Mini VSUL

Guia de construccion y uso

Visualizador de Captura y Almacenamiento Geologico de CO_2

Basado en el modelo Mini VSUL del Stanford SUETRI-A group
vsul.stanford.edu/mini

Indice de contenidos

1. Introduccion

El Mini VSUL es un modelo fisico bidimensional a escala de banco (aprox. 32 x 25 cm) que permite visualizar la migracion y el atrapamiento de CO_2 en medios porosos. Fue desarrollado por el grupo SUETRI-A de la Universidad de Stanford como herramienta educativa para demonstraciones en aulas, laboratorios y actividades de divulgacion.

A diferencia de modelos conceptuales, el Mini VSUL permite observar en tiempo real como el CO_2 sube por flotabilidad, como el sello impermeable lo confina, como se disuelve en el agua de formacion cambiando el color del indicador de pH, y como las fallas geologicas pueden bloquear o facilitar la migracion.

Que conceptos ilustra

Material	Cantidad	Equivale a...
Capa de arena gruesa	Roca reservorio (alta porosidad y permeabilidad)	*Roca almacen de CO_2*
Capa de arena fina	Roca sello / caprock (baja permeabilidad)	*Barrera impermeable*
Agua con indicador de pH	Salmuera del subsuelo (agua de formacion)	*Fluido desplazado*
CO_2 de la soda	CO_2 inyectado a presion en yacimiento	*Gas capturado*
Cambio de color	Disolucion de CO_2 en agua (acidificacion)	*Almacenamiento en solucion*
Tabique vertical	Falla geologica sellada o abierta	*Control estructural del flujo*

2. Materiales necesarios

2.1 Estructura de la caja

Material	Cantidad	Equivale a...
2 placas de acrilico transparente 3mm	32 x 25 cm cada una	*Paredes transparentes del modelo*
Marco perimetral de aluminio o madera	~5 mm de espesor, 4 lados	*Separacion entre placas*
8 tornillos M4 + tuercas y arandelas	Tornillos de 25 mm	*Union de las placas*
Silicona transparente (tubo 100ml)	1 tubo	*Sellado de bordes*
1 niple o fitting de 5mm	Para el puerto de inyeccion	*Entrada del CO_2*

2.2 Relleno

Material	Cantidad	Equivale a...
Arena gruesa de construccion lavada	300-400 g	*Roca reservorio porosa*
Arena fina de jardin o silice	100-150 g	*Sello impermeable*
Agua destilada o filtrada	500-700 ml	*Agua de formacion / salmuera*
Repollo colorado O azul de bromotimol	1/4 repollo o 0.1g NaBTB	*Indicador de pH*

2.3 Inyeccion de CO_2

Material	Cantidad	Equivale a...
Botella de agua con gas o soda	1 botella 500ml por experimento	*Fuente de CO_2 sin presion*
Manguera de silicona 3mm diametro	30-40 cm	*Conducto del CO_2 al modelo*
Jeringa de 10-20 ml (sin aguja)	1 unidad	*Control de flujo (opcional)*
Pinza Mohr o clip de cierre	1 unidad	*Regulacion del caudal*

2.4 Para la configuracion de falla (opcional)

Material	Cantidad	Equivale a...
Lamina de acrilico 1mm	32 x 25 cm (misma medida)	*Guia para colocar el tabique*
Arcilla o bentonita	50-100 g	*Material de falla sellada*
Arena extra gruesa o grava fina	50 g	*Material de falla abierta*

> *Consejo: El acrilico se consigue en acrileras de Neuquen cortado a medida. Pedir que hagan el taladro del puerto de inyeccion (o 5mm en el borde inferior central).*

