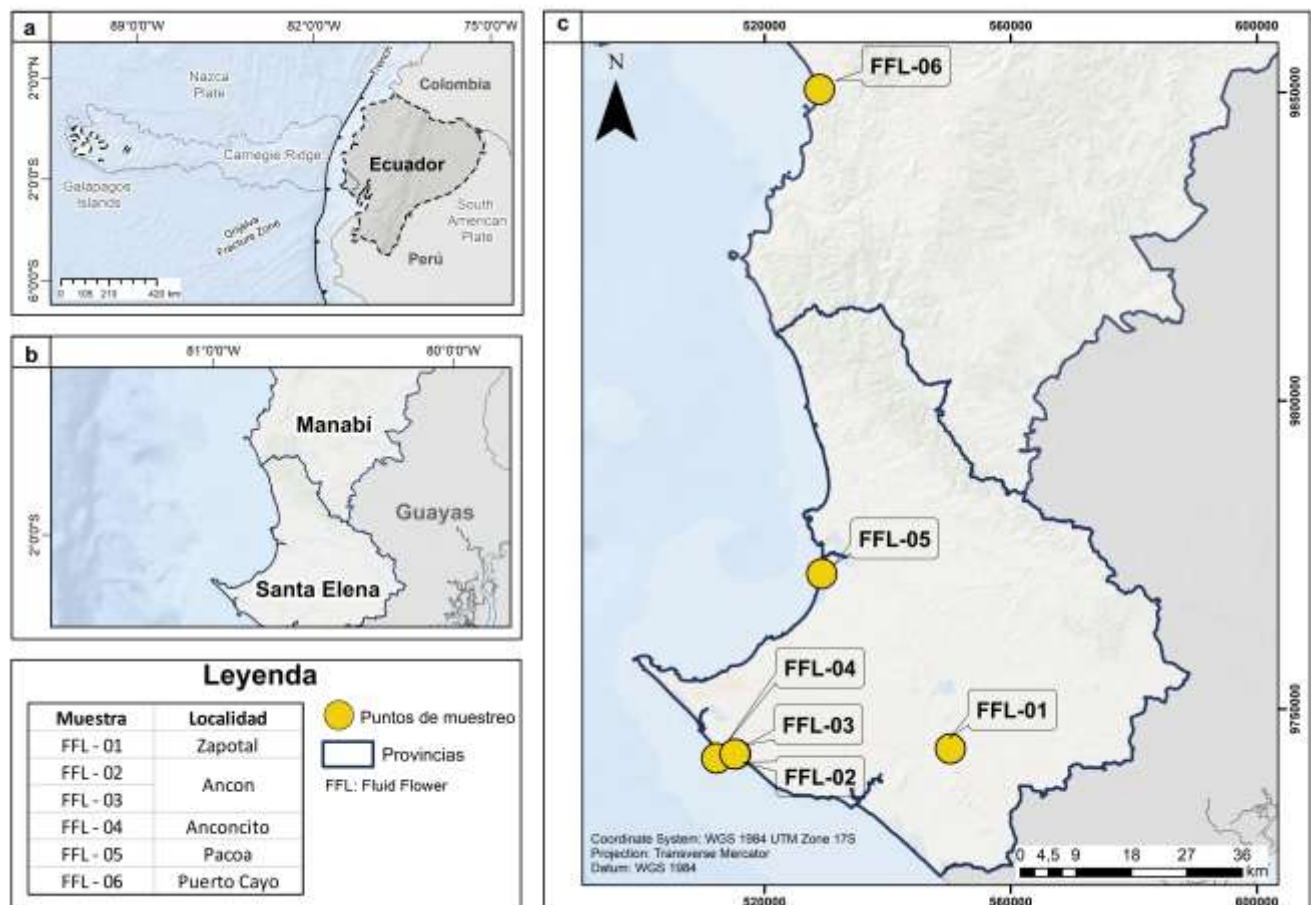
Esta metodología permitió el análisis comparativo de las características granulométricas y morfológicas de arenas de cuarzo supermaduras y arenas de origen fluvio-litoral (río-playa), empleando metodologías estandarizadas para su caracterización y posterior evaluación del almacenamiento de CO₂. Es importante recalcar que, las arenas de cuarzo supermaduras fueron suministradas por la empresa AGSCO, presentan una pureza química destacable (99.8% SiO₂) y químicamente inertes que las hacen ideales para estudios controlados. Las arenas de cuarzo supermaduras presentan granulometrías bien seleccionadas y de alta homogeneidad.

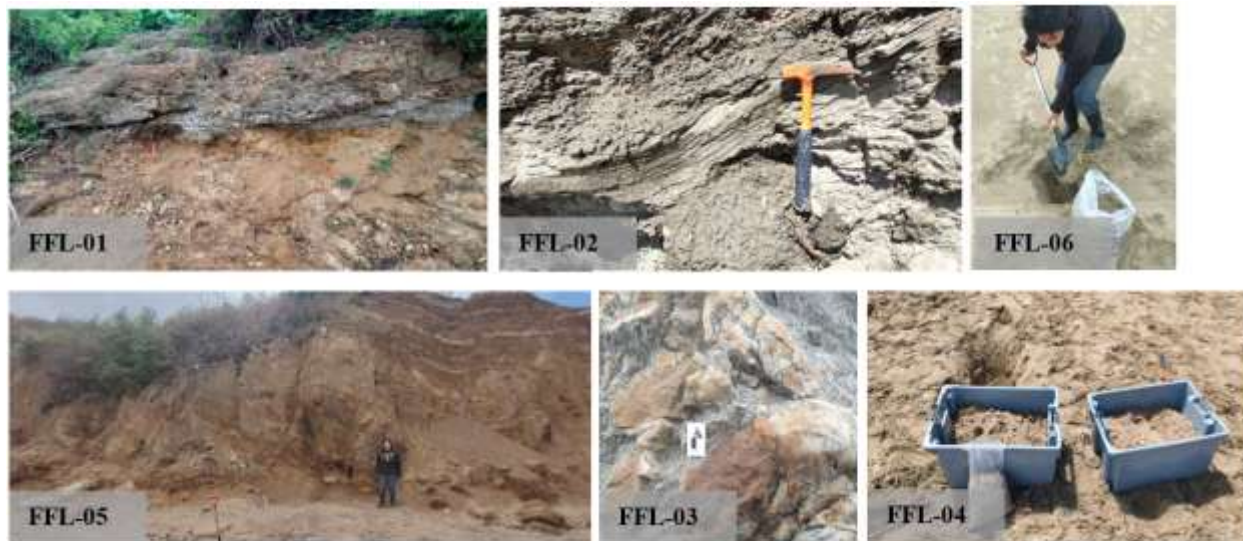
2.1 Fase 1: Recolección de muestras en campo

La primera fase consistió en recolectar el material de ambientes fluvio-litorales de la zona de Puerto Cayo y los afluentes del río Jipijapa, ubicados en las provincias de Manabí y Santa Elena (Ecuador) (). La selección de estos sitios respondió a tres criterios fundamentales: (I) su origen natural no alterado, (II) la posibilidad de obtener granulometrías comparables a las arenas de

cuarzo, y (III) la evaluación del efecto de la morfología en sistemas porosos aplicables al geoalmacenamiento. Un total de 6 muestras (1 de río-playa, 5 de afloramiento y playa) fueron recolectadas, cuyas litologías variaron desde conglomerados, areniscas gruesas a medias hasta limolitas (Fm. Zapotal), también, lutitas grises a negras, limolitas y capas arenosas de grano medio con presencia de fragmentos líticos (Grupo. Ancón), así mismo areniscas de grano medio a grueso lutitas grises oscuras a verdosas con fragmentos calcáreos de moluscos y peces (Pacoa).

Figura 7. Mapa de los puntos de muestreo en las provincias de Manabí y Santa Elena. Ubicación general del Ecuador (a). Ubicación de las provincias de la zona de estudio (b). Ubicación local de los puntos de muestreo (c).





2.2 Fase 2: Clasificación granulométrica según la norma ASTM E-11

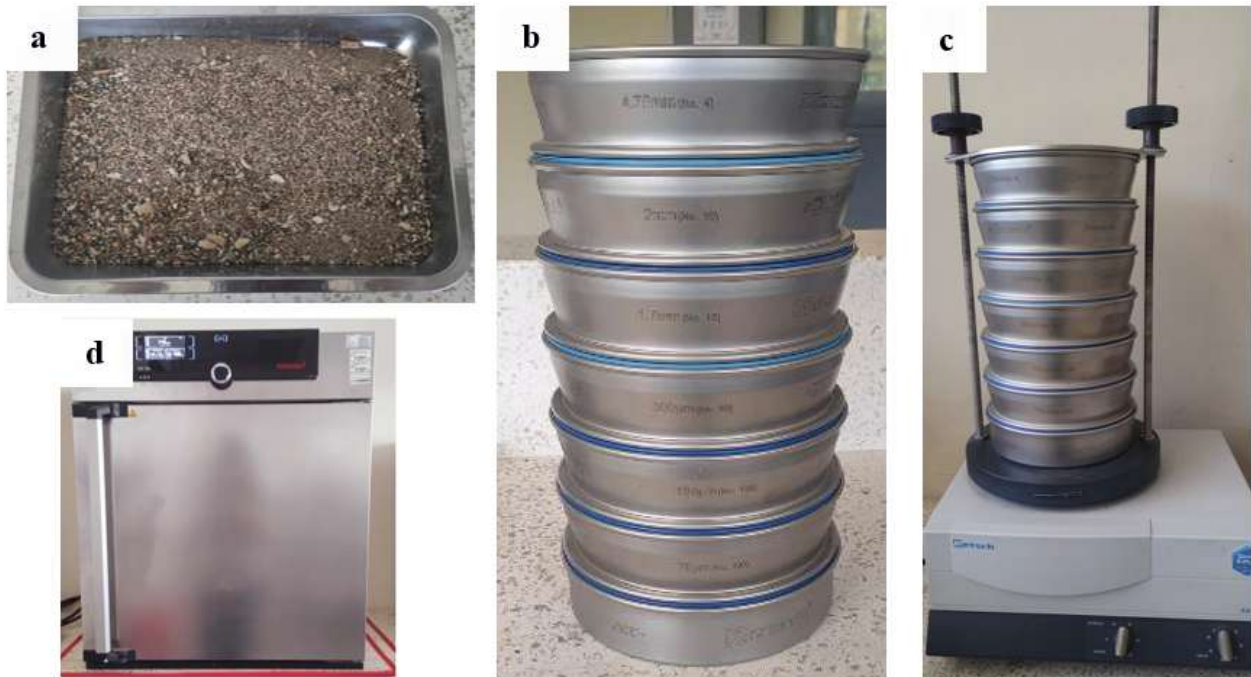
La segunda fase consistió en separar y clasificar las fracciones granulométricas según el tamaño de su partícula. La distribución granulométrica se determinó siguiendo los protocolos establecidos en la norma ASTM E-11 (ASTM International, 2024), empleando la clasificación basada en la escala de Wentworth y los tamices N. ° 4 (4.75mm), N. ° 10 (2.00mm), N. ° 14 (1.40mm), N. ° 18 (1.00mm), N. ° 35 (0.50mm), N. ° 60 (0.25mm) y fondos ajustados en orden de malla decreciente hacia abajo. Para garantizar la representatividad del muestreo, se procesaron de 1-2 kg en tres fracciones granulométricas específicas: arenas gruesas (1.40-2.00 mm), medias (0.25-0.50 mm) y finas (0.25-0.125 mm).

Las muestras fueron sometidas a deshidratación en horno a 110°C durante 72 horas para eliminar toda humedad residual. Posteriormente, se realizó el análisis granulométrico mediante tamizado, utilizando una serie de mallas normalizadas según ASTM-E11.

Solo se incluyeron aquellas muestras que cumplieron estrictamente con los rangos granulométricos definidos, descartándose las que presentaban discontinuidades o contaminantes.

Las arenas de río-playa muestran una selección moderada a pobre, con clastos que varían desde subangulosos hasta redondeados y una composición mineralógica heterogénea.

Figura 8. Equipos empleados para la obtención de las arenas gruesas, medias y finas. Muestra de sedimentos (a), tamices (b) y tamizadora analítica (c), marca AS 200 Basic. Rango de medida 20\mu m -25 mm. Horno: marca Memmert (d).



Una vez obtenida las muestras empleadas para las pruebas de inyección de CO₂, se establecieron abreviaturas para una mejor comprensión de la terminología de las arenas (Tabla 2).

Tabla 2.
Abreviaturas de las tipologías de arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.

Abreviatura	Descripción
GCS	Arenas gruesas de cuarzo supermaduras
MCS	Arenas medias de cuarzo supermaduras
FCS	Arenas finas de cuarzo supermaduras
GRP	Arenas gruesas de río-playa

MRP	Arenas medias de río-playa
FRP	Arenas finas de río-playa

Nota: las capas GCS y GRP representan los reservorios en el cual se inyectó el CO₂, las MCS y las MRP representan las arenas de transición empleadas para impedir una mezcla de granulometría y las arenas FCS y FRP corresponden a las capas sello.

2.3 Fase 3: Caracterización morfológica de muestras geológicas y arenas de río-playa

La caracterización morfológica fue realizada según la metodología empleada por Fait et al., (2023). La esfericidad y redondez de 1200 partículas de arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa (400 granos mínimo) fueron representadas empleando la escala de Krumbrein & Sloss, (1951). Una malla de 20 x 20 partículas de las tipologías de arenas (gruesas, medias y finas) fue construida en fondos negros y blancos (según el contraste de la partícula) (Figura 9).

Posteriormente, fueron tomadas fotografías de cada malla hasta analizar mínimo 400 granos por cada muestra. Las imágenes obtenidas fueron analizadas mediante el software libre Image-J 1.54V (Rasband, 2023) para obtener los parámetros morfométricos de forma, perímetro, esfericidad, redondez y área de cada partícula. A continuación, se muestra un ejemplo del proceso realizado para la caracterización de las arenas GCS y GRP.

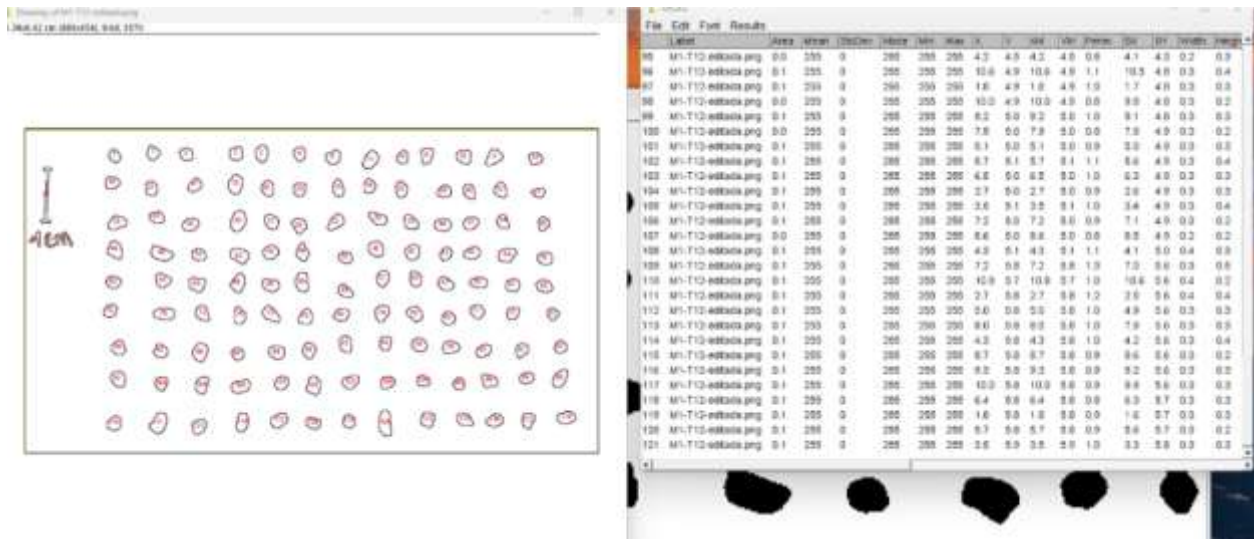
Figura 10.

Partículas de arenas GRRP (izquierda) y partículas de arenas GCS (derecha). Nótese el cambio de fondo debido al contraste de colores de cada partícula. Es decir, fondo blanco para partículas de color u oscuras y fondo negro para partículas blancas.



Figura 9.

Parámetros morfométricos de 107 partículas



Nota: el resultado final corresponde a una Imagen .tiff en donde se aprecia un conteo de cada partícula procesada en el software y una tabla descargable. xlxs. Es importante mencionar que, este proceso debe ser realizado para las capas reservorio, transición y sello de las tipologías de arenas hasta obtener como mínimo 2400 partículas analizadas.

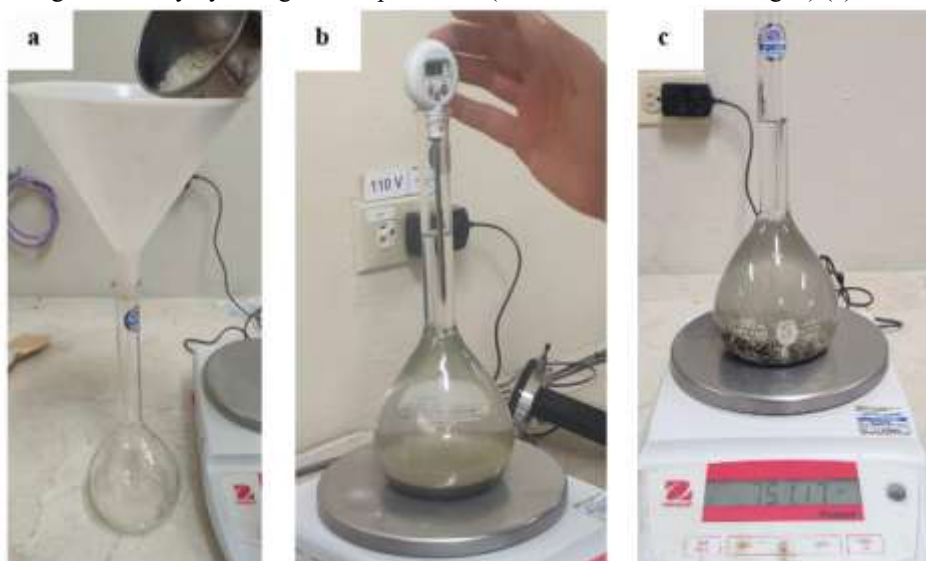
2.4 Fase 4: Ensayos de propiedades físicas (gravedad específica, porosidad y permeabilidad)

La gravedad específica de las arenas sintéticas y naturales se calculó según la norma ASTM D-854 (ASTM International, 2023). El procedimiento experimental fue orientado a determinar la gravedad específica de la fracción de arenas que pasó por el tamiz N°4. Para ello, la muestra fue sometida a un proceso de secado en horno durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C.