3. Construccion del modelo

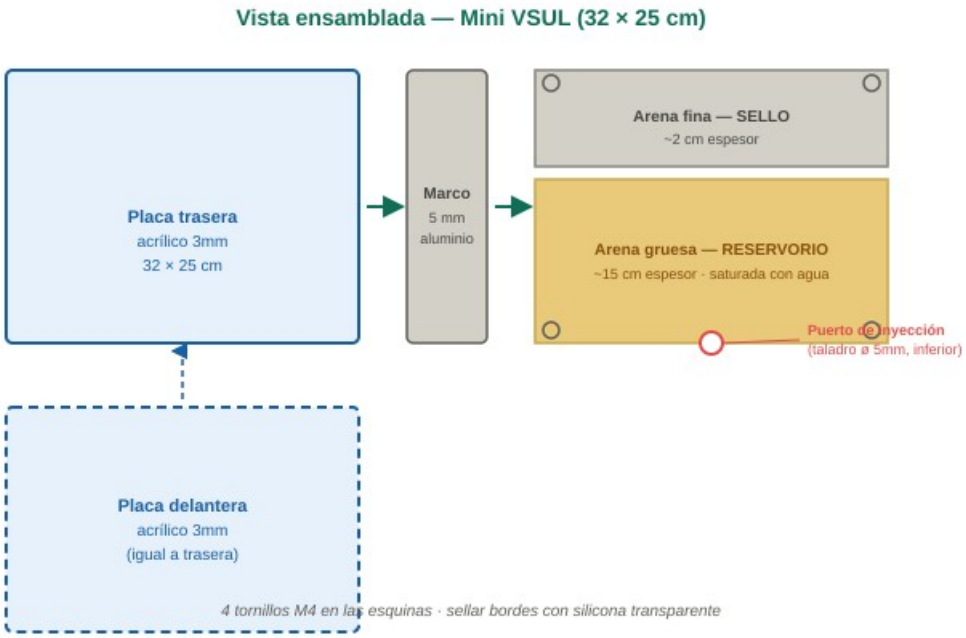


Figura 1. Vista ensamblada del Mini VSUL con sus componentes principales

3.1 Armado de la caja

1	**Cortar el acrilico a medida** *Dos placas de 32 x 25 cm de acrilico transparente de 3mm. Si es posible, pedir en la acrilerfa que hagan el taladro de 5mm en el borde inferior central (puerto de inyeccion).*
2	**Preparar el marco separador** *Cortar 4 tiras de aluminio o madera de 5mm de espesor: 2 de 32 cm (bordes laterales) y 2 de 23 cm (bordes superior e inferior). El marco define la cavidad interna del modelo.*
3	**Sellar el marco con silicona** *Aplicar silicona transparente en la cara interior del marco en los 3 lados a sellar (izquierdo, derecho, inferior). Dejar el lado superior abierto por ahora para poder rellenar con arena.*
4	**Unir placa trasera + marco** *Colocar la placa trasera sobre una superficie plana. Poner el marco con silicona sobre la placa, presionando bien. Dejar secar 2 horas antes de continuar.*
5	**Colocar el niple del puerto de inyeccion** *Insertar el niple o fitting de 5mm en el taladro del borde inferior. Sellar con silicona por ambos lados. Este es el unico acceso al interior del modelo.*