Una vez deshidratada, fue determinado el peso del matraz volumétrico en estado seco y posteriormente con agua destilada hasta alcanzar la marca de calibración. A continuación, fueron introducidos 100 g de la muestra seca (previamente tamizada), en el frasco volumétrico. La muestra fue saturada cuidadosa y posteriormente, su peso fue registrado. La gravedad específica fue determinada empleando la ecuación 7 de la sección 1.

Figura 11.

Introducción de la muestra (100 g) al frasco volumétrico (a), control de la temperatura del agua de ensayo y se registró de peso final (muestra de sedimento + agua) (c).



Nota: Frasco volumétrico marca 1695-22 Elicrom $\pm 0.144\text{mL}$, balanza de precisión

Ohaus Piones Cp4102 de 4 kilos $\pm 0.01\text{g}$ y termómetro $\pm 0.5^\circ\text{C}$

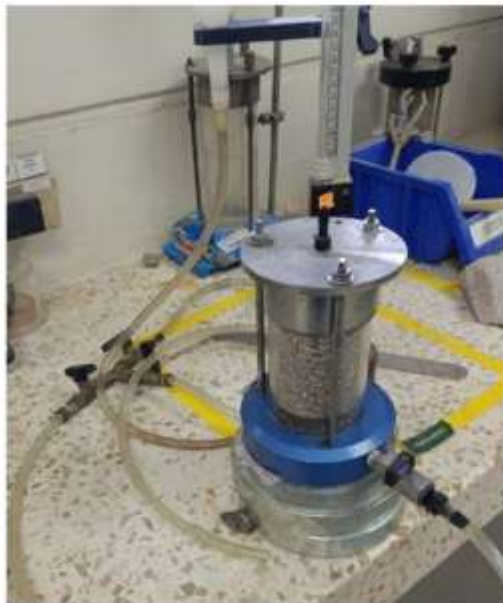
La permeabilidad de las muestras de arenas no consolidadas tanto sintéticas como naturales fue determinada mediante el método de carga constante, conforme a lo establecido en la norma ASTM

D2434-19 (ASTM International, 2019). Este procedimiento se basa en la aplicación de una presión constante al fluido, de manera que se mantiene un gradiente hidráulico uniforme durante su paso a través de la muestra, permitiendo así la distribución continua del agua por los poros del material granular. Inicialmente, la muestra fue sometida a un proceso de secado a 60 °C hasta alcanzar un estado de humedad residual nulo.

A continuación, fue verificado que el porcentaje de material pasante por el tamiz N.º 200 fuera inferior al 10 % del total de la muestra, requisito esencial para evitar interferencias en la medición de permeabilidad. La muestra preparada fue colocada cuidadosamente en la cámara del permeámetro, en donde fue compactada con un apisonador, con el objetivo de evitar la formación de vacíos que pudieran alterar los resultados. Una vez asegurada la disposición homogénea del sedimento, fue saturada completamente bajo una carga constante, se registró el tiempo necesario para el llenado de la probeta y se calculó la permeabilidad mediante la ecuación 6.

Figura 12.

Permeámetro armado utilizado para los experimentos de permeabilidad (izq.) y nivel de referencia utilizado para saturar la muestra empleando el método de carga constante $h=30$ cm (der.).



Para el desarrollo de este estudio, se seleccionó una geometría similar a una trampa estructural conocida como “antiforme” con dos capas superpuestas. La elección de esta estructura se debe a que es un entorno cerrado que emula condiciones de reservorio reales, presenta una menor susceptibilidad a las deformaciones y es ideal para albergar fluidos gaseosos como el CO₂.

Se empleó una única geometría experimental construida con diferentes tipos de arenas (de cuarzo supermaduras y de río-playa) para analizar los patrones de flujo, comparar la morfología de las arenas y su influencia en los mecanismos de almacenamiento de CO₂ reduciendo los efectos debido a la geometría.

Para el cálculo de la presión litostática se estableció una equivalencia para aproximar los espesores de las capas del antiforme simulando un pozo de 1km de profundidad y se empleó la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Lithostatic}} = P_{\text{Coarse}} + P_{\text{Medium}} + P_{\text{Fine}}$$

$$P_{\text{Lithostatic}} = (\rho_{\text{Water}} * g) (G_{\text{Coarse}} * h_{\text{Coarse}} + G_{\text{Medium}} * h_{\text{Medium}} + G_{\text{Fine}} * h_{\text{Fine}})$$

Donde, G_{Coarse} es la gravedad específica de las arenas CRB, G_{Medium} es la gravedad específica de las arenas MRB y G_{Fine} representa la gravedad específica de las FRB, h_{gruesas} es el espesor de las CRB, h_{medias} es el espesor de las arenas MRB y h_{finas} es el espesor de las arenas FRB, ρ_{Water} es la densidad del agua (1000 kg/m³) y g es la gravedad (9.8 m/s²).

La presión litostática fue calculada mediante una equivalencia basada en la profundidad reservorio, ubicado a 1km de profundidad. Para ello, fue establecida una relación que aproximó los espesores de las capas de un antiforme simulando un pozo de esa misma de profundidad. La porosidad fue calculada utilizando el método volumétrico según la norma ASTM -D7263 (ASTM International, 2021).

El procedimiento abarca la medición del volumen de vacíos de un material granular a partir del volumen desplazado del fluido. Las configuraciones geométricas S y N fueron replicadas 10 veces en el miniFlow y mediante la medición directa, se obtuvo las masas requeridas para elaborar cada capa de la geometría en un volumen conocido.

La configuración geométrica está conformada por 3 capas de arenas gruesas (~12 cm), medias (~1.5 cm) y finas (~3.5 cm) que simulan las arenas de reservorio, transición y sello, respectivamente (Figura 14). Para fines de este estudio, se definen dos geometrías de igual forma y diferente composición. La geometría representa un antiformal compuesto por arenas de cuarzo supermaduras y la geometría N es un antiformal elaborado con arenas de río-playa. La granulometría y masas (M_s) utilizadas para la construcción de cada formación geológica (Tabla

3).

Figura 13.
Ejemplo de geometría S.



Tabla 3.

Masa de las arenas utilizadas para la construcción de la geometría S y N con su respectivo tamaño de grano.

Arenas	Clasificación granulométrica	Geometría S	Geometría N
Gruesas	1.40-2.00	534.54	454.58
Medias	0.25-0.50	88.23	73.36
Finas	0.25-0.125	294.95	284.43

Nota: Datos obtenidos luego de replicar 20 veces la construcción de la geometría.

2.5 Fase 5: Inyección de CO₂ en arenas gruesas de cuarzo supermaduras y de río-playa

El procedimiento experimental para la inyección de CO₂ en las geometrías S y N elaboradas en el miniFluidFlow. Para la construcción de las geometrías S y N fue empelada una espátula con forma de "V", la cual permitió una mejor distribución de las arenas en el miniFluidFlow.

La disposición de los estratos de cada arena se basó en la definición de la formación geológica a replicar previamente establecida. Los experimentos de inyección de CO₂ fueron realizados a condiciones estándar de laboratorio (1 atm, 25 ± 1.5 °C).

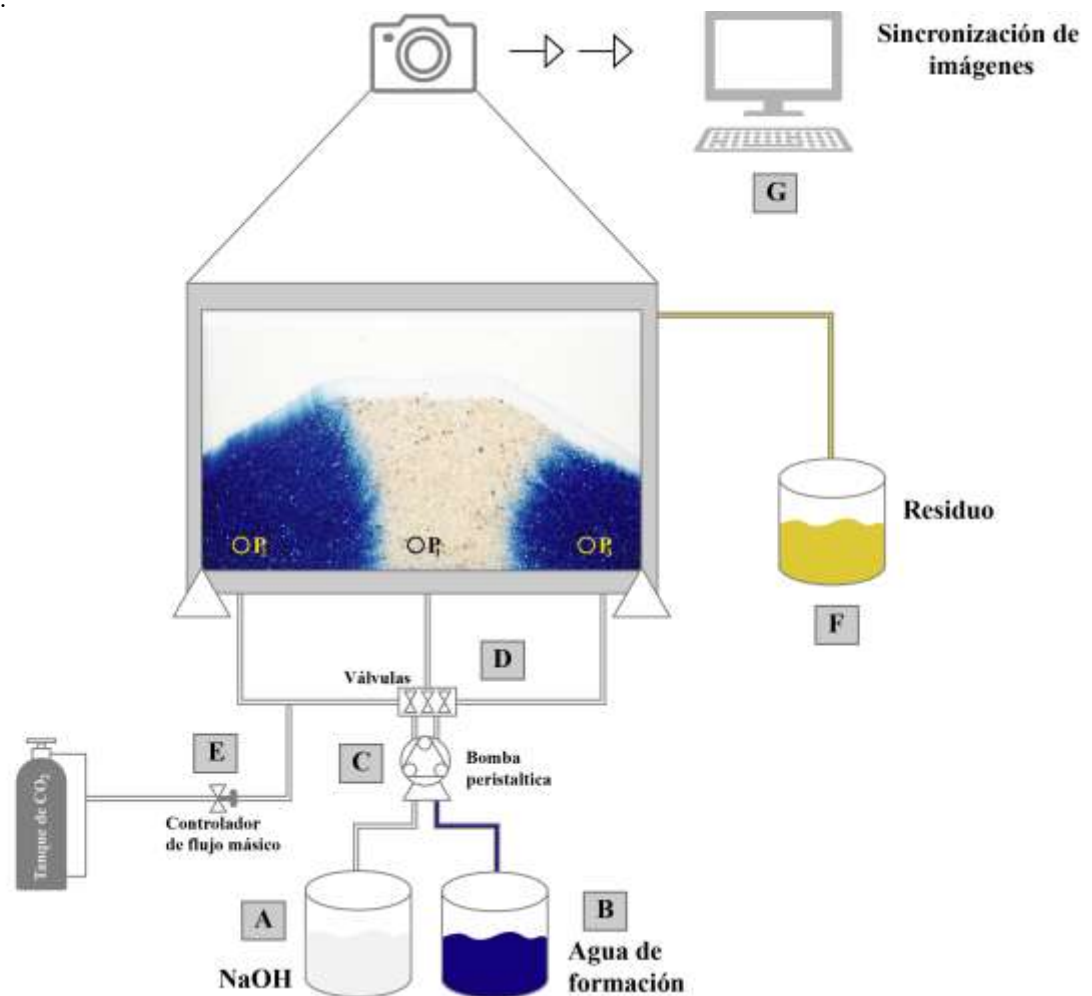
Estas pruebas emplearon sal sódica de azul de bromotimol como indicador de pH para observar la migración de CO₂. Una vez construida la geometría a analizar, se inyectó el indicador de pH a 20 mL/min mediante los puertos P₂ y P₃ (Figura 15). Se inyectó CO₂ mediante el puerto P₁ con un controlador de flujo másico a diferentes caudales (10,5,3 y 2 mL/min) hasta que la presión de inyección supere la resistencia mecánica de las arenas no consolidadas.

El sistema empleó una cámara ubicada en la parte central de la celda de flujo para monitorear la inyección del CO₂ en intervalos de 15s. Para preparar el sistema y ejecutar otros

ensayos, se inyectó agua natural e NaOH en la geometría S y agua destilada en la geometría N para eliminar el CO₂ residual. El proceso de inyección de fluidos para el lavado del sistema emplea los 3 puertos de inyección. Una vez removido el CO₂ residual, se empleó el lavado ácido-básico para purificar las arenas de cuarzo supermaduras y agua natural en las arenas de río-playa para remover las impurezas restantes. En cada caso, el ensayo fue detenido cuando la presión del fluido inyectado superó la resistencia mecánica de las arenas no consolidadas evidenciando una fractura a lo largo de la capa de arenas de reservorio.

Figura 14.

Esquema del funcionamiento del miniFluidflower. (A) inyección de NaOH, (B) inyección del agua de formación usando un caudal de 20mL/min CO₂ bomba peristáltica que inyecta los fluidos, (D) sistema de válvulas, (E) controlador del flujo másico que inyecta a 4 caudales diferentes, (F) residuos obtenidos posterior a la inyección y (G) transferencia de imágenes cada 15s.



Capítulo 3

3. Resultados y análisis de resultados

3.1.Resultados

3.1.1. *Distribución granulométrica de las arenas de río-playa y arenas de cuarzo supermaduras*

Las diferentes clases granulométricas de las arenas GRP y GCS extraídas por tamizado para la selección de material empleado en los experimentos de inyección de CO₂, se observan en la Figura 15. Las RBS presentan una granulometría más amplia y heterogénea. La clasificación está en función de la apertura del tamiz (2.00 - 0.12 mm) vs el porcentaje de peso retenido.

Las arenas gruesas de río-playa (GRP) se distribuyen en 20.9% y 12.1% de retenido en mallas de 2.00 y 1.40 mm. El porcentaje retenido de las arenas medias de río-playa (MRP) en una malla de 0.50 y 0.25 mm es de 15.7% y 11.1%, mientras que, el 22.7% corresponde a las arenas finas de río-playa (FRP).

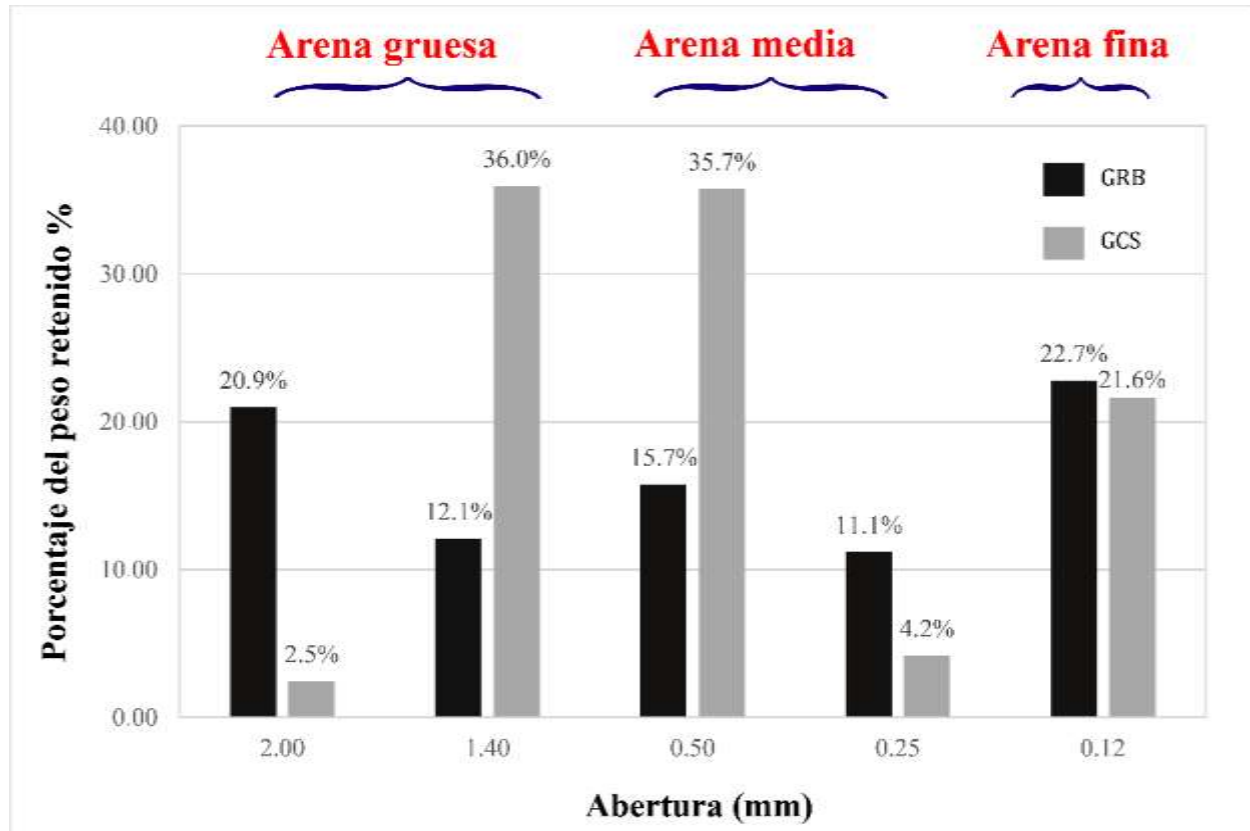
En contraste, las SQS tienen una granulometría mejor clasificada y con una mayor proporción de arenas medias. Las arenas de cuarzo supermaduras gruesas (GCS) se agrupan en: 2.5% del retenido en una malla de 2.00 mm y 36.0% en una malla de 1.40 mm. Dentro de la matriz de arenas cuarzosas, las arenas medias supermaduras (MCS) representan el 35.7% (0.50 mm) y 4.2% (0.25 mm), a diferencia de las arenas finas de cuarzo (FCS) que representan el 21.6% de la muestra analizada.

En términos comparativos, las GCS presenta un 36.0% de retenido con un tamaño, esto es, 3 veces más la proporción de las GRP (12.1%). Con respecto a las arenas medias, ambas fracciones de las MRP y MCS muestran su mayor concentración en tamaños de partículas de 0.50 mm con proporciones de 15.7% y 35.7%, mostrando una mayor homogeneidad y clasificación en el

segundo caso. En la fracción fina, tanto las FRP como las FCS presentan una proporción de retenido similar, sugiriendo una menor dispersión en las arenas cuarzosas.

Figura 15.

Histograma de distribución de frecuencias de partículas de arena de río-playa. Apertura (mm) vs. porcentaje de peso retenido para arenas de río-playa y cuarzo super maduro.



3.1.2. Morfología de las muestras

3.1.2.1. Morfología de las arenas de cuarzo supermaduras

Para facilitar el análisis comparativo, las clases categóricas se presentan en orden ascendente según la redondez y esfericidad. Con respecto a los GCS, se identificó 6 clases morfológicas, distribuidas en: el 74.25 % de los granos corresponde a material grueso subredondeada con alta esfericidad y el 16.75 % a partículas subredondeadas con ultra esfericidad, de acuerdo con la clasificación de Krumbein y Sloss (1951). En menor proporción se encuentran los granos subredondeados con

esfericidad media (6.00%), mientras que, las formas subangulares - altamente esféricas y granos altamente redondeados con ultra y alta esfericidad corresponden a un 3.00% (Figura 16a).

Para complementar este estudio, se analizó la morfología de sedimentos de MCS y FCS. Con base a la misma representación visual propuesta por Krumbrein & Sloss, (1951), se determinaron 9 clasificaciones para las MCS distribuidas en granos angulares-altamente redondeados y de media a ultra esfericidad (Figura 16b). Del total de sedimentos analizados, se determinó que la mayoría de los granos se caracterizan por ser altamente esféricos con una tendencia a presentar formas subredondeadas (64.38%), subangulares (17.30%) y altamente redondeadas (11.70%).

Otras categorías en menor proporción (formas subangulares y subredondeadas con esfericidad media, entre otros) representan el 6.61% del total (Figura 16b). Las FCS se clasificaron en 6 categorías morfológicas, agrupadas desde partículas subangulares y altamente redondeadas con granos de media hasta ultra esfericidad. Según la escala de redondez vs esfericidad mostrada en la Figura 16c, los granos de las FCS con mayor predominancia corresponden a formas altamente esféricas exhibiendo contornos subredondeados (48.11%) y subangulares (20.91%).

Con menor frecuencia se identificaron partículas ultra esféricas de aspecto subredondeados (14.11%) y altamente redondeados (11.59%), mientras que, los granos subangulares con esfericidad media y altamente redondeados con alta esfericidad son solo el 5.29% de la muestra analizada.

3.1.2.2. Morfología de las arenas de río - playa

La esfericidad y redondez las RBS se distribuyen en 7 categorías morfológicas correspondientes, mismas que, en términos de redondez varían desde morfologías subangulares hasta altamente redondeadas exhibiendo formas entre baja y ultra esfericidad (Figura 16d). El 59.00% de las partículas de río gruesas son granos subredondeados altamente esféricos, el 27.25%

representa un material sub-redondeado con esfericidad media y con menor frecuencia, se identificaron partículas subredondeadas con ultra esfericidad. Otras clasificaciones como partículas con alta redondez con ultra esfericidad y subangulares con esfericidad media, entre otras, representan una minoría del 1.50% (Figura 16d).

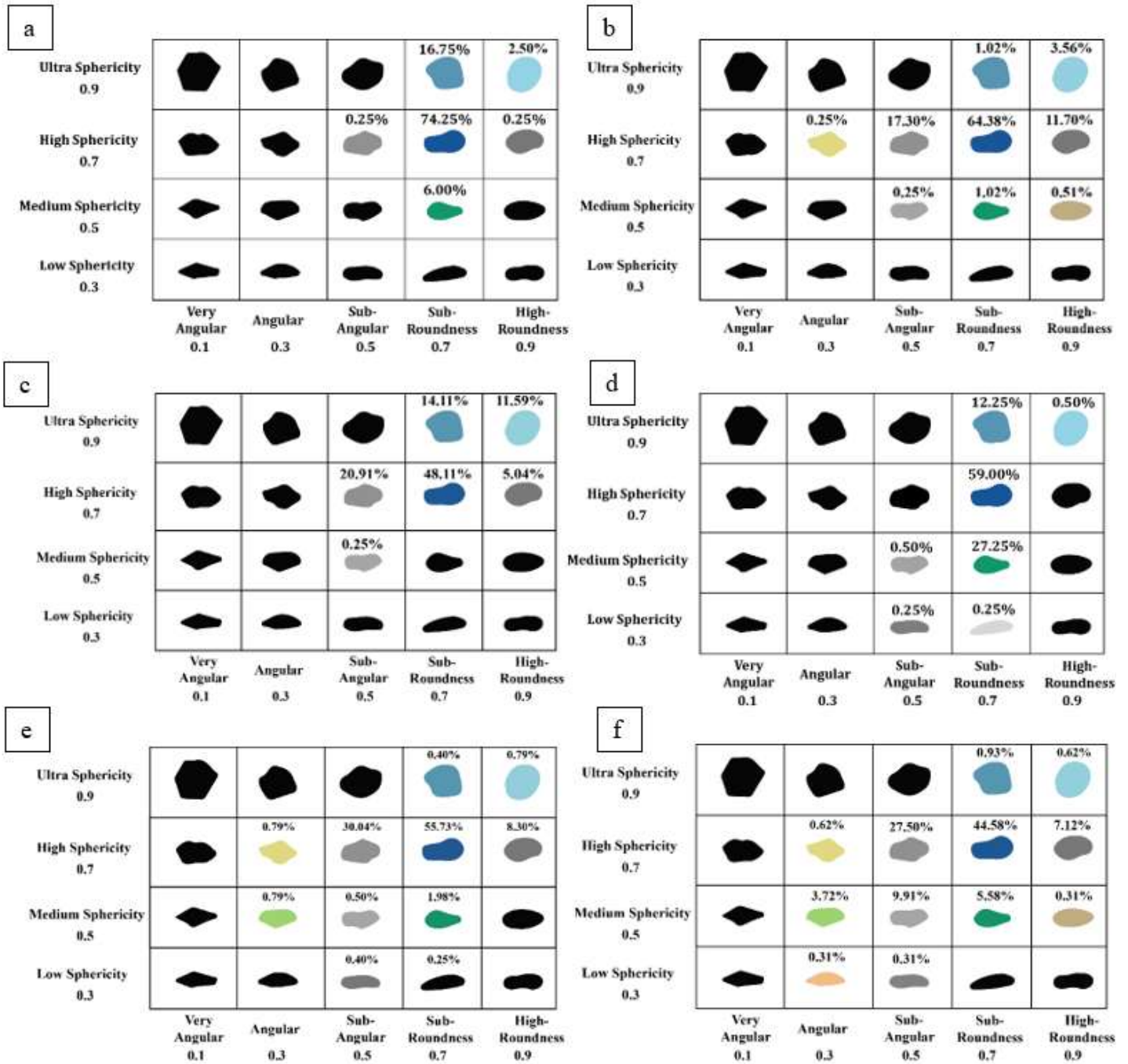
Las partículas de las MRP se clasifican en 10 categorías morfológicas desde granos angulares-altamente redondeados y esfericidades que varían entre 0.3 (baja esfericidad) y 0.9 (ultra esfericidad) (Figura 16e). La mayoría de sus partículas son sedimentos de grano medio con formas subredondeadas y altamente esféricas (55.73%), también, son bastante comunes las partículas subangulares y altamente esféricas (30.04%), mientras que, las partículas altamente redondeas y altamente esféricas se presentan con menor frecuencia, siendo el 8.30%.

Otras clasificaciones morfológicas (subredondeadas y angulares con esfericidad media) representan solo el 5.94% de las partículas analizadas. Las FRP presentan 12 categorías morfológicas subdivididas en formas angulares y altamente redondeadas mostrando esfericidades de media a ultra (Figura 16f).

La morfología predominante corresponde a los granos subredondeados y altamente esféricos con un 44.58%, seguidos por partículas subangulares y altamente esféricas (27.50%), a diferencia de los granos subangulares con esfericidad media que representan el 9.91%. Así mismo, se observan granos con alta redondez y esfericidad representando el 7.12%, mientras que, otras categorías morfológicas (angular y subangular con baja esfericidad) representan un total de 12.40% de las partículas analizadas.

Figura 16.

Clasificación de Krumbein y Sloss (1951). Arenas de cuarzo supermaduras gruesas (GCS) (a), arenas de cuarzo supermaduras medianas (MCS) (b), arenas de cuarzo supermaduras finas (FCS) (c), arenas de río-playa gruesas (CRP) (d), arenas de río-playa medias (MRP) (e) y arenas finas de río-playa (FRP) (f).



3.1.3. Gravedad específica, presión litostática y porosidad

La configuración geométrica de las secuencias geológicas empleada se fundamenta en su eficiencia como trampa y cierre estructural efectivo para almacenar fluidos como el CO₂. En este caso, los cuerpos arenosos seleccionados representan la secuencia de depósitos (arena gruesa: 63.33%, media: 10.00% y fina 26.67%.) de las diferentes facies sedimentarias presentes en un contexto geológico para replicar las condiciones estratigráficas del modelo físico en una celda de flujo. Adicionalmente, se obtuvo los valores de las gravedades específicas de cada estrato; GRP: 2.68 ± 0.1 , MRP: 2.77 ± 0.1 y FRP: 2.90 ± 0.1 .

La presión litostática teórica correspondiente a un reservorio localizado a una profundidad de 1km fue de 27.02 MPa. Este valor sirvió como referencia para el diseño de un modelo físico de 20 cm de profundidad y una carga de 2.56 kg para simular las condiciones litostáticas equivalentes y replicar un contexto similar a un sistema geológico natural. Las porosidades de las arenas (cuarzo supermaduras y río-playa) utilizadas en los experimentos de inyección de CO₂, empleando una carga de 2.56 kg, se muestran en la Tabla 4.

La porosidad de las GCS muestra un valor mayor en las fracciones gruesas (0.31 ± 0.01). Las MSQS tienen un valor de 0.20 ± 0.03 indica un mayor grado de compactación, mientras que la porosidad aumenta notablemente en las fracciones más finas (0.35 ± 0.01) de las arenas de cuarzo supermaduras. En contraste, en las GRP, la porosidad más elevada corresponde a la fracción gruesa (0.35 ± 0.01). Las partículas de las MRBS tienen una porosidad de 0.33 ± 0.01 , mientras que, las FRBS presentan una porosidad del 0.24 ± 0.01 .

Tabla 4.

Resultados de la porosidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.

Tipología de arenas			Porosidad (Φ)
Arenas de cuarzo supermaduras	Gruesa		0.31 ± 0.01
	Media		0.20 ± 0.03
	Fina		0.35 ± 0.01
Arenas de río-playa	Gruesa		0.39 ± 0.02
	Media		0.33 ± 0.01
	Fina		0.24 ± 0.01

3.1.4. Permeabilidad

La permeabilidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa disminuye según el tamaño de su grano, como se observa en la Tabla 5. Resultados de la permeabilidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa. La permeabilidad de las GCS es 4.80 ± 1.90 D la cual registra el valor más alto de las 6 muestras analizadas. Esta alta capacidad de transmisión de fluidos se mantiene hasta las MSQS con un valor de 3.74 ± 0.97 D y disminuye a 0.95 ± 0.07 D en las FCS; comportamiento esperado dado el menor tamaño de partícula. En contraste, las RBS exhiben valores de permeabilidad inferiores en todas sus fracciones. La fracción GRP registró una permeabilidad promedio de 1.29 ± 0.16 D, mientras que la MRP alcanzó 0.77 ± 0.16 D y la FRP registró una permeabilidad de 0.69 ± 0.12 D.

Tabla 5. Resultados de la permeabilidad de las arenas de cuarzo supermaduras y de río-playa.

Tipología de arenas	Permeabilidad (D)	
Arenas de cuarzo supermaduras	Gruesa	4.80 ± 1.90
	Media	3.74 ± 0.97
	Fina	0.95 ± 0.97
Arenas de río-playa	Gruesa	1.29 ± 0.16
	Media	0.77 ± 0.16
	Fina	0.69 ± 0.12

3.1.5. Inyección en arenas gruesas de cuarzo supermaduras y de río sin variación del caudal.

En este experimento de inyección de CO₂ se evaluaron dos geometrías S y N que comparten la misma estructura geológica y diferente composición. La geometría S muestra estratos geológicos que forman un antiforme de arenas de cuarzo supermaduras, mientras que, la geometría N es un antiforme compuesto por arenas de río-playa. A cada una de ellas se le inyectó CO₂ gaseoso a diferentes caudales: I) 10mL/min, II) 5mL/min, III) 3mL/min y IV) 2mL/min. En cada caso, el ensayo fue detenido cuando la presión del fluido inyectado superó la resistencia mecánica de las arenas no consolidadas evidenciando una fractura a lo largo de la capa de arenas de reservorio.

Todos los experimentos utilizan el mismo punto de inyección y son realizados bajo condiciones de laboratorio controladas de temperatura ($26.6 \pm 0.61^\circ\text{C}$), presión (1000.35 ± 0.05 hPa) y humedad relativa ($40.45 \pm 1.67\%$). A continuación, se presenta el detalle de los casos de estudio utilizando 4 caudales y sus repeticiones.

3.1.5.1. Comportamiento del CO₂ en la geometría S bajo distintos caudales de inyección: I) 10mL/min, II) 5mL/min, III) 3mL/min y IV) 2mL/min.

La inyección de CO₂ se ejecutó en condiciones experimentales reguladas, p., ej. temperatura (28.8 ± 0.15 °C), presión (1003.62 ± 0.28 hPa) y humedad relativa (49.43 ± 5.53 %). Las propiedades fisicoquímicas de la solución alcalina son: pH de 10.53 ± 0.66 , conductividad: 168 ± 1.40 μS/cm, concentración de sólidos disueltos: 85.3 ± 0.14 mg/L, temperatura: 27.23 ± 0.15 °C. Las propiedades de la solución del azul de bromotimol son: pH de 10.24 ± 0.12 , conductividad: 151.40 ± 2.96 μS/cm, temperatura: 27.2 ± 0.15 °C y concentración de sólidos disueltos: 79.60 ± 2.47 mg/L. El primer escenario corresponde a una formación geológica (geometría S) que es un antifforme formada por arenas de cuarzo súper maduras dentro de un medio acuoso compuesto por una solución de agua de formación a $t = 0$ s (Figura 17a). En esta primera prueba, se aplicó un caudal de 10mL/min. En los primeros 24 s de inyección, los signos visibles iniciales de migración de gas aparecen como un parche dentro del medio poroso (Figura 17b).

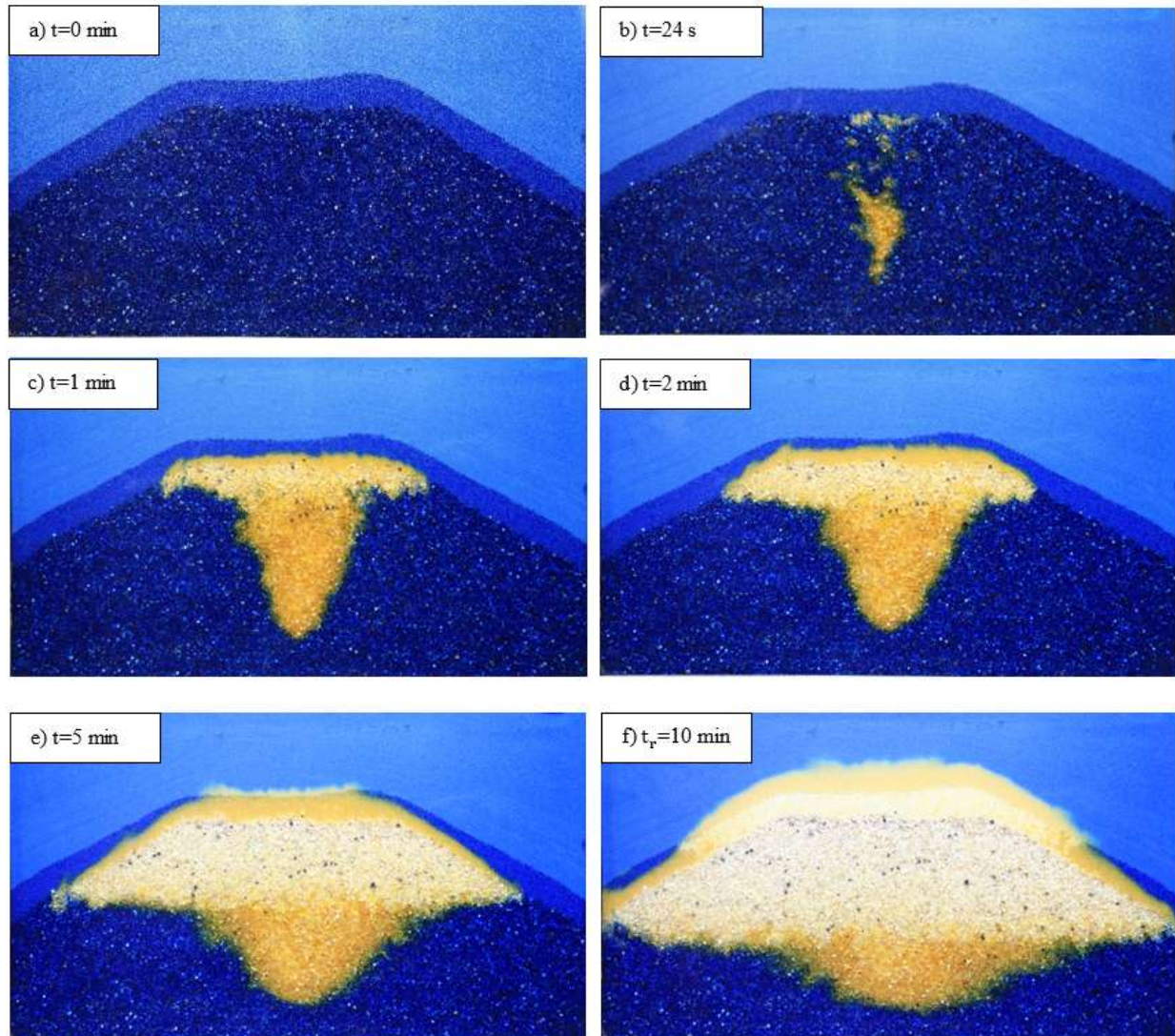
Después de 1 minuto de inyección, se observó la migración como una pluma ascendente. El movimiento ascendente de es impulsado por la flotabilidad, ya que el fluido gaseoso tiene una densidad menor (1.97 kg/m³) que la solución acuosa BTB (1000 kg/m³), por lo tanto, los aumentos se deben a la fuerza de flotación vertical generada por la diferencia de densidad. Asimismo, se observó la migración desde la capa del reservorio con una porosidad de 0.31 ± 0.01 y permeabilidad de 4.80 ± 1.90 a una capa de transición con una porosidad menor de 0.20 ± 0.03 (Figura 17c).