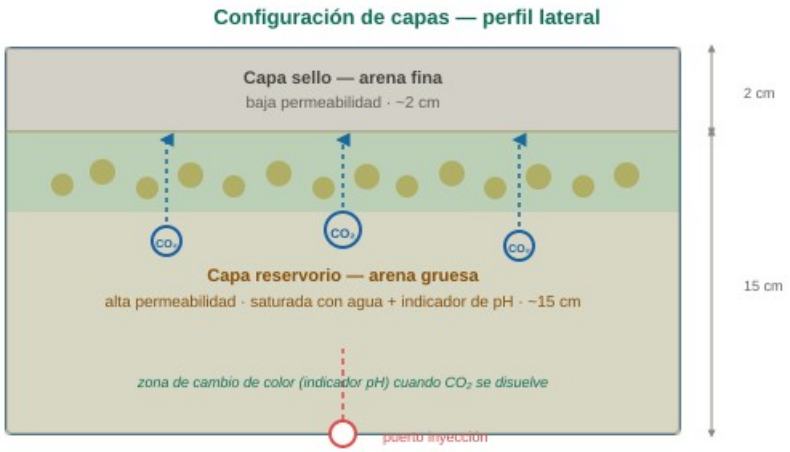


Figura 2. Perfil lateral mostrando la distribucion de capas dentro del modelo

3.2 Relleno con arena

1	**Lavar y secar la arena** *Enjuagar ambos tipos de arena con agua hasta que salga clara. Secar al sol o en horno a 100 C por 30 minutos. La arena limpia y seca permite un relleno uniforme sin grumos.*
2	**Rellenar la capa reservorio (arena gruesa)** *Con la caja en posicion vertical, verter arena gruesa hasta llenar aproximadamente los 3/4 inferiores (unos 15-18 cm). Golpear suavemente los costados para compactar de manera uniforme.*
3	**Rellenar la capa sello (arena fina)** *Agregar arena fina encima de la gruesa hasta llenar los 2 cm superiores. Esta capa simula la roca sello impermeable. La interfaz entre capas debe quedar bien definida y horizontal.*
4	**Cerrar con la placa delantera** *Aplicar silicona en el borde superior del marco. Colocar la placa delantera y sujetar con los tornillos M4. Apretar de forma uniforme y cruzada para evitar deformacion. Dejar secar 4 horas.*

> *Nota: Es importante que la interfaz entre arena gruesa y fina sea lo mas plana posible. Una interfaz irregular dificulta la visualizacion de la migracion del CO_2.*

3.3 Saturacion con agua + indicador de pH

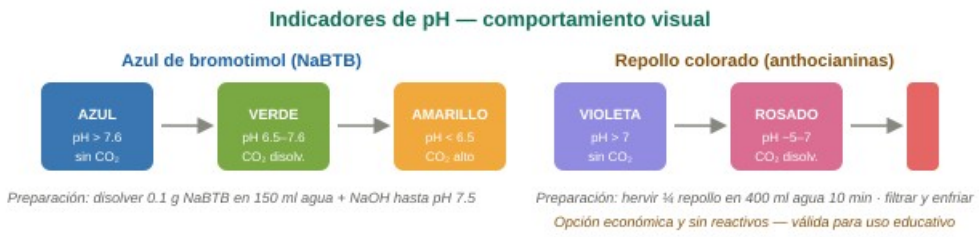


Figura 3. Comportamiento del indicador de pH ante el CO_2

1	**Preparar el indicador de pH** *OPCION A (NaBTB): Disolver 0.1 g de azul de bromotimol sal sodica en 150 ml de agua*

	destilada. Ajustar pH a 7.5 agregando gotas de NaOH diluido hasta que el liquido se vea azul claro. OPCION B (Repollo): Hervir 1/4 de repollo colorado en 400 ml de agua por 10 minutos. Filtrar y enfriar. El liquido debe ser violeta intenso.
2	**Saturar el modelo** *Conectar una jeringa llena con el liquido indicador al puerto de inyeccion. Inyectar lentamente hasta que el liquido suba y ocupe todos los poros visibles. Esto puede tomar 5-10 minutos. El frente de saturacion debe avanzar de forma uniforme.*
3	**Verificar saturacion completa** *El modelo esta saturado cuando no quedan zonas opacas o secas visibles a traves de las placas. Si quedan burbujas de aire atrapadas, inclinar el modelo levemente y esperar que suban.*

> *Consejo: Para el NaBTB: si el liquido queda verde, el pH es demasiado acido (agregar mas NaOH). Si queda azul oscuro, esta bien. Con repollo, el color violeta intenso indica pH correcto.*

4. Configuracion de falla (version avanzada)

La falla se simula mediante un tabique vertical de material de diferente permeabilidad que atraviesa las capas horizontales. Segun el material del tabique, la falla puede ser sellada (bloquea el CO_2) o abierta (lo deja pasar).