Además, se distingue la migración horizontal debido a la alta presión capilar en comparación con la capa del yacimiento, lo que ralentiza la migración vertical del fluido (Figura 17d) al tiempo que promueve la migración lateral a lo largo de los flancos de la capa de transición.

Después de 5 min de inyección, se observa que la mayor parte de CO_2 está saturado como gas. Una vez que la parte superior de la capa de transición se satura, el fluido gaseoso continúa (Figura 17d) asciende hacia la capa de arena fina, alrededor de 10 min de inyección, se induce una fractura entre el yacimiento y la capa de transición debido a la acumulación de tensión bajo inyección continua (Figura 17e). Las repeticiones experimentales muestran que el tiempo de ruptura de la roca de la capa de confinamiento ocurre a los 9 ± 1 min, con un volumen de CO_2 almacenado de $90 \pm 10\text{mL}$.

Figura 17.

Propagación del CO_2 en un antiforame compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 10 mL/min.



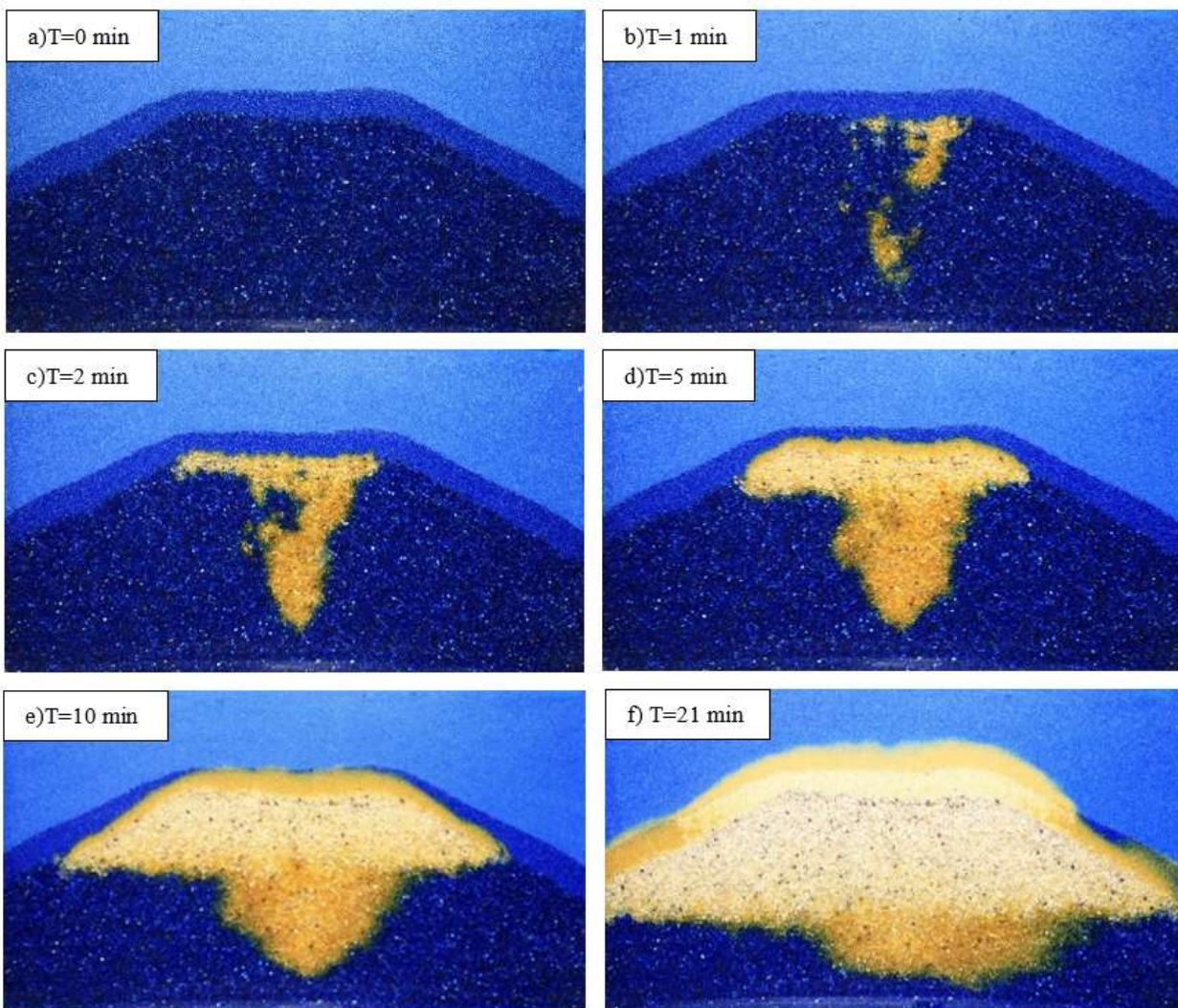
El segundo escenario empleó un caudal de 5mL/min en un antiforne en un entorno acuoso compuesto por la solución de agua de formación. Se observó un movimiento ascendente desde el punto de inyección central en la geometría S durante un período de $t = 21$ min (Figura 18). Después de 1 min de inyección, no hay una forma de pluma definida que esté en contraste con lo que se obtuvo cuando se usó el doble del caudal (10mL/min, Figura 17b) donde el patrón de migración del fluido gaseoso se vio restringido por el caudal reducido, alterando la forma de la pluma, como se observa en la Figura 18b. Este comportamiento refleja el efecto de un caudal más bajo, por lo que el gradiente de presión generado en el sistema fue insuficiente para movilizarlo a lo largo de la trayectoria anterior (Figura 18c). Esto conduciría a un gradiente de presión más bajo, ya no tiene tiempo para distribuirse a través de los poros.

Después de 5 min de flujo continuo, una pluma asimétrica comienza a elevarse y expandirse lateralmente conteniendo las fases gaseosa y acuosa de CO_2 , representadas por tonos amarillo pálido y ámbar dentro de la pluma (Figura 18d-e). Al llegar a la capa de transición, se produce una extensión lateral, siguiendo la geometría de la antiforne.

A los 21 min, se induce una fractura en la zona de menor resistencia debido a la acumulación de tensión bajo inyección constante (Figura 18f). Las repeticiones experimentales muestran que el tiempo de ruptura del confinamiento oscila entre 22 ± 1 min, con un volumen de CO_2 almacenado de $110 \pm 5.00\text{mL}$.

Figura 18.

Propagación del CO_2 en un antifirme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 5mL/min.



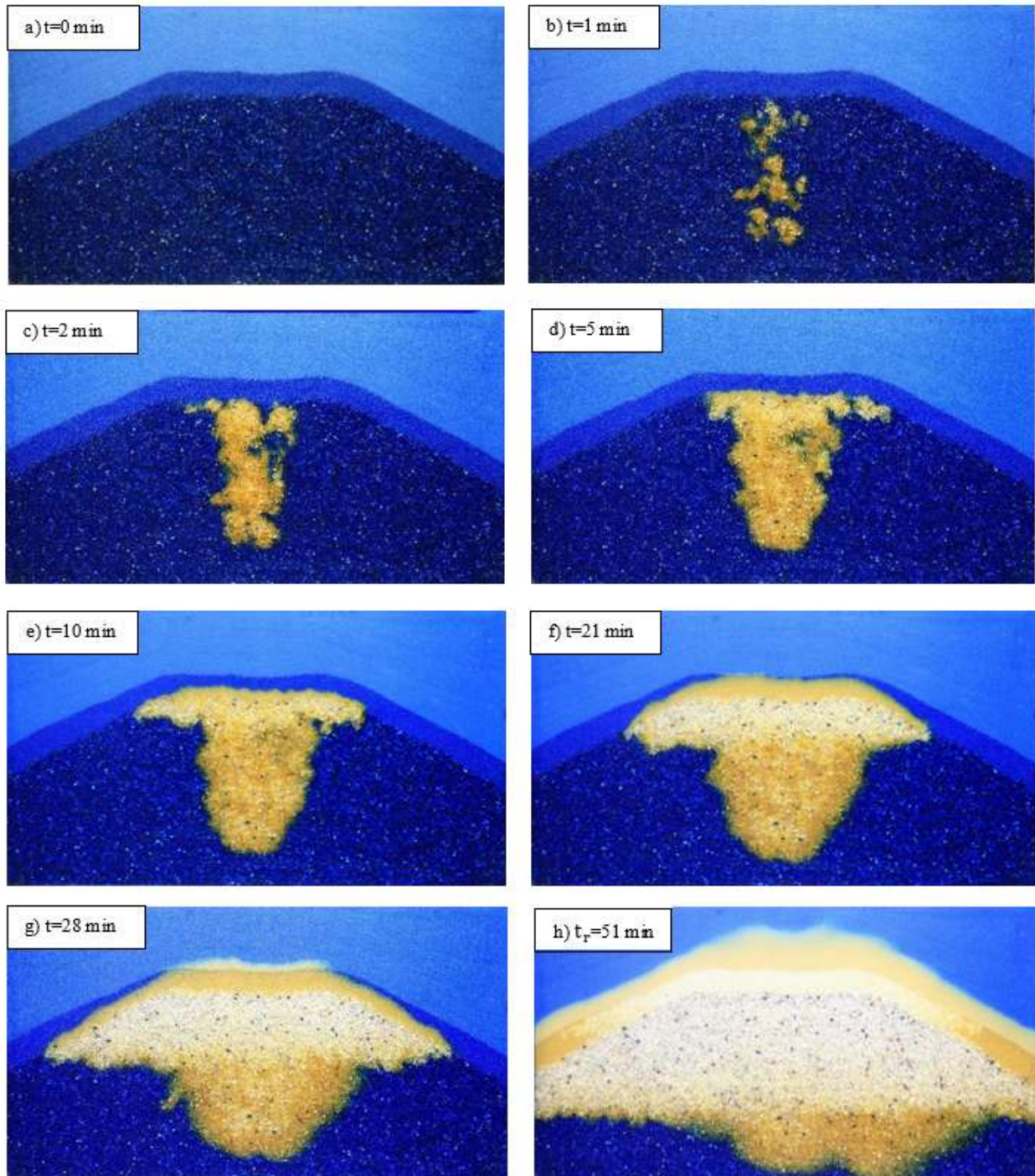
En la Figura 20 se muestra la propagación del CO_2 en el modelo físico de antiforme utilizando un caudal de 3mL/min. Se observa la migración de gases dentro de la geometría S, formando una columna difusa. Este fenómeno se desarrolla a lo largo de 51 min, reflejando la dinámica del desplazamiento en fase gaseosa influenciada por las propiedades inherentes del medio y el caudal impuesto. El primero aparece como un punto disperso dentro del medio poroso (Figura 20b-c) del medio y el caudal impuesto. Por ejemplo, en tiempos de inyección de 2 y 5 min (Figura 20c-d), menor es la capacidad de desplazamiento del mostrando la ausencia de la forma visible de la pluma como se observa en la Figura 20c-d. Hasta el tiempo de inyección de 10 min, permanece en contacto con la fase acuosa del medio poroso durante un período más largo, lo que favorece su disolución y posterior reacción con el agua para formarse ácido carbónico (Figura 20d).

Este proceso limita la presencia de una fase gaseosa de CO_2 , en contraste con caudales más altos (5 y 10mL/min) donde la disolución es parcial y la fase gaseosa persiste durante más tiempo. Después de 28 minutos de inyección continua a las 3mL/min, una pluma se vuelve más notoria y ocupa un mayor volumen (Figura 20f). Al llegar a la capa de transición, se produce una extensión lateral a lo largo de la estructura antiforme (Figura 20g) y justo antes de la ruptura, se observa acumulación debajo de la capa de transición, siguiendo rutas de flujo preferenciales de conectividad de poros.

A los 51 min, se produce una ruptura de las capas del reservorio en la misma capa de transición (Figura 20h) donde los experimentos replicados muestran que el tiempo de ruptura del confinamiento varía de 46 a 51 min, con un volumen de almacenamiento confinado de 148 ± 8.86 mL.

Figura 19.

Propagación del CO_2 en un antifirme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 3mL/min.



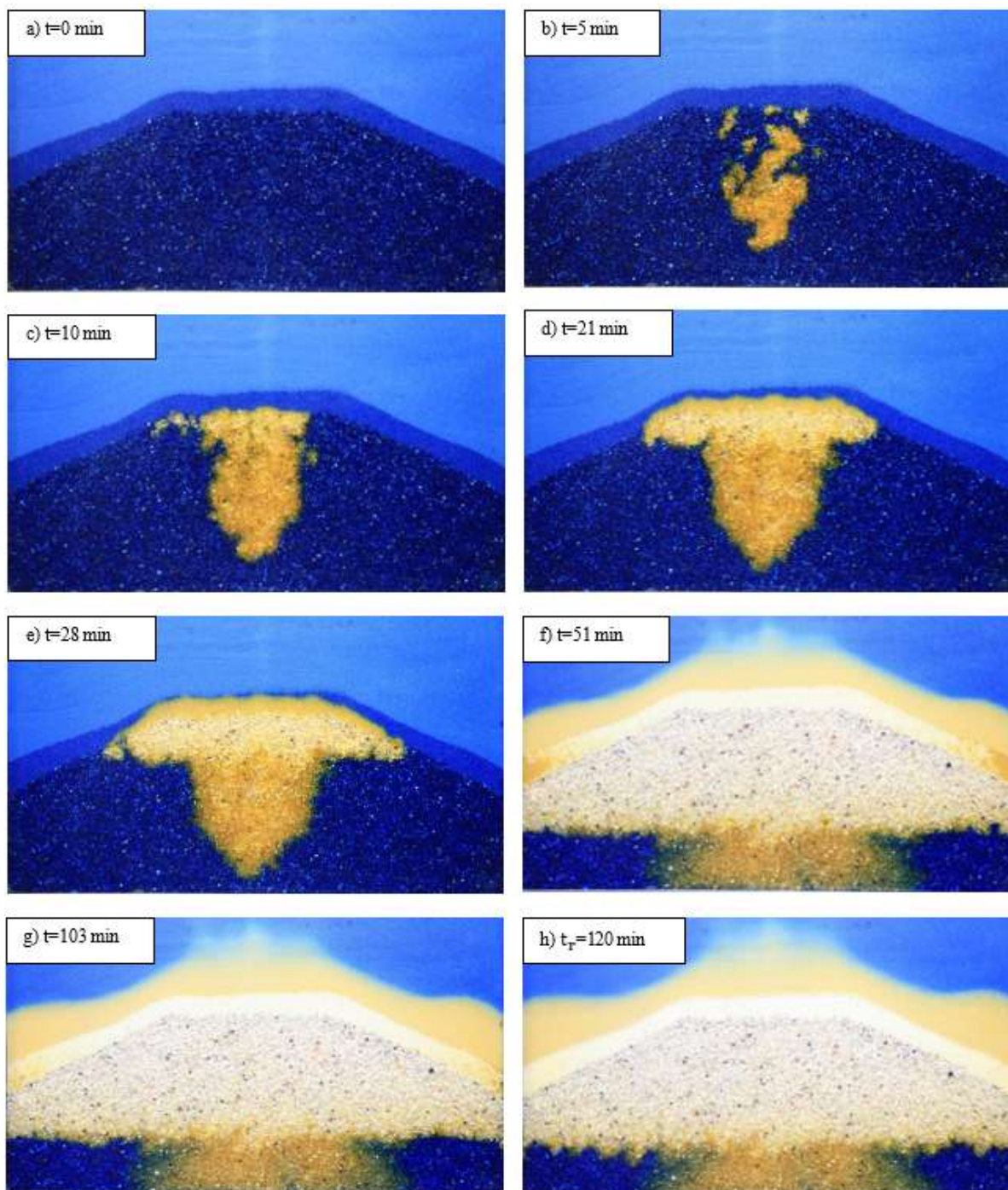
La Figura 20 muestra la inyección en un medio heterogéneo bajo un caudal constante de 2 mL/min. La evolución de la pluma visible se registró durante un período de 120 min. A $t = 0$ min, el sistema está en su estado inicial y satura completamente la solución de agua de formación (Figura 20a). La Figura 20b muestra la acumulación en la capa del reservorio. A $t = 10$ min, la velocidad de inyección más baja facilita una propagación más eficiente de la fase gaseosa dentro de las capas más gruesas de la geometría S, donde se almacenó principalmente ácido carbónico (Figura 20c). La inyección continua de por un período de 21 a 28 min permite el movimiento ascendente a las capas de transición siguiendo el contorno de la antiformal (Figura 20 d-e).

Después de 51 min de inyección, se observa que parte del se acumula dentro del reservorio más tarde mientras la fase acuosa supera la presión capilar de entrada y comienza a interactuar con la capa de sellado (Figura 20f-g). El tiempo de ruptura de la capa del reservorio fue de 120 min de inyección, la se ha propagado tanto lateral como verticalmente, alcanzando la capa de sellado suprayacente compuesta por arenas finas (Figura 20h).

En esta etapa, alcanza un umbral de presión suficiente para superar la presión de entrada capilar de la capa de sellado, lo que permite la migración ascendente hacia la superficie. Esto destaca el comportamiento dinámico del transporte y almacenamiento de gas en condiciones de baja tasa de inyección. Esto enfatiza el papel de las barreras capilares y la heterogeneidad litológica en el control de la migración vertical en medios porosos. Las pruebas de inyección repetidas revelan que, al llegar a las esquinas de la estructura de la antiformal, el gas tiende a migrar hacia arriba, tanto la capa de transición como la de sellado.

Figura 20.

Propagación del CO_2 en un antiforne compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 2 mL/min.



3.1.5.2. Comportamiento del CO₂ en la geometría N bajo distintos caudales de inyección: I) 10mL/min, II) 5mL/min, III) 3mL/min y IV) 2mL/min.