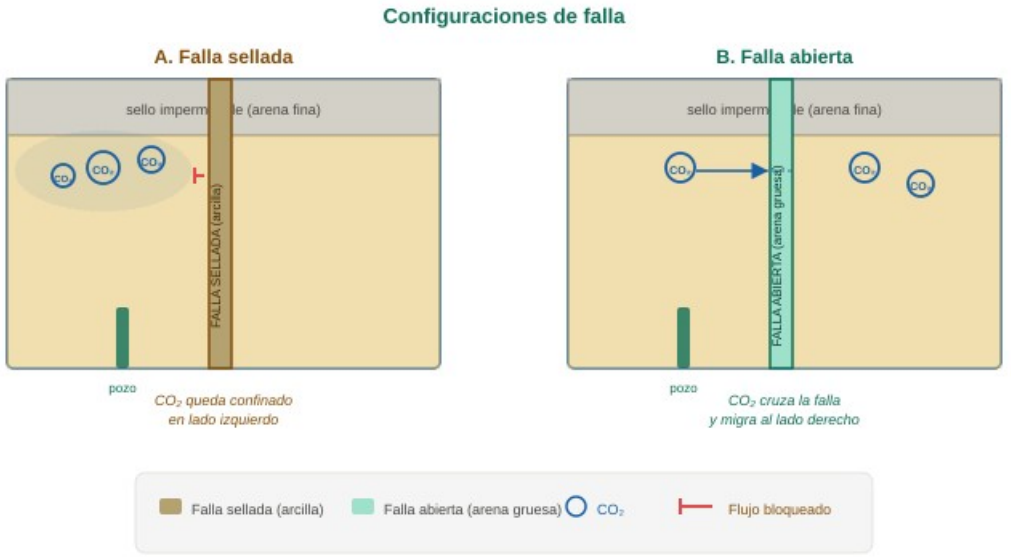


Figura 4. Comparacion entre falla sellada y falla abierta — vista de perfil

4.1 Falla sellada (arcilla o bentonita)

1	**Preparar la lamina guia** *Cortar una lamina delgada de acrilico o carton plastificado de exactamente 32 x 25 cm. Esta lamina se usara para sostener el material de falla en su posicion correcta.*
2	**Posicionar la lamina guia** *Antes de llenar la caja con arena, insertar la lamina guia verticalmente en la posicion deseada (sugerido: a 2/3 del ancho del modelo, inclinada 70-80 grados para simular una falla normal).*
3	**Rellenar a ambos lados** *Verter arena gruesa a ambos lados de la lamina guia. Compactar suavemente. Respetar el espacio ocupado por la lamina.*
4	**Rellenar el espacio de la falla con arcilla** *Mezclar arcilla o bentonita con agua hasta obtener una pasta densa. Rellenar el espacio angosto donde estaba la lamina guia con esta mezcla. El tabique debe tener el mismo ancho que la lamina (1-2 mm).*
5	**Retirar la lamina guia** *Con cuidado, deslizar la lamina guia hacia arriba y retirarla. El tabique de arcilla debe mantenerse en posicion. Si se deforma, usar una espatula fina para corregirlo.*
6	**Dejar fraguar 24 horas** *Antes de agregar el sello de arena fina y saturar, dejar que la arcilla se endurezca levemente para que mantenga la forma. Luego continuar con el procedimiento estandar.*

> *Nota: La arcilla debe estar bien mezclada sin grumos. Una arcilla demasiado liquida no mantendra la forma; demasiado seca se agrietara al secar y permitira fugas no deseadas.*

4.2 Falla abierta (arena gruesa)

El procedimiento es identico al de la falla sellada, pero el material del tabique es arena gruesa (igual o mayor granulometria que el reservorio). Al ser permeable, el CO_2 podra cruzar la falla libremente.

> *Consejo: Para comparar el efecto, preparar dos modelos identicos: uno con falla sellada y otro con falla abierta. Inyectar el mismo volumen de CO_2 en ambos y observar la diferencia en la distribucion de la pluma.*

4.3 Variacion: falla inclinada

Para mayor realismo geologico, inclinar la lamina guia entre 60-80 grados respecto de la horizontal antes de rellenar. Una falla vertical divide el espacio simetricamente; una falla inclinada genera patrones de migracion asimetricos que son mas representativos de fallas reales.