Este escenario muestra la migración de CO₂ dentro del reservorio de la geometría N, en un medio acuoso compuesto por la solución de agua de formación (Figura 21a). Las primeras trayectorias de migración de CO₂ en el reservorio aparecen a los 24 segundos, representadas por un tono ámbar (Figura 21b).

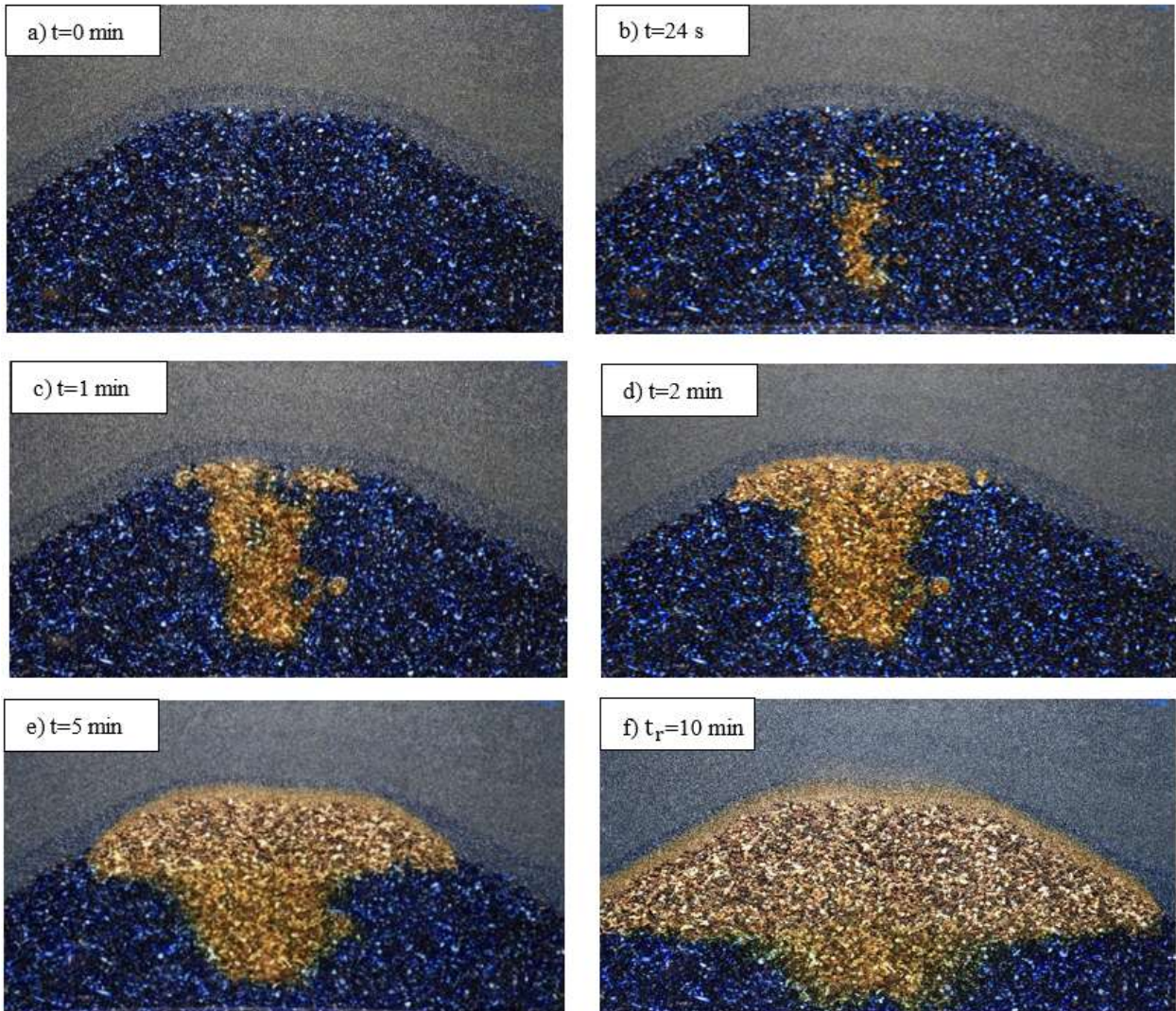
En esta etapa, se observa una columna de CO₂ compuesta por dos fases: ácido carbónico y CO₂ gaseoso, representado por pequeñas burbujas atrapadas dentro de la capa del reservorio. Después de 1 minuto de inyección de CO₂ en la capa del reservorio, el CO₂ asciende por efecto de la flotabilidad, pero no logra penetrar directamente en las capas de arena media debido a una barrera capilar impuesta por el menor tamaño de poro (Figura 21c).

Tras 2 a 5 minutos de inyección de CO₂, el contraste de permeabilidad y presión capilar provoca la migración lateral del CO₂ a lo largo de la interfase entre la capa de transición y la capa del reservorio, guiada por la geometría del antiforame, como se observa en la Figura 21d-e. La inyección continua de CO₂ induce acumulación de esfuerzos en la geometría N, lo que resulta en la fracturación entre la capa de transición y la capa del reservorio (Figura 21f).

Las repeticiones experimentales y la inspección visual de la inyección de CO₂ en la capa del reservorio indican un volumen teórico de almacenamiento de $103 \pm 5.77\text{mL}$.

Figura 21.

Propagación del CO_2 en un antifirme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 10 mL/min



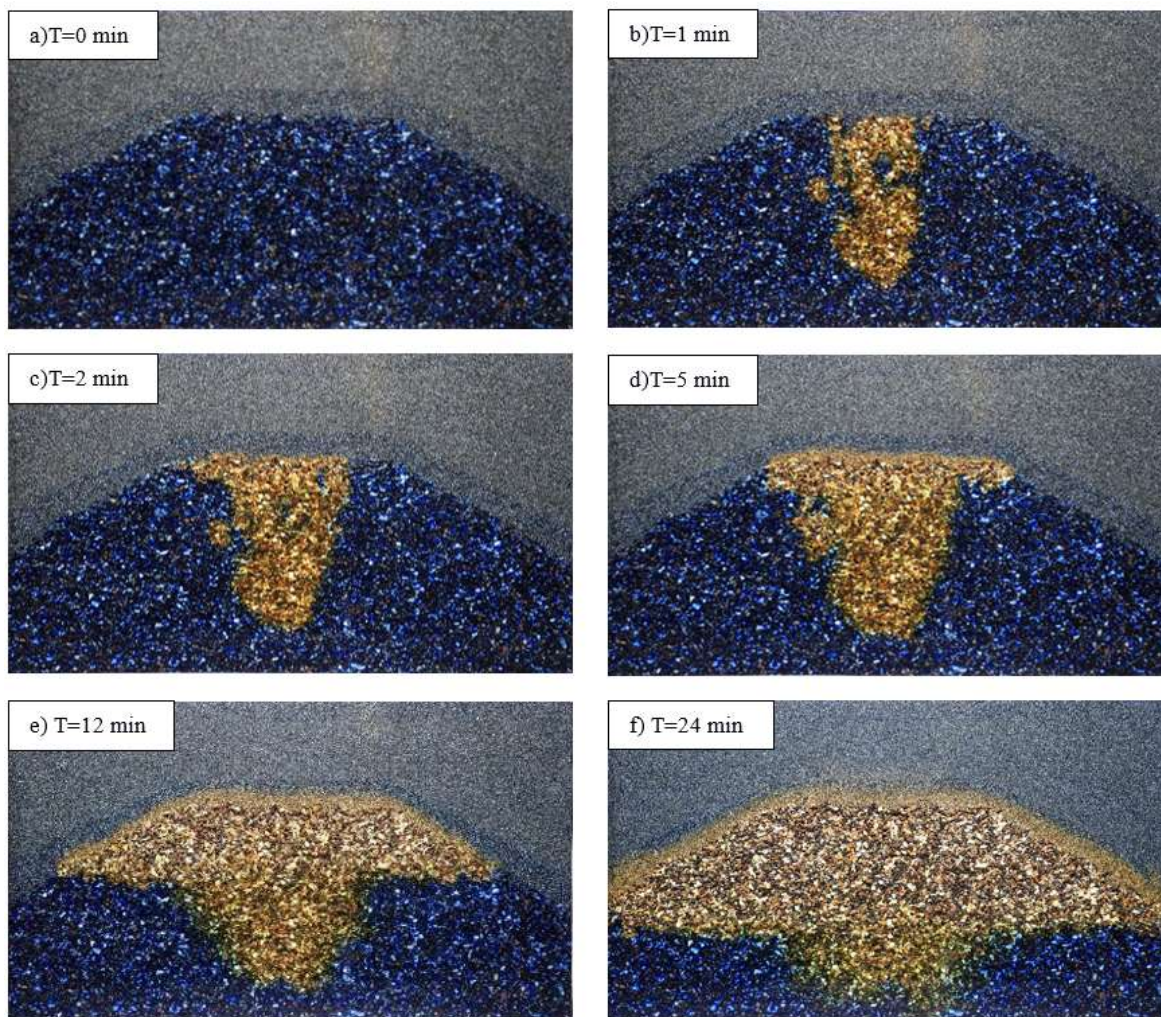
La propagación del CO_2 a un caudal de 5 mL/min en un medio heterogéneo durante un periodo de 27 min se muestra en la Figura 22. En las condiciones iniciales, el sistema está completamente saturado con solución de agua de formación (Figura 22a). Tras 1 min de inyección de CO_2 , se observa una acumulación de CO_2 en el yacimiento superior, atribuida al inicio de una migración ascendente impulsada por el contraste de densidad con la solución de agua de formación.

Entre 2 y 5 minutos, el volumen ocupado por CO₂ aumenta, generando zonas de saturación que se expanden lateralmente a lo largo de la capa de transición, lo que confirma que la propagación se rige principalmente por la flotabilidad y la presión capilar (Figura 22. c-d). En esta etapa, el efecto de la inyección de CO₂ sobre el caudal se hace evidente, ya que a 5mL/min, el CO₂ permanece en el proceso de formación, a diferencia de usar un caudal de 10mL/min (Figura 21 e), ya se desarrolla en el yacimiento de la geometría N. Finalmente, después de 24-27 min, el CO₂ gaseoso ocupado domina la sección superior del yacimiento, exhibiendo la pluma de CO₂ como una dispersión y atrapamiento residual.

En general, los resultados demuestran que la acumulación de CO₂ ocurre de forma progresiva y estable en la parte superior del medio, promoviendo el desplazamiento parcial del fluido remanente y la formación de volúmenes atrapados en regiones no conectadas. Este comportamiento resulta del reducido caudal de inyección, que influye significativamente en la dinámica del gas. El volumen teórico almacenado es de $123 \pm 10.41\text{mL}$.

Figura 22.

Propagación del CO_2 en un antiforme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 5 mL/min



La propagación del CO_2 inyectado empleando un flujo constante de 3mL/min evidenció un desplazamiento preferencial a lo largo de estratos más permeables de las arenas CRBS dentro de una estructura geológica con geometría tipo N (Figura 23). El movimiento del CO_2 fue registrado durante un ensayo de inyección controlada hasta un tiempo de ruptura de la capa de arenas CRP a los 51 min. A los 1 y 2 minutos posteriores al inicio de la inyección ($t = 1-5$ min), se observa zonas localizadas de coloración amarilla en la configuración geométrica (Figura 23a-d), lo que refleja la acidificación del medio producto de la disolución del CO_2 y formación de ácido carbónico

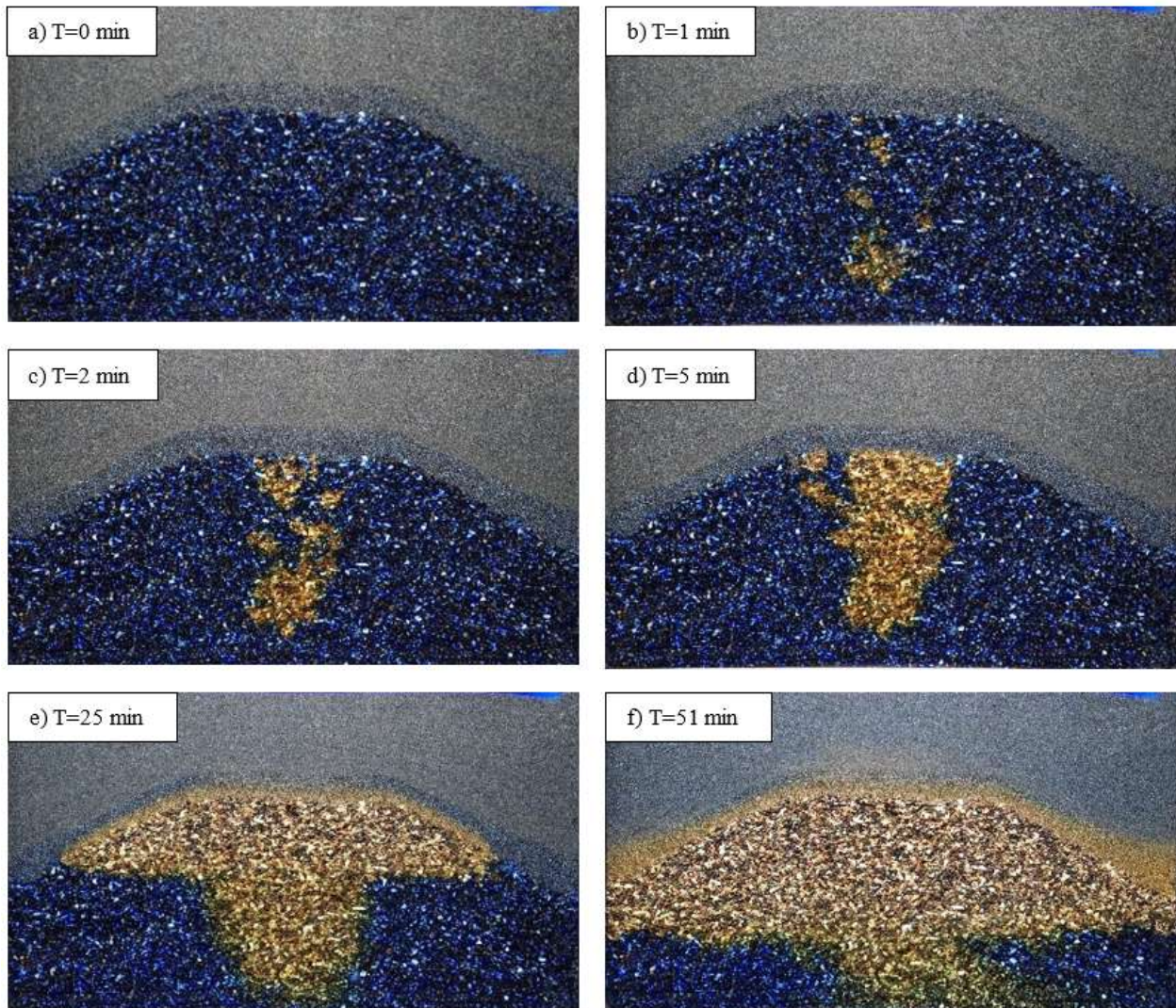
(H_2CO_3). A los $t=25$ min de inyección, estas zonas se expanden verticalmente siguiendo las trayectorias de permeabilidad y porosidad preferenciales (Figura 23e).

El medio poroso revela un patrón ascendente en donde gran parte del CO_2 ha sido almacenado en el volumen central del antiforne alcanzando la capa de las arenas MRP. Finalmente, en $t = 51$ min, el CO_2 se ha extendido lateralmente hacia la parte superior del antiforne (Figura 23f), lo cual sugiere un atrapamiento estructural efectivo del gas y una distribución residual del mismo en las zonas menos permeables y alejadas del punto de inyección.

En esta etapa, el espacio disponible para el almacenamiento es parcialmente completado, por consiguiente, el CO_2 se ve forzado a redistribuirse en los extremos del sistema alcanzando las esquinas laterales del antiforne. Se distingue que parte del fluido entra en contacto con las arenas FRP y se observa un patrón de acumulación controlado por los límites geométricos de la trampa. Según los experimentos replicados, el tiempo necesario para la ruptura del confinamiento varía entre y 46-51min el volumen de CO_2 almacenado es $153 \pm 10.7\text{mL}$.

Figura 23.

Propagación del CO_2 en un antiforne compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 3 mL/min



La Figura 24 muestra un experimento de inyección de CO_2 en un modelo físico con forma de antiforne. El medio poroso está compuesto por arenas N de geometría en las que se inyectó CO_2 a un caudal constante de 2 mL/min desde la base central (t=0 min, Figura 24a). Después de 5-10 minutos (Figura 24b-c), el CO_2 comienza a avanzar a través de una banda vertical en el centro. Esto indica que el gas está siguiendo un camino preferencial, probablemente una zona de arena gruesa con mayor permeabilidad y menor presión capilar.

Alrededor de una hora (Figura 24g), el CO_2 llega a la parte superior de la antiforme y comienza a extenderse lateralmente. También comienzan a aparecer dedos hacia abajo. Esto sucede porque el CO_2 , acumulándose en la parte superior, comienza a descender por zonas más permeables debido a su menor densidad y viscosidad.