5. Procedimiento experimental

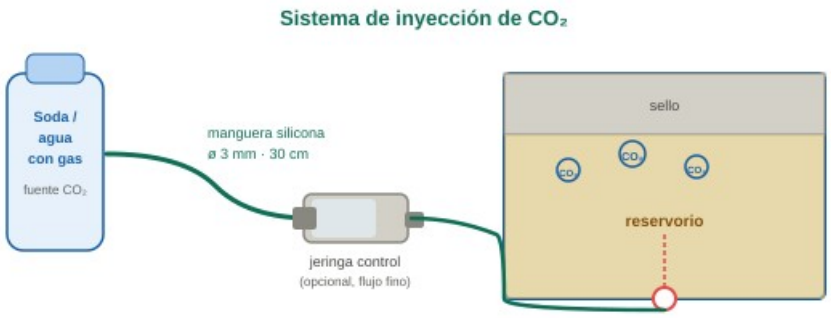


Figura 5. Esquema del sistema de inyeccion de CO_2

5.1 Preparacion del sistema de inyeccion

1	**Conectar la manguera al modelo** *Insertar un extremo de la manguera de silicona en el niple del puerto de inyeccion. Asegurar con una abrazadera o cinta de teflon para evitar fugas.*
2	**Conectar la fuente de CO_2** *Conectar el otro extremo de la manguera a la tapa perforada de la botella de soda. La botella debe estar cerrada y sin agitar.*
3	**Colocar la pinza de cierre** *Colocar la pinza Mohr sobre la manguera, cerca del modelo. Esto permite controlar cuando empieza y termina la inyeccion.*
4	**Verificar que el modelo este saturado** *Confirmar que no hay zonas secas visibles antes de comenzar. El indicador debe mostrar un color uniforme en toda la cavidad.*

5.2 Inyeccion y observacion

1	**Presurizar levemente la botella** *Agitar suavemente la botella de soda para aumentar la presion interna. El CO_2 comenzara a liberarse del liquido.*
2	**Abrir la pinza lentamente** *Abrir la pinza Mohr de a poco para permitir que el CO_2 entre al modelo. Un flujo demasiado rapido puede desestabilizar las capas de arena.*
3	**Observar la migracion** *Observar como las burbujas suben por los poros de la arena gruesa. El indicador de pH cambiara de color en las zonas donde el CO_2 se disuelve en el agua.*
4	**Documentar con fotos o video** *Fotografiar o filmar el frente de migracion cada 30 segundos. Marcar con un marcador en la placa la posicion del frente en diferentes momentos.*
5	**Cerrar la pinza al llegar al sello** *Cuando la pluma de CO_2 alcance la capa de arena fina (sello), cerrar la pinza y observar como el CO_2 se redistribuye lateralmente bajo el sello.*

6

Esperar 5-10 minutos y registrar

Esperar que el sistema se estabilice y registrar la distribucion final: que porcion quedo bajo el sello, cuanto se disolvio (cambio de color), cuanto quedo residual en los poros.

> *Consejo: Filmar con el celular desde el frente del modelo, con luz difusa por detras (no directamente). La retroiluminacion hace mucho mas visible el cambio de color del indicador.*

6. Resultados esperados e interpretacion

6.1 Version basica (reservorio + sello)

Observacion	Que significa	Concepto geologico
El CO_2 sube rapidamente por la arena gruesa	Alta permeabilidad del reservorio facilita el flujo vertical	*Permeabilidad y porosidad*
El sello de arena fina detiene la migracion	La baja permeabilidad impide el paso del gas	*Roca sello / caprock*
El CO_2 se expande lateralmente bajo el sello	El gas busca el punto mas alto disponible (boyancia)	*Trampa estructural*
Cambio de color en zona de contacto gas-agua	El CO_2 se disuelve y acidifica el agua (pH baja)	*Almacenamiento en disolucion*
Algunas burbujas quedan atrapadas en poros	Captura residual por tension superficial	*Almacenamiento residual*

6.2 Version con falla sellada

Observacion	Que significa	Concepto geologico
La pluma de CO_2 no cruza el tabique de arcilla	El tabique actua como barrera impermeable lateral	*Falla sellada / compartimentacion*
Mayor acumulacion en el lado del pozo	El CO_2 queda confinado en el compartimento de inyeccion	*Presion de poros elevada*
Cambio de color mas intenso en lado del pozo	Mayor disolucion local por mayor concentracion de CO_2	*Mezcla convectiva*

6.3 Version con falla abierta

Observacion	Que significa	Concepto geologico
La pluma cruza la falla y migra al lado opuesto	El tabique permeable no interfiere con el flujo del gas	*Falla como corredor de flujo*
El CO_2 se acumula bajo el sello en ambos lados	Tras cruzar la falla, el gas vuelve a ser controlado por el sello	*Trampa estratigrafica secundaria*
Distribucion mas amplia del cambio de color	Mayor contacto gas-agua = mayor disolucion total	*Mayor eficiencia de almacenamiento*

7. Variaciones y extension del experimento

7.1 Distintos tipos de arena

Repetir la inyeccion en modelos con diferentes materiales de reservorio para comparar la velocidad de migracion y la distribucion final del CO_2:

- Arena gruesa: alta porosidad y permeabilidad, flujo rapido, poca retencion residual
- Arena fina: menor permeabilidad, flujo lento, mayor disolucion
- Mezcla arena + arcilla: simula reservorio heterogeneo, genera canales preferentes
- Grava fina: maxima permeabilidad, flujo muy rapido, minima disolucion

7.2 Reservorio inclinado (anticlinal)

Inclinar el modelo unos 15-20 grados antes de saturar y durante la inyeccion. El CO_2, por boyancia, migrara hacia el punto mas alto del modelo, simulando la acumulacion en una trampa anticlinal, la configuracion mas comun en yacimientos reales.

7.3 Multicapa

Construir un modelo con 3 capas alternadas: arena gruesa / arena fina / arena gruesa. Las capas de arena fina intermedias actuaran como sello parciales, redistribuyendo la pluma de CO_2 en cada nivel y aumentando el contacto gas-agua.

7.4 Tabla de registro sugerida

Tiempo (min)	Posicion del frente (cm)	Color del indicador	Observaciones

8. Glosario

Porosidad	Fraccion del volumen de roca ocupada por espacios vacios (poros). Se expresa en %. Una roca con 20% de porosidad puede almacenar 20% de su volumen en fluidos.
Permeabilidad	Facilidad con la que un fluido se mueve a través de una roca. Se mide en miliDarcys (mD). La arena gruesa tiene alta permeabilidad; la arcilla, muy baja.
Caprock / Roca sello	Capa de roca impermeable (arcilla, lutita, anhidrita) que impide la migracion del CO_2 hacia la superficie. Es el componente critico de un sitio de almacenamiento seguro.
Trampa estructural	Geometria de las capas rocosas (anticlinal, falla) que concentra el CO_2 en un punto por efecto de la boyancia. El gas, mas liviano que el agua, sube y queda confinado.
Boyancia	Fuerza ascendente sobre el CO_2 debido a que es menos denso que el agua de formacion. Es el principal motor de migracion del gas en el subsuelo.
Almacenamiento en disolucion	Mecanismo por el cual el CO_2 se disuelve en el agua de formacion, formando acido carbonico. El cambio de color del indicador de pH visualiza este proceso.
Almacenamiento residual	Atrapamiento de pequenas burbujas de CO_2 en los poros de la roca por efectos de tension superficial. El gas queda inmovil incluso sin sello estructural.
CAC / CCUS	Captura, Utilizacion y Almacenamiento de CO_2. Conjunto de tecnologias para capturar CO_2 de fuentes industriales e inyectarlo en formaciones geologicas profundas (> 800 m).
NaBTB	Azul de bromotimol sal sodica. Indicador de pH que cambia de azul (pH > 7.6) a verde (pH neutro) a amarillo (pH < 6.5) al acidificarse con CO_2 disuelto.

9. Referencias y creditos

Este experimento esta basado en el Mini VSUL desarrollado por el grupo SUETRI-A de la Universidad de Stanford (Stanford Underground Earth Thermal Resource Initiative - Affiliates):

- Sitio oficial: vsul.stanford.edu
- Grupo de investigacion: suetri-a.github.io
- Stanford Center for Carbon Storage: sccs.stanford.edu

Desarrollo del VSUL apoyado por ExxonMobil a traves del Stanford Strategic Energy Alliance. Actividades de divulgacion organizadas a traves del Stanford Young Investigators Program.

> *Nota: Esta guia es de uso educativo libre. Para usos comerciales o publicaciones academicas, citar el trabajo original del grupo SUETRI-A de Stanford.*