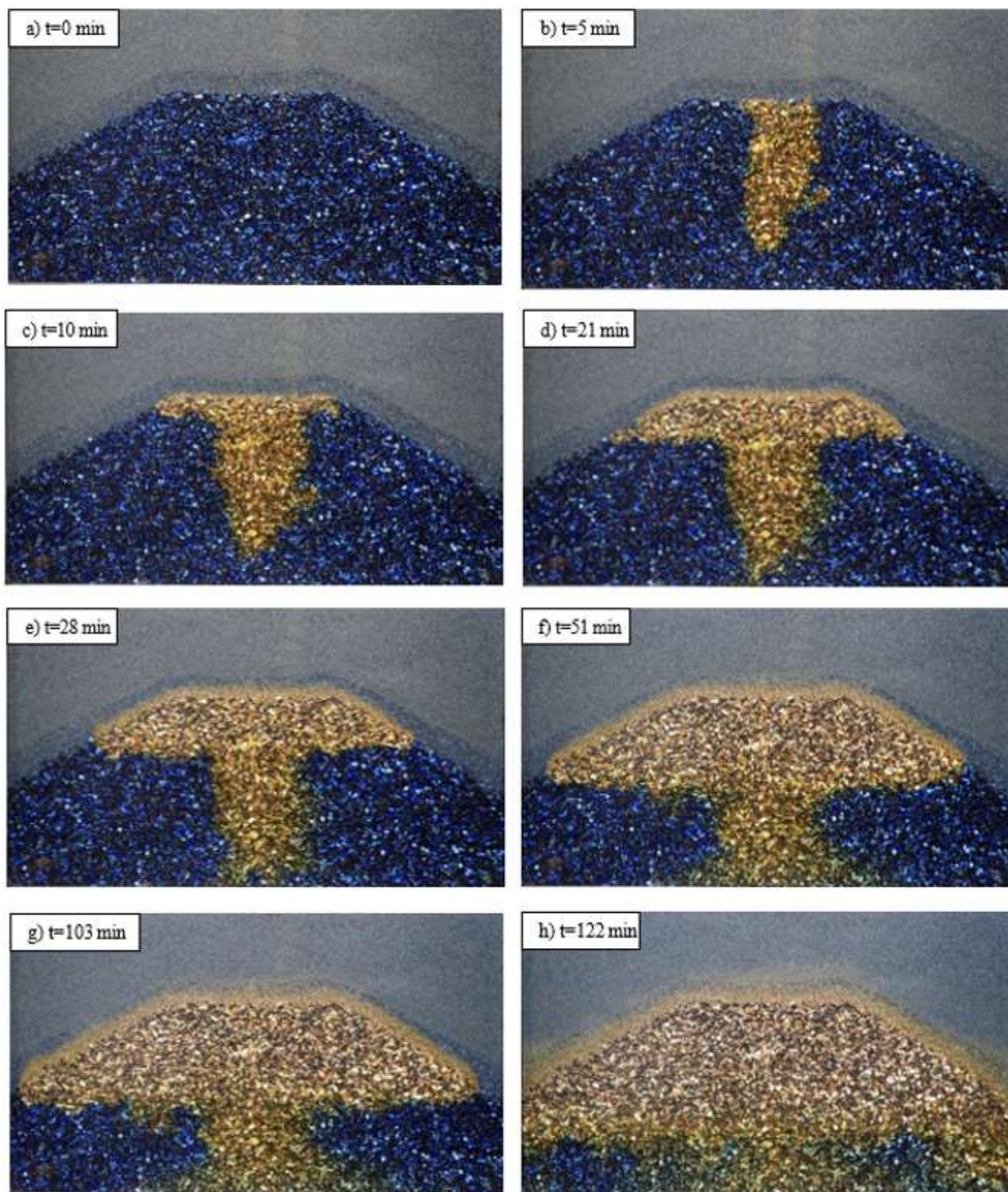
A las dos horas (Figura 24h), el sistema alcanza el punto de ruptura. El CO_2 forma dedos bien definidos que descienden a las capas inferiores. Esta inestabilidad gravitacional aparece ya que el gas ha saturado la zona superior y encuentra caminos más permeables hacia abajo. La menor densidad de CO_2 , combinada con la heterogeneidad del medio, promueve este comportamiento.

Las arenas gruesas permiten una invasión más rápida, mientras que las arenas finas proporcionan resistencia. Esto obliga al gas a concentrarse a lo largo de ciertos caminos hasta que el frente se vuelve inestable, produciendo movimiento hacia abajo y dedos gravitacionales.

El experimento muestra que el CO_2 no se propaga de manera uniforme. En cambio, sigue rutas preferenciales dependiendo de la permeabilidad. Con el tiempo, estos caminos se saturan, lo que lleva a la migración vertical y la formación de dedos gravitacionales como se observa en la Figura 24h.

Figura 24.

Propagación del CO_2 en un antifirme compuesta de arenas de cuarzo supermaduras utilizando un caudal de 2 mL/min



3.2. Análisis de resultados

En el conjunto de arenas de cuarzo supermaduras (GCS, MCS, FCS) y arena de río-playa (GRP, MRP, FRP), se observa un patrón de morfología que afecta directamente las propiedades petrofísicas. Las arenas GCS presenta una mayor proporción de granos subredondeados con esfericidad media (74.25%), así como un alto porcentaje de granos ultra esféricos (16.75%). Esta combinación de granos permite una buena acomodación e interconexión entre los poros, lo que se ve reflejado en una porosidad moderadamente alta (0.31) y alta permeabilidad (4.80 D).

Por su parte, MCS muestra una alta proporción de granos subredondeados con alta esfericidad (64.38%), pero también un 17.30% de granos subangulares que generalmente aumentan en mayor medida la fricción intergranular y disminuirían la permeabilidad (3.74 D) en comparación con las arenas GCS, aunque con una menor porosidad (0.22). Las FCS presentan en menor proporción granos subredondeados altamente esféricos en un 48.11%, partículas subredondeadas con ultra esfericidad (14.11%) y partículas subangulares con alta esfericidad (20.91%), lo que sugiere que los poros deben estar aislados o tener mala conectividad, lo que lleva a una baja permeabilidad.

Con respecto a las arenas de río-playa, las arenas GRP contiene un 55% de granos subredondeados con una alta esfericidad y un 13% ultra esférico; el 30% restante de granos subangulares medianos se integra en estas esferas, facilitando el empaquetamiento. Esto también significa una porosidad máxima (0.39) pero baja permeabilidad (1.29D).

En MRP, el 57% de subredondeados se combina con un 30% de subangulares altamente esféricos, lo que disminuye la conectividad, reflejado en porosidad de 0.33 y permeabilidad de 0.77D. En las arenas FRP, la combinación de 46% partículas subredondeadas, 28% subangulares y pequeñas fracciones de angulares con baja o media esfericidad, genera la porosidad más baja (0.24) y permeabilidad reducida (0.69D).

La alta esfericidad y redondez conducen a mayores permeabilidades ya que permiten un apilamiento más fácil de las partículas, lo que lleva a una red de poros mejor conectada (por ejemplo, GCS). Sin embargo, al final, una alta porosidad no siempre equivale a alta permeabilidad. Por ejemplo, FCS contiene la segunda mayor porosidad (0.35), pero la menor permeabilidad (0.95 D).

Esto puede deberse a su tamaño de grano más fino y formas más subangulares que conducen poros más estrechos. En ambas tipologías se observa que la porosidad alta no garantiza alta permeabilidad. Para ejemplificar, FCS y GRP, que pese a su porosidad elevada presentan permeabilidades bajas debido a la morfología y empaquetamiento de los granos que restringen la conexión entre poros. Las GCS muestran el mejor balance entre porosidad y permeabilidad, reflejando la importancia de una morfología más uniforme y redondeada.

El conjunto de ensayos demuestra que, en la geometría a escala de laboratorio utilizada, la disminución del caudal de inyección (10 a 2mL/min) incrementa el volumen teórico de CO₂ almacenado tanto en la arena gruesa de cuarzo super madura (GCS) como en la arena gruesa de río-playa. Este comportamiento se observa de manera sistemática en todas las condiciones medidas y evidencia que, a velocidades de inyección más bajas, el fluido dispone de mayor tiempo de residencia para ocupar poros previamente no invadidos a caudales altos, incrementando el volumen teórico acumulado dentro del medio poroso. Por ejemplo: las GRP superan a las GCS en todos los caudales (por ejemplo, 244mL frente a 234mL a 2mL/min).

En los rangos establecidos de caudales, la arenas GRP almacenan más volumen teórico que la GCS; este resultado es consistente con la porosidad mayor de GRP frente a la de GCS, lo que proporciona a GRP un volumen de poro disponible superior bajo idénticas condiciones de ensayo.

La porosidad superior de las arenas GCS domina el resultado de almacenamiento con más espacio de poro disponible, acumula más CO₂ a cualquier caudal ensayado.

En otras palabras, en este montaje experimental, la porosidad controla el volumen teórico almacenado, mientras que la conectividad (indicada por la permeabilidad y sustentada por la morfología) condiciona cómo se ocupa ese volumen cuando se ajusta el caudal.

Tabla 6.
Caudal empleado en los experimentos de inyección CO₂.

Caudal (mL min⁻¹)	GRP	GCS
10	103 ± 5.77mL	90 ± 10 mL
5	123 ± 10.41mL.	110 ± 5mL
3	153 ± 10.7 mL	148 ± 8.86mL
2	244 ± 9.90 mL	234 ± 4.24mL

Capítulo 4

4. Conclusiones

En los modelos a escala de laboratorio, el volumen teórico almacenado aumentó cuando el caudal disminuyó de 10 a 2mL/min en ambos reservorios evaluados. La arena de río-playa gruesa (GRP) almacenó más CO₂ que la arena de cuarzo super madura gruesa (GCS) en todos los caudales medidos. Los volúmenes registrados fueron: a 10mL/min, 103 y 90mL; a 5mL/min, 123 y 110mL; a 3mL/min, 153 y 148mL; y a 2mL/min, 244 y 234mL, respectivamente. Estos resultados confirman que, bajo las condiciones de la geometría experimental empleada, la reducción del caudal es un factor operativo que incrementa el volumen teórico de CO₂ alojado y que, dentro del rango ensayado, GRP mantiene una capacidad de almacenamiento superior a GCS.

El mayor aumento de volumen se registró en el tramo de menor caudal (3 a 2mL/min en ambas arenas, mostrando que un flujo lento y controlado es el que más contribuye al almacenamiento de CO₂ en sus respectivas geometrías. La diferencia entre GRP y GCS se mantuvo positiva en todos los puntos (10 y 5mL/min; 8mL en 3mL/min; 10mL en 2mL/min), corroborando que GRP conservó mayor volumen teórico almacenado que las arenas GCS en cada condición ensayada.

Referencias

- Ajayi, T., Gomes, J. S., & Bera, A. (2019). A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*, 16(5), 1028–1063. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-0340-8>
- ASTM International. (2019). *Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2434-19>
- ASTM International. (2023). *Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM International. (2024). *Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. <https://doi.org/10.1520/E0011-24>
- Ballesteros, J., Dopazo, C., Sabugal, S., García, F., & Martínez, R. (2007). *Captura y Almacenamiento de CO₂*.
- Bashir, A., Ali, M., Patil, S., Aljawad, M. S., Mahmoud, M., Al-Shehri, D., Hoteit, H., & Kamal, M. S. (2024). Comprehensive review of CO₂ geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. *Earth-Science Reviews*, 249, 104672. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104672>
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (4th ed.). Pearson Education.
- Bruant, R. G., Jr., Jr., Celia, M. A., Guswa, A. J., & Peters, C. A. (2002). Peer Reviewed: Safe Storage of CO₂ in Deep Saline Aquifers. *Environmental Science & Technology*, 36(11), 240A-245A. <https://doi.org/10.1021/es0223325>
- Claude, J. (2025, June 30). *2025 TU Delft Summer School*.
- Eikehaug, K., Haugen, M., Folkvord, O., Benali, B., Bang Larsen, E., Tinkova, A., Rotevatn, A., Nordbotten, J. M., & Fernø, M. A. (2024a). Engineering Meter-scale Porous Media Flow Experiments for Quantitative Studies of Geological Carbon Sequestration. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1143–1167. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-02025-0>
- Eikehaug, K., Haugen, M., Folkvord, O., Benali, B., Bang Larsen, E., Tinkova, A., Rotevatn, A., Nordbotten, J. M., & Fernø, M. A. (2024b). Engineering Meter-scale Porous Media Flow Experiments for Quantitative Studies of Geological Carbon Sequestration. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1143–1167. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-02025-0>
- Escobar, F. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos*.
- Fait, F., Wagner, S., Steinbach, J. C., Kandelbauer, A., & Mayer, H. A. (2023). Tailoring the Morphology of Monodisperse Mesoporous Silica Particles Using Different Alkoxysilanes as Silica

- Precursors. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11729. <https://doi.org/10.3390/ijms241411729>
- Fernø, M. A., Haugen, M., Eikehaug, K., Folkvord, O., Benali, B., Both, J. W., Størvik, E., Nixon, C. W., Gawthrope, R. L., & Nordbotten, J. M. (2024). Room-Scale CO₂ Injections in a Physical Reservoir Model with Faults. *Transport in Porous Media*, 151(5), 913–937. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-02013-4>
- Gilmore, K. A., Neufeld, J. A., & Bickle, M. J. (2020). CO₂ Dissolution Trapping Rates in Heterogeneous Porous Media. *Geophysical Research Letters*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2020GL087001>
- Glover, P. W. J., & Luo, M. (2020). The Porosity and Permeability of Binary Grain Mixtures. *Transport in Porous Media*, 132(1), 1–37. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01378-0>
- Green, C., Jackson, S. J., Gunning, J., Wilkins, A., & Ennis-King, J. (2024). Modelling the FluidFlow: Insights from Characterisation and Numerical Predictions. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1093–1111. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01969-7>
- Guida, G., Viggiani, G. M. B., & Casini, F. (2020). Multi-scale morphological descriptors from the fractal analysis of particle contour. *Acta Geotechnica*, 15(5), 1067–1080. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00772-3>
- Gunnarsson, I., Aradóttir, E. S., Oelkers, E. H., Clark, D. E., Arnarson, M. Þ., Sigfússon, B., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Matter, J. M., Stute, M., Júlíusson, B. M., & Gíslason, S. R. (2018). The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 79, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>
- Haugen, M., Saló-Salgado, L., Eikehaug, K., Benali, B., Both, J. W., Størvik, E., Folkvord, O., Juanes, R., Nordbotten, J. M., & Fernø, M. A. (2024). Physical Variability in Meter-Scale Laboratory CO₂ Injections in Faulted Geometries. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1169–1197. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-02047-8>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022*.
- Jammoul, M., Delshad, M., & Wheeler, M. F. (2024). Numerical Modeling of CO₂ Storage: Applications to the FluidFlow Experimental Setup. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1071–1091. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01996-4>

- Keilegavlen, E., Fonn, E., Johannessen, K., Eikehaug, K., Both, J. W., Fernø, M., Kvamsdal, T., Rasheed, A., & Nordbotten, J. M. (2024). PoroTwin: A Digital Twin for a FluidFlower Rig. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1241–1260. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01992-8>
- Krumbein, W. C. (1941). Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 11. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Krumbrein, W. C., & Sloss, L. L. (1951). *Stratigraphy and Sedimentation* (pp. 80–81).
- Li, L., Zhang, X., Liu, J., Xie, Q., Zhou, X., Zheng, J., & Su, Y. (2022). Research Progress and Prospect of Carbon Dioxide Utilization and Storage Based on Unconventional Oil and Gas Development. *Energies*, 15(24), 9383. <https://doi.org/10.3390/en15249383>
- Liu, D., Li, Y., & Agarwal, R. (2020). Evaluation of CO₂ Storage in a Shale Gas Reservoir Compared to a Deep Saline Aquifer in the Ordos Basin of China. *Energies*, 13(13), 3397. <https://doi.org/10.3390/en13133397>
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*.
- Nordbotten, J. M., Fernø, M., Flemisch, B., & Juanes, R. (2024). FluidFlower: A Meter-Scale Experimental Laboratory for Geological CO₂ Storage. *Transport in Porous Media*, 151(5), 859–863. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02067-y>
- Perera, M. S. A. (2017). Influences of CO₂ Injection into Deep Coal Seams: A Review. *Energy & Fuels*, 31(10), 10324–10334. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01740>
- Rasband, W. (2023, October 18). *ImageJ 1.54V*.
- Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Bing, C. H., Nagarajan, R., & Hamid, M. A. (2016). A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.053>
- Rezk, M. G., & Ibrahim, A. F. (2025). Numerical investigation of CO₂ plume migration and trapping mechanisms in the sleipner field: Does the aquifer heterogeneity matter? *Fuel*, 394, 135054. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135054>
- Saló-Salgado, L., Haugen, M., Eikehaug, K., Fernø, M., Nordbotten, J. M., & Juanes, R. (2024). Direct Comparison of Numerical Simulations and Experiments of CO_2 Injection and Migration in Geologic Media: Value of Local Data and Forecasting Capability. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1199–1240. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01972-y>

- Tian, X., Wapperom, M., Gunning, J., Jackson, S., Wilkins, A., Green, C., Ennis-King, J., & Voskov, D. (2024a). A History Matching Study for the FluidFlower Benchmark Project. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1113–1139. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-02048-7>
- Tian, X., Wapperom, M., Gunning, J., Jackson, S., Wilkins, A., Green, C., Ennis-King, J., & Voskov, D. (2024b). Correction: A History Matching Study for the FluidFlower Benchmark Project. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1141–1141. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02065-0>
- Vishal, V., & Singh, T. N. (2016). *Geologic Carbon Sequestration*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27019-7>
- Wapperom, M., Tian, X., Novikov, A., & Voskov, D. (2024). FluidFlower Benchmark: Lessons Learned from the Perspective of Subsurface Simulation. *Transport in Porous Media*, 151(5), 1033–1052. <https://doi.org/10.1007/s11242-023-01984-8>

Apéndice

Figura 25.
Ejemplo de las partículas utilizadas para la caracterización morfológica.

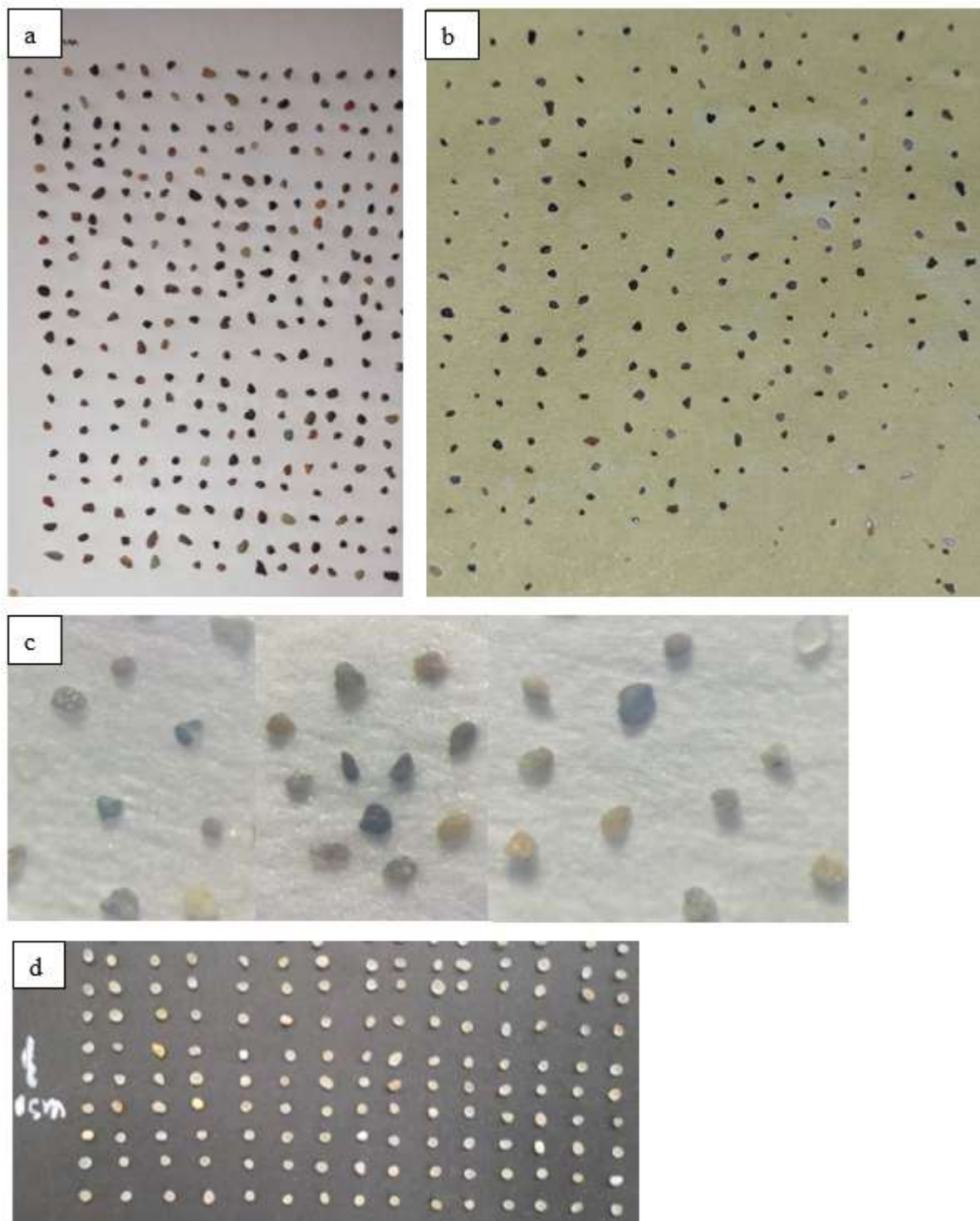


Tabla 7.

Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas GRP.

Num	Label	Area	Major	Minor	Round	Sphericity	Classification
1	GRP	0.0599	0.3238	0.2354	0.8434	0.7272	Sub-Roundness and High sphericity
2	GRP	0.0532	0.2774	0.244	0.8773	0.8794	Sub-Roundness and High sphericity
3	GRP	0.0807	0.3574	0.2876	0.8252	0.8047	Sub-Roundness and High sphericity
4	GRP	0.0818	0.4368	0.2384	0.7679	0.5458	Sub-Roundness and Medium sphericity
5	GRP	0.0456	0.246	0.236	0.8938	0.9593	Sub-Roundness and Ultra sphericity
6	GRP	0.1162	0.4604	0.3212	0.753	0.6977	Sub-Roundness and Medium sphericity
7	GRP	0.0644	0.3134	0.2617	0.8893	0.8351	Sub-Roundness and High sphericity
8	GRP	0.0723	0.3802	0.2421	0.7841	0.6367	Sub-Roundness and Medium sphericity
9	GRP	0.0711	0.3569	0.2536	0.8625	0.7105	Sub-Roundness and High sphericity
10	GRP	0.0804	0.4199	0.2439	0.7939	0.581	Sub-Roundness and Medium sphericity
11	GRP	0.0681	0.372	0.2329	0.8227	0.6261	Sub-Roundness and Medium sphericity
12	GRP	0.0784	0.3945	0.253	0.8283	0.6414	Sub-Roundness and Medium sphericity
13	GRP	0.048	0.2921	0.2093	0.8675	0.7163	Sub-Roundness and High sphericity
14	GRP	0.0667	0.3137	0.2709	0.8549	0.8638	Sub-Roundness and High sphericity
15	GRP	0.0608	0.3076	0.2516	0.8831	0.8179	Sub-Roundness and High sphericity
16	GRP	0.0445	0.2536	0.2233	0.8943	0.8808	Sub-Roundness and High sphericity
17	GRP	0.0524	0.3211	0.2076	0.7607	0.6464	Sub-Roundness and Medium sphericity
18	GRP	0.0539	0.2906	0.2359	0.8762	0.8117	Sub-Roundness and High sphericity
19	GRP	0.1236	0.5058	0.3111	0.8081	0.6151	Sub-Roundness and Medium sphericity
20	GRP	0.0737	0.443	0.2117	0.7312	0.4779	Sub-Roundness and Low sphericity
21	GRP	0.0362	0.2412	0.1914	0.8715	0.7935	Sub-Roundness and High sphericity
22	GRP	0.0643	0.2969	0.2756	0.8977	0.9284	Sub-Roundness and Ultra sphericity
23	GRP	0.089	0.4171	0.2716	0.831	0.6513	Sub-Roundness and Medium sphericity
24	GRP	0.0861	0.3845	0.2852	0.8528	0.7418	Sub-Roundness and High sphericity
25	GRP	0.0603	0.3086	0.2488	0.844	0.806	Sub-Roundness and High sphericity
26	GRP	0.0442	0.248	0.2269	0.8753	0.9146	Sub-Roundness and Ultra sphericity
27	GRP	0.0586	0.3542	0.2108	0.7998	0.5952	Sub-Roundness and Medium sphericity
28	GRP	0.0872	0.4072	0.2726	0.8411	0.6696	Sub-Roundness and Medium sphericity
29	GRP	0.0728	0.3511	0.2641	0.7862	0.7522	Sub-Roundness and High sphericity
30	GRP	0.0501	0.3005	0.2123	0.8564	0.7064	Sub-Roundness and High sphericity

31	GRP	0.0686	0.3087	0.2829	0.8653	0.9164	Sub-Roundness and Ultra sphericity
32	GRP	0.0489	0.2882	0.2159	0.839	0.7491	Sub-Roundness and High sphericity
33	GRP	0.0902	0.3864	0.2971	0.86	0.7689	Sub-Roundness and High sphericity
34	GRP	0.0543	0.2857	0.242	0.8752	0.8468	Sub-Roundness and High sphericity
35	GRP	0.0602	0.3134	0.2444	0.8827	0.7797	Sub-Roundness and High sphericity
36	GRP	0.0451	0.2701	0.2128	0.8698	0.7878	Sub-Roundness and High sphericity
37	GRP	0.0472	0.2577	0.233	0.8533	0.904	Sub-Roundness and Ultra sphericity
38	GRP	0.054	0.2851	0.2413	0.8576	0.8462	Sub-Roundness and High sphericity
39	GRP	0.0556	0.3007	0.2354	0.8856	0.783	Sub-Roundness and High sphericity
40	GRP	0.0793	0.3802	0.2654	0.8015	0.6981	Sub-Roundness and Medium sphericity
41	GRP	0.0804	0.4066	0.2518	0.8222	0.6193	Sub-Roundness and Medium sphericity
42	GRP	0.0539	0.3454	0.1985	0.7842	0.5747	Sub-Roundness and Medium sphericity
43	GRP	0.0422	0.2597	0.2066	0.8722	0.7955	Sub-Roundness and High sphericity
44	GRP	0.0444	0.2534	0.2233	0.8774	0.8812	Sub-Roundness and High sphericity
45	GRP	0.0618	0.3216	0.2447	0.8381	0.7609	Sub-Roundness and High sphericity
46	GRP	0.0481	0.2568	0.2384	0.8786	0.9284	Sub-Roundness and Ultra sphericity
47	GRP	0.0635	0.2991	0.2703	0.8908	0.9037	Sub-Roundness and Ultra sphericity
48	GRP	0.0555	0.3019	0.2343	0.8394	0.7762	Sub-Roundness and High sphericity
49	GRP	0.0779	0.3488	0.2844	0.8548	0.8152	Sub-Roundness and High sphericity
50	GRP	0.0627	0.3088	0.2585	0.8658	0.8371	Sub-Roundness and High sphericity

Tabla 10.

Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas GQS

Num	Label	Area	Major	Minor	Round 1	Sphericity 1	Classification
1	MRP	51.754	26.953	24.448	0.8652	0.907	Sub-Roundness and Ultra sphericity
2	MRP	56.304	30.785	23.287	0.7824	0.7564	Sub-Roundness and High sphericity
3	MRP	64.056	32.536	25.067	0.8606	0.7704	Sub-Roundness and High sphericity
4	MRP	42.383	26.453	20.400	0.846	0.7712	Sub-Roundness and High sphericity
5	MRP	43.117	27.728	19.799	0.8429	0.714	Sub-Roundness and High sphericity
6	MRP	53.175	27.203	24.888	0.8896	0.9149	Sub-Roundness and Ultra sphericity
7	MRP	66.263	30.538	27.627	0.8731	0.9047	Sub-Roundness and Ultra sphericity
8	MRP	45.881	26.101	22.382	0.816	0.8575	Sub-Roundness and High sphericity
9	MRP	40.457	24.882	20.702	0.8549	0.832	Sub-Roundness and High sphericity
10	MRP	37.534	23.205	20.595	0.8254	0.8875	Sub-Roundness and High sphericity
11	MRP	60.045	29.123	26.251	0.8686	0.9014	Sub-Roundness and Ultra sphericity
12	MRP	45.013	27.541	20.810	0.8265	0.7556	Sub-Roundness and High sphericity
13	MRP	50.414	28.238	22.732	0.8264	0.805	Sub-Roundness and High sphericity
14	MRP	42.597	26.416	20.531	0.8707	0.7772	Sub-Roundness and High sphericity
15	MRP	46.710	24.695	24.083	0.8216	0.9752	Sub-Roundness and Ultra sphericity
16	MRP	37.289	23.711	20.023	0.8772	0.8445	Sub-Roundness and High sphericity
17	MRP	65.980	30.207	27.810	0.8801	0.9206	Sub-Roundness and Ultra sphericity
18	MRP	56.487	30.678	23.444	0.8667	0.7642	Sub-Roundness and High sphericity
19	MRP	47.349	28.921	20.845	0.8072	0.7207	Sub-Roundness and High sphericity
20	MRP	48.716	26.263	23.618	0.8752	0.8993	Sub-Roundness and High sphericity
21	MRP	39.964	30.412	16.731	0.7794	0.5502	Sub-Roundness and Medium sphericity
22	MRP	65.601	31.697	26.352	0.8687	0.8314	Sub-Roundness and High sphericity
23	MRP	50.682	29.212	22.090	0.8536	0.7562	Sub-Roundness and High sphericity
24	MRP	42.070	23.519	22.775	0.8938	0.9684	Sub-Roundness and Ultra sphericity
25	MRP	43.340	26.180	21.078	0.8624	0.8051	Sub-Roundness and High sphericity
26	MRP	41.346	25.529	20.621	0.8717	0.8077	Sub-Roundness and High sphericity
27	MRP	52.202	30.726	21.632	0.8164	0.704	Sub-Roundness and High sphericity

28	MRP	39.751	23.333	21.691	0.8824	0.9296	Sub-Roundness and Ultra sphericity
29	MRP	44.526	25.491	22.240	0.844	0.8725	Sub-Roundness and High sphericity
30	MRP	73.293	35.398	26.363	0.8372	0.7447	Sub-Roundness and High sphericity
31	MRP	49.407	27.478	22.893	0.8185	0.8331	Sub-Roundness and High sphericity
32	MRP	53.806	29.888	22.921	0.8542	0.7669	Sub-Roundness and High sphericity
33	MRP	49.663	27.523	22.974	0.849	0.8347	Sub-Roundness and High sphericity
34	MRP	44.942	26.944	21.237	0.8541	0.7882	Sub-Roundness and High sphericity
35	MRP	52.348	30.189	22.078	0.8412	0.7313	Sub-Roundness and High sphericity
36	MRP	48.605	27.839	22.230	0.8493	0.7985	Sub-Roundness and High sphericity
37	MRP	54.178	32.692	21.100	0.7704	0.6454	Sub-Roundness and Medium sphericity
38	MRP	51.725	28.953	22.746	0.8457	0.7856	Sub-Roundness and High sphericity
39	MRP	58.909	30.173	24.858	0.8592	0.8239	Sub-Roundness and High sphericity
40	MRP	38.242	24.315	20.026	0.8552	0.8236	Sub-Roundness and High sphericity
41	MRP	42.602	25.588	21.199	0.8656	0.8285	Sub-Roundness and High sphericity
42	MRP	57.519	28.925	25.319	0.8696	0.8754	Sub-Roundness and High sphericity
43	MRP	50.175	27.240	23.453	0.8751	0.861	Sub-Roundness and High sphericity
44	MRP	56.510	31.838	22.599	0.827	0.7098	Sub-Roundness and High sphericity
45	MRP	46.157	26.751	21.969	0.8584	0.8212	Sub-Roundness and High sphericity
46	MRP	37.462	23.052	20.691	0.8365	0.8976	Sub-Roundness and High sphericity
47	MRP	63.359	32.408	24.892	0.8568	0.7681	Sub-Roundness and High sphericity
48	MRP	63.541	29.666	27.271	0.8306	0.9193	Sub-Roundness and Ultra sphericity
49	MRP	74.912	33.216	28.715	0.7702	0.8645	Sub-Roundness and High sphericity
50	MRP	53.466	27.670	24.602	0.8833	0.8891	Sub-Roundness and High sphericity

Tabla 11.

Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas MRP.

Num	Label	Area	Major	Minor	Round 1	Sphericity 1	Classification
1	MRP	66.454	33.363	25.361	0.7602	0.6339	Sub-Roundness and Medium sphericity
2	MRP	60.704	29.781	25.953	0.8715	0.8314	Sub-Roundness and High sphericity
3	MRP	18.860	19.729	12.171	0.6169	0.7827	Sub-Angular and High sphericity
4	MRP	37.339	25.223	18.849	0.7473	0.8383	Sub-Roundness and High sphericity
5	MRP	35.934	24.465	18.701	0.7644	0.7962	Sub-Roundness and High sphericity
6	MRP	38.556	26.249	18.702	0.7125	0.7581	Sub-Roundness and High sphericity
7	MRP	24.577	20.663	15.144	0.7329	0.6126	Sub-Roundness and Medium sphericity
8	MRP	29.046	20.994	17.616	0.8391	0.6286	Sub-Roundness and Medium sphericity
9	MRP	46.402	28.369	20.825	0.7341	0.7809	Sub-Roundness and High sphericity
10	MRP	51.458	32.256	20.312	0.6297	0.7208	Sub-Angular and High sphericity
11	MRP	20.395	20.237	12.832	0.6341	0.4347	Sub-Angular and Low sphericity
12	MRP	25.681	18.361	17.809	0.9699	0.8701	High Roundness and High sphericity
13	MRP	29.891	23.514	16.186	0.6884	0.7801	Sub-Angular and High sphericity
14	MRP	27.263	22.202	15.634	0.7042	0.8278	Sub-Roundness and High sphericity
15	MRP	20.241	16.958	15.198	0.8962	0.7339	Sub-Roundness and High sphericity
16	MRP	74.107	39.828	23.690	0.5948	0.7493	Sub-Angular and High sphericity
17	MRP	50.348	27.435	23.366	0.8517	0.8263	Sub-Roundness and High sphericity
18	MRP	52.719	35.214	19.062	0.5413	0.7283	Sub-Angular and High sphericity
19	MRP	53.536	32.174	21.186	0.6585	0.8231	Sub-Angular and High sphericity
20	MRP	28.002	20.943	17.024	0.8129	0.8669	Sub-Roundness and High sphericity
21	MRP	42.222	26.125	20.577	0.7876	0.8161	Sub-Roundness and High sphericity
22	MRP	41.356	25.548	20.611	0.8067	0.8583	Sub-Roundness and High sphericity
23	MRP	17.501	19.361	11.509	0.5945	0.7952	Sub-Angular and High sphericity
24	MRP	45.321	26.111	22.099	0.8464	0.8496	Sub-Roundness and High sphericity
25	MRP	70.070	34.717	25.698	0.7402	0.748	Sub-Roundness and High sphericity
26	MRP	38.645	25.878	19.014	0.7348	0.8447	Sub-Roundness and High sphericity

27	MRP	29.532	24.068	15.623	0.6491	0.7152	Sub-Angular and High sphericity
28	MRP	19.120	18.733	12.995	0.6937	0.8162	Sub-Angular and High sphericity
29	MRP	18.538	17.912	13.177	0.7356	0.7868	Sub-Roundness and High sphericity
30	MRP	26.656	22.546	15.053	0.6677	0.8264	Sub-Angular and High sphericity
31	MRP	27.728	20.204	17.474	0.8649	0.8484	Sub-Roundness and High sphericity
32	MRP	61.642	33.395	23.502	0.7038	0.7739	Sub-Roundness and High sphericity
33	MRP	21.545	18.347	14.952	0.815	0.8603	Sub-Roundness and High sphericity
34	MRP	47.385	31.228	19.320	0.6187	0.7587	Sub-Angular and High sphericity
35	MRP	33.148	24.445	17.266	0.7063	0.5345	Sub-Roundness and Medium sphericity
36	MRP	32.824	20.812	20.082	0.9649	0.8205	High Roundness and High sphericity
37	MRP	36.145	22.362	20.580	0.9203	0.892	High Roundness and High sphericity
38	MRP	46.163	26.273	22.372	0.8515	0.8473	Sub-Roundness and High sphericity
39	MRP	21.267	18.726	14.460	0.7722	0.8617	Sub-Roundness and High sphericity
40	MRP	21.407	21.239	12.833	0.6042	0.7913	Sub-Angular and High sphericity
41	MRP	18.140	20.470	11.283	0.5512	0.7795	Sub-Angular and High sphericity
42	MRP	56.482	35.146	20.462	0.5822	0.7815	Sub-Angular and High sphericity
43	MRP	22.730	19.607	14.761	0.7528	0.7244	Sub-Roundness and High sphericity
44	MRP	20.523	19.620	13.318	0.6788	0.8089	Sub-Angular and High sphericity
45	MRP	39.554	23.999	20.985	0.8744	0.841	Sub-Roundness and High sphericity
46	MRP	23.164	20.376	14.475	0.7104	0.729	Sub-Roundness and High sphericity
47	MRP	30.886	25.714	15.293	0.5948	0.8226	Sub-Angular and High sphericity
48	MRP	18.920	21.136	11.397	0.5392	0.7839	Sub-Angular and High sphericity
49	MRP	51.371	34.240	19.103	0.5579	0.7292	Sub-Angular and High sphericity
50	MRP	23.710	20.361	14.827	0.7282	0.7853	Sub-Roundness and High sphericity

Tabla 12.
Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas MQS.

Num	Label	Area	Major	Minor	Round	Sphericity	Classification
1	MQS	10.796	12.019	11.437	0.9516	0.8915	High Roundness and High sphericity
2	MQS	10.741	12.527	10.918	0.8716	0.8494	Sub-Roundness and High sphericity
3	MQS	0.9671	11.366	10.834	0.9532	0.8732	High Roundness and High sphericity
4	MQS	11.870	13.612	11.103	0.8157	0.8812	Sub-Roundness and High sphericity
5	MQS	11.910	14.130	10.732	0.7595	0.8863	Sub-Roundness and High sphericity
6	MQS	10.844	12.323	11.204	0.9093	0.8934	High Roundness and High sphericity
7	MQS	11.118	12.470	11.352	0.9104	0.8696	High Roundness and High sphericity
8	MQS	11.936	13.292	11.434	0.8602	0.8883	Sub-Roundness and High sphericity
9	MQS	10.664	12.027	11.289	0.9386	0.901	High Roundness and Ultra sphericity
10	MQS	13.785	14.365	12.219	0.8506	0.874	Sub-Roundness and High sphericity
11	MQS	10.452	12.757	10.432	0.8177	0.8486	Sub-Roundness and High sphericity
12	MQS	0.8998	12.232	0.9366	0.7657	0.8577	Sub-Roundness and High sphericity
13	MQS	0.9557	12.296	0.9896	0.8048	0.8475	Sub-Roundness and High sphericity
14	MQS	12.660	14.537	11.089	0.7628	0.8371	Sub-Roundness and High sphericity
15	MQS	0.738	10.247	0.917	0.8949	0.884	Sub-Roundness and High sphericity
16	MQS	10.677	14.177	0.9589	0.6764	0.8483	Sub-Angular and High sphericity
17	MQS	11.750	12.668	11.809	0.9321	0.8746	High Roundness and High sphericity
18	MQS	10.122	11.707	11.008	0.9402	0.9033	High Roundness and Ultra sphericity
19	MQS	10.575	12.685	10.614	0.8367	0.8816	Sub-Roundness and High sphericity
20	MQS	0.9656	11.926	10.308	0.8643	0.8873	Sub-Roundness and High sphericity
21	MQS	0.8724	11.016	10.083	0.9153	0.8713	High Roundness and High sphericity
22	MQS	10.809	13.096	10.509	0.8025	0.8648	Sub-Roundness and High sphericity
23	MQS	0.8433	11.555	0.9292	0.8042	0.8462	Sub-Roundness and High sphericity
24	MQS	0.9196	11.920	0.9823	0.8241	0.8706	Sub-Roundness and High sphericity
25	MQS				0.8238	0.8503	Sub-Roundness and High sphericity
26	MQS	10.219	11.736	11.087	0.9447	0.8811	High Roundness and High sphericity
27	MQS	11.224	14.295	0.9997	0.6994	0.8381	Sub-Angular and High sphericity

28	MQS	11.095	13.027	10.844	0.8325	0.8779	Sub-Roundness and High sphericity
29	MQS	10.223	12.165	10.700	0.8795	0.8794	Sub-Roundness and High sphericity
30	MQS	12.088	13.320	11.555	0.8675	0.8928	Sub-Roundness and High sphericity
31	MQS	12.804	14.601	11.165	0.7647	0.8529	Sub-Roundness and High sphericity
32	MQS	0.9491	11.896	10.158	0.8539	0.891	Sub-Roundness and High sphericity
33	MQS	0.8701	11.418	0.9702	0.8497	0.833	Sub-Roundness and High sphericity
34	MQS	11.098	13.206	10.700	0.8103	0.8535	Sub-Roundness and High sphericity
35	MQS	13.600	14.041	12.333	0.8783	0.8685	Sub-Roundness and High sphericity
36	MQS	0.9261	13.131	0.898	0.6839	0.8164	Sub-Angular and High sphericity
37	MQS	0.8458	11.846	0.909	0.7674	0.8847	Sub-Roundness and High sphericity
38	MQS	10.047	11.751	10.887	0.9265	0.891	High Roundness and High sphericity
39	MQS	0.9565	12.215	0.997	0.8162	0.7936	Sub-Roundness and High sphericity
40	MQS	16.527	16.420	12.815	0.7804	0.872	Sub-Roundness and High sphericity
41	MQS	0.9448	12.056	0.9978	0.8277	0.8511	Sub-Roundness and High sphericity
42	MQS	0.9747	12.791	0.9702	0.7585	0.8678	Sub-Roundness and High sphericity
43	MQS	0.9608	12.640	0.9678	0.7656	0.8494	Sub-Roundness and High sphericity
44	MQS	10.713	12.965	10.521	0.8115	0.872	Sub-Roundness and High sphericity
45	MQS	10.424	12.851	10.328	0.8037	0.8657	Sub-Roundness and High sphericity
46	MQS	0.8157	11.416	0.9098	0.7969	0.8507	Sub-Roundness and High sphericity
47	MQS	0.7235	11.205	0.8221	0.7336	0.8576	Sub-Roundness and High sphericity
48	MQS	0.9563	12.243	0.9945	0.8123	0.8626	Sub-Roundness and High sphericity
49	MQS	0.8816	11.808	0.9506	0.805	0.8198	Sub-Roundness and High sphericity
50	MQS	13.019	13.434	12.338	0.9184	0.8769	High Roundness and High sphericity

Tabla 13.

Ejemplo de las 50 primeras partículas de las arenas FPR.

Num	Label	Area	Major	Minor	Round 1	Sphericity 1	Classification
1	FRP	41.698	27.587	19.245	0.6976	0.766	Sub-Angular and High sphericity
2	FRP	36.212	26.559	17.360	0.6536	0.8028	Sub-Angular and High sphericity
3	FRP	33.060	24.747	17.009	0.6873	0.7982	Sub-Angular and High sphericity
4	FRP	22.095	20.669	13.611	0.6585	0.8165	Sub-Angular and High sphericity
5	FRP	56.200	30.053	23.810	0.7923	0.8043	Sub-Roundness and High sphericity
6	FRP	45.373	30.410	18.997	0.6247	0.7963	Sub-Angular and High sphericity
7	FRP	109.259	39.866	34.895	0.8753	0.7683	Sub-Roundness and High sphericity
8	FRP	63.786	40.220	20.193	0.5021	0.58	Sub-Angular and Medium sphericity
9	FRP	63.574	33.694	24.024	0.713	0.8182	Sub-Roundness and High sphericity
10	FRP	78.683	40.629	24.658	0.6069	0.7844	Sub-Angular and High sphericity
11	FRP	85.020	38.080	28.427	0.7465	0.8374	Sub-Roundness and High sphericity
12	FRP	41.090	32.745	15.977	0.4879	0.7207	Angular and High sphericity
13	FRP	48.552	29.890	20.682	0.6919	0.7702	Sub-Angular and High sphericity
14	FRP	62.833	34.573	23.140	0.6693	0.8236	Sub-Angular and High sphericity
15	FRP	76.355	42.586	22.829	0.5361	0.7206	Sub-Angular and High sphericity
16	FRP	64.959	36.614	22.589	0.6169	0.681	Sub-Angular and Medium sphericity
17	FRP	68.355	37.638	23.123	0.6144	0.7604	Sub-Angular and High sphericity
18	FRP	88.295	36.631	30.690	0.8378	0.6763	Sub-Roundness and Medium sphericity
19	FRP	47.110	29.678	20.211	0.681	0.7259	Sub-Angular and High sphericity
20	FRP	52.604	28.574	23.440	0.8203	0.7845	Sub-Roundness and High sphericity
21	FRP	91.007	47.893	24.194	0.5052	0.6607	Sub-Angular and Medium sphericity
22	FRP	85.940	47.313	23.127	0.4888	0.5737	Angular and Medium sphericity
23	FRP	115.361	51.041	28.777	0.5638	0.6608	Sub-Angular and Medium sphericity
24	FRP	44.348	27.129	20.814	0.7672	0.8218	Sub-Roundness and High sphericity
25	FRP	40.199	27.524	18.596	0.6756	0.7872	Sub-Angular and High sphericity
26	FRP	82.148	36.264	28.842	0.7953	0.8462	Sub-Roundness and High sphericity
27	FRP	38.952	28.228	17.570	0.6224	0.7976	Sub-Angular and High sphericity

28	FRP	107.382	42.407	32.241	0.7603	0.8219	Sub-Roundness and High sphericity
29	FRP	77.579	35.921	27.498	0.7655	0.7254	Sub-Roundness and High sphericity
30	FRP	63.733	30.414	26.681	0.8773	0.7857	Sub-Roundness and High sphericity
31	FRP	47.117	27.092	22.143	0.8173	0.8313	Sub-Roundness and High sphericity
32	FRP	78.830	34.965	28.705	0.821	0.8264	Sub-Roundness and High sphericity
33	FRP	58.550	31.694	23.521	0.7421	0.754	Sub-Roundness and High sphericity
34	FRP	97.885	42.203	29.531	0.6997	0.7963	Sub-Angular and High sphericity
35	FRP	106.908	38.595	35.268	0.9138	0.6944	High Roundness and Medium sphericity
36	FRP	93.335	41.500	28.636	0.69	0.7587	Sub-Angular and High sphericity
37	FRP	27.821	22.334	15.861	0.7102	0.8499	Sub-Roundness and High sphericity
38	FRP	18.863	19.286	12.453	0.6457	0.7967	Sub-Angular and High sphericity
39	FRP	49.980	27.052	23.524	0.8696	0.8449	Sub-Roundness and High sphericity
40	FRP	22.929	18.577	15.715	0.846	0.8604	Sub-Roundness and High sphericity
41	FRP	99.522	37.673	33.635	0.8928	0.7766	Sub-Roundness and High sphericity
42	FRP	34.427	26.708	16.412	0.6145	0.7496	Sub-Angular and High sphericity
43	FRP	76.134	35.370	27.406	0.7748	0.7781	Sub-Roundness and High sphericity
44	FRP	31.615	26.520	15.179	0.5724	0.7976	Sub-Angular and High sphericity
45	FRP	101.538	41.791	30.936	0.7403	0.739	Sub-Roundness and High sphericity
46	FRP	115.051	41.944	34.924	0.8326	0.7723	Sub-Roundness and High sphericity
47	FRP	57.896	35.674	20.663	0.5792	0.7691	Sub-Angular and High sphericity
48	FRP	54.161	28.771	23.969	0.8331	0.8399	Sub-Roundness and High sphericity
49	FRP	79.369	34.296	29.466	0.8592	0.7463	Sub-Roundness and High sphericity
50	FRP	38.140	27.881	17.418	0.6247	0.6963	Sub-Angular and Medium sphericity

Para el cálculo de la gravedad específica, se empleó la siguiente ecuación:

$$G_t = \frac{W_s}{W_{mw} - (W_{mws} - W_s)}$$

Donde, W_s es el Peso de la muestra seca, W_{mw} es el Peso de Frasco, sedimento y agua y W_{mws} es = Peso de Matraz, sedimento y agua.

Tabla 14.

Gravedades específicas de las muestras de río-playa y de cuarzo supermaduras.

Gravedad específica					
Arenas de Río-playa	Grueso	2.68	2.69	2.69	2.69
	Medio	2.76	2.78	2.77	2.77
	Fino	2.88	2.92	2.92	2.91
Arenas de cuarzo super maduras	Grueso	2.68	2.67	2.68	2.68
	Medio	2.66	2.66	2.65	2.66
	Fino	2.66	2.66	2.65	2.66

Para el cálculo de la presión litostática, se empleó

$$P_{\text{Lithostatic}} = P_{\text{Coarse}} + P_{\text{Medium}} + P_{\text{Fine}}$$

$$P_{\text{Lithostatic}} = (\rho_{\text{Water}} * g) (G_{\text{Coarse}} * h_{\text{Coarse}} + G_{\text{Medium}} * h_{\text{Medium}} + G_{\text{Fine}} * h_{\text{Fine}})$$

Donde, G_{Coarse} es la gravedad específica de las arenas CRB, G_{Medium} es la gravedad específica de las arenas MRB y G_{Fine} representa la gravedad específica de las FRB, h_{gruesas} es el espesor de las CRB, h_{medias} es el espesor de las arenas MRB y h_{finas} es el espesor de las arenas FRB, ρ_{Water} es la densidad del agua (1000 kg/m³) y g es la gravedad (9.8 m/s²).

Para determinar los espesores de la capa, se estableció una relación que aproximó los espesores de las capas de un antiforme simulando pozos a la profundidad de 1km.

Tabla 15.

Porcentajes de las capas de arenas reservorio, transición y sello según la profundidad del pozo.

Profundidad del pozo (m)	% de GRP 63,33%	% de MRP 10,00%	% de FRP 26,67%
	Espesor	Espesor	Espesor
500	316,65	50	133,35
1000	633,3	100	266,7
2000	1266,6	200	533,4
2500	1583,25	250	666,75
3000	1899,9	300	800,1
3500	2216,55	350	933,45
4000	2533,2	400	1066,8
4500	2849,85	450	1200,15

A continuación, se muestra la tabla de presiones obtenida para las diferentes profundidades.

Tabla 16.

Presiones litostáticas obtenidas.

Prof. (m)	PLITO Gruesa	PLITO Media	PLITO Fina	PLITO_Total (Pa)	Conversión kg/m2	Presión_Pantalla (kg/m2)	Masa (kg)
500	8346726,176	1359666	3801523,131	13507915,31	1.377.424	427,0014476	1,28
1000	16693452,35	2719332	7603046,262	27015830,61	2.754.848	854,0028949	2,56
2000	33386904,7	5438664	15206092,52	54031661,23	5.509.696	1708,00579	5,12
2500	41733630,88	6798330	19007615,66	67539576,53	6.887.120	2135,007238	6,41
3000	50080357,05	8157996	22809138,79	81047491,84	8.264.544	2562,008685	7,69
3500	58427083,23	9517662	26610661,92	94555407,15	9.641.968	2989,010133	8,97
4000	66773809,4	10877328	30412185,05	108063322,5	11.019.392	3416,011581	10,25
4500	75120535,58	12236994	34213708,18	121571237,8	12.396.816	3843,013029	11,53

Para el cálculo de la porosidad se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$n = e/1 + e$$

$$e = V_v/V_s$$

$$V_v = V_f - V_s$$

Donde: V_f es el volumen del recipiente, V_v es el volumen de vacío,

V_s corresponde al volumen del sólido, e es relación de vacíos y n es la porosidad.

Tabla 17.
Ejemplo de porosidades calculadas para las muestras.

Num	Datos	Masa GCS (g)	Masa MCS (g)	Masa FCS (g)	Vol. del sólido	Vol. de vacíos	Relación de vacíos	Porosidad	Vol. del sólido	Vol. de vacíos	Relación de vacíos	Porosidad
1	Masa inicial	711.68	99.74	343.59								
	Masa final	177.29	13.13	44.25	199.747	90.023	0.451	0.311	32.589	10.386	0.319	0.242
	Masa del sólido	534.39	86.61	299.34								
2	Masa inicial	626.78	92.33	352.36								
	Masa final	95.21	6.98	59.6	198.693	91.077	0.458	0.314	32.115	10.860	0.338	0.253
	Masa del sólido	531.57	85.35	292.76								
3	Masa inicial	672.9	168.14	264.76								
	Masa final	137.55	82.36	27.72	200.106	89.664	0.448	0.309	32.276	10.699	0.331	0.249
	Masa del sólido	535.35	85.78	292.48								
4	Masa inicial	595.88	232.34	307.7								
	Masa final	60.04	142.52	9.3	200.289	89.481	0.447	0.309	33.797	9.178	0.272	0.214
	Masa del sólido	535.84	89.82	298.4								
5	Masa inicial	1338.4 4	703.23	1163.7 9								
	Masa final	804.01	617.05	866.73	199.762	90.008	0.451	0.311	32.427	10.548	0.325	0.245
	Masa del sólido	534.43	86.18	297.06								
6	Masa inicial	811.01	617.05	866.68								
	Masa final	275.51	524.06	573.86	200.162	89.608	0.448	0.309	34.989	7.986	0.228	0.186
	Masa del sólido	535.5	92.99	292.82								
7	Masa inicial	983.38	526.1	573.84								
	Masa final	449.86	433.76	279.66	199.422	90.348	0.453	0.312	34.745	8.230	0.237	0.192
	Masa del sólido	533.52	92.34	294.18								
8	Masa inicial	1489	433.76	384.69								
	Masa final	954.55	346.64	90.14	199.769	90.001	0.451	0.311	32.781	10.194	0.311	0.237
	Masa del sólido	534.45	87.12	294.55								

	Masa inicial	1421.8 4	346.64	526.45								
9	Masa final	887.32	256.8	230.87	199.796	89.974	0.450	0.311	33.804	9.171	0.271	0.213
	Masa del sólido	534.52	89.84	295.58								
	Masa inicial	1589.7 4	256.8	852.41								
10	Masa final	1053.8 5	170.28	560.05	200.308	89.462	0.447	0.309	32.55	10.420	0.320	0.242
	Masa del sólido	535.89	86.52	292.36								
	Promedio	534.54 6	88.255	294.95 3			0.447	0.310			0.295	0.227
