



# El mar como sumidero de CO<sub>2</sub>

Celina González Fernández

Dpto. Ingeniería Energética y Fluidomecánica

ETSII-UPM

El papel del carbón en el sector energético español. ¿Carbón sin CO<sub>2</sub>?

5 de noviembre de 2008



## El mar como sumidero de CO<sub>2</sub>

- Situación actual: Grandes números
  
- Una alternativa: Confinamiento oceánico
  
- Opciones
  - Inyección directa
  - Fertilización del océano
  - Otras
  
- Conclusiones

## Situación actual: Grandes números (1)

- Atmósfera
    - 2,85 Tt CO<sub>2</sub> <> 375 ppmv <> 545 ppm
    - Emisiones antropogénicas = 29 Gt CO<sub>2</sub> / año
    - El océano absorbe 8 Gt /año de forma natural
  - Océanos
    - 70% superficie terrestre, 1,4 10<sup>9</sup> km<sup>3</sup> ; 1,4 10<sup>19</sup> t H<sub>2</sub>O
    - 144 Tt de CO<sub>2</sub> <> 102,55 ppm <> 2331 micro mol CO<sub>2</sub> /kg H<sub>2</sub>O
- Los Océanos son un sumidero potencial de CO<sub>2</sub>**



## Situación actual: Grandes números (2)

- Intercambio Aire-Agua de mar
  - El  $\text{CO}_2$  (débilmente ácido) se disuelve en el mar → Ácido Carbónico e iones bicarbonato y carbonato → DIC (Dissolved Inorganic Carbon)
  - DOC → (Dissolved Organic Carbon)
  - Se establece un equilibrio de naturaleza físico-química entre la superficie del mar y el aire.
  - 80% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  acabarán en el fondo del mar como DIC → Procesos de transporte oceánico
  - **Propuesta: Intervenir en el proceso natural**

# Intercambio CO<sub>2</sub> Aire-Océano

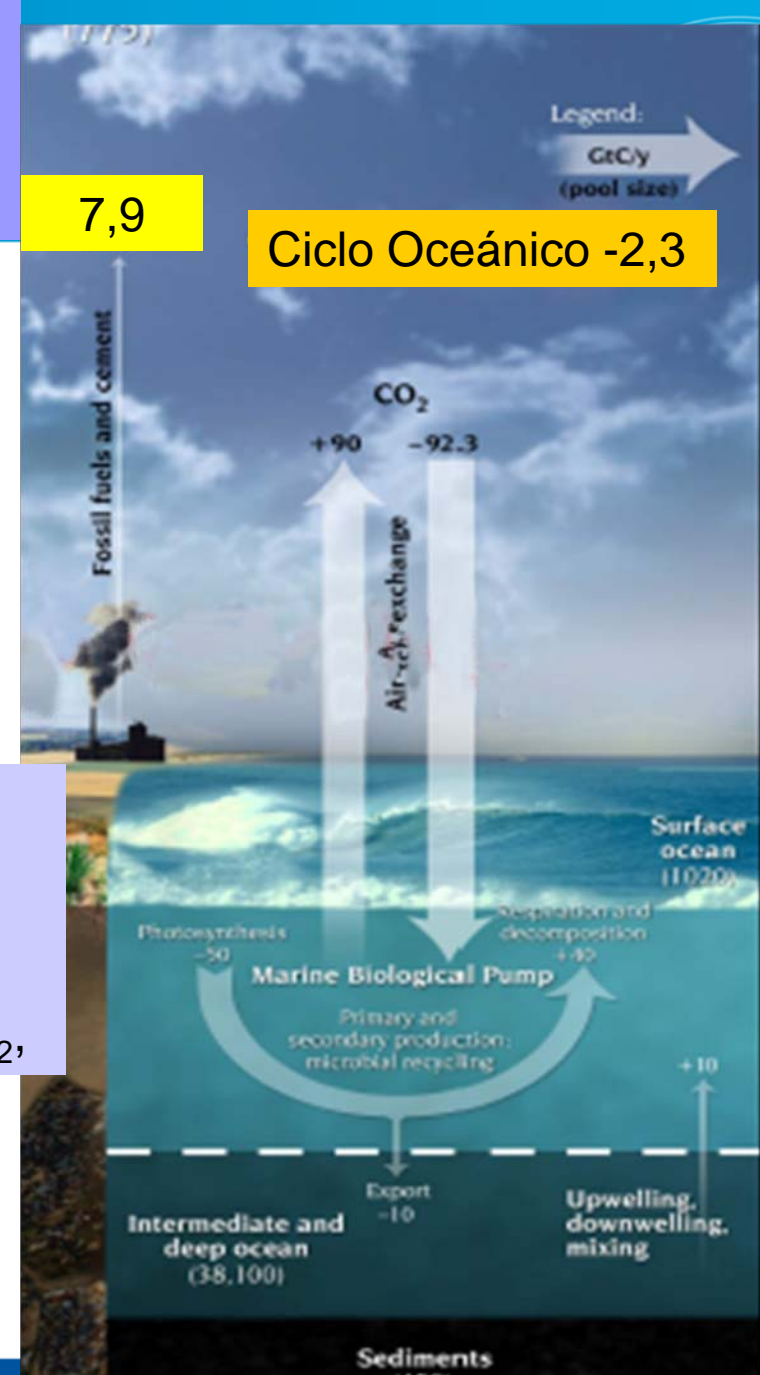
PM CO<sub>2</sub> = 44  
PM C = 12      t C = 3,67 t CO<sub>2</sub>

- 7,9 Gt C → 29 Gt CO<sub>2</sub> Actividades hombre
- 2,3 Gt C → 8 Gt CO<sub>2</sub> Aire → Océano

• Superficie Océano 1020 Gt C

• Capa media y profunda 38 100 Gt C

• Total 39120 Gt C → 143 570 Gt CO<sub>2</sub> → 143,57 Tt CO<sub>2</sub>,





## Opciones de confinamiento marino del CO<sub>2</sub>

- Marchetti (1977)
- Japón Programa Nacional
- Noruega, Estados Unidos + Australia, Canada y Suiza
- Estudios teóricos o experimentos escala de laboratorio
  - A 800 m, 25% del CO<sub>2</sub> , 500 años
  - A 1500 m, 50% del CO<sub>2</sub> , 500 años
  - A 3000 m 80% del CO<sub>2</sub> , 500 años

Almacenamiento  
Oceánico

Fertilización Oceánica

Inyección Directa

Opciones  
de profundidad media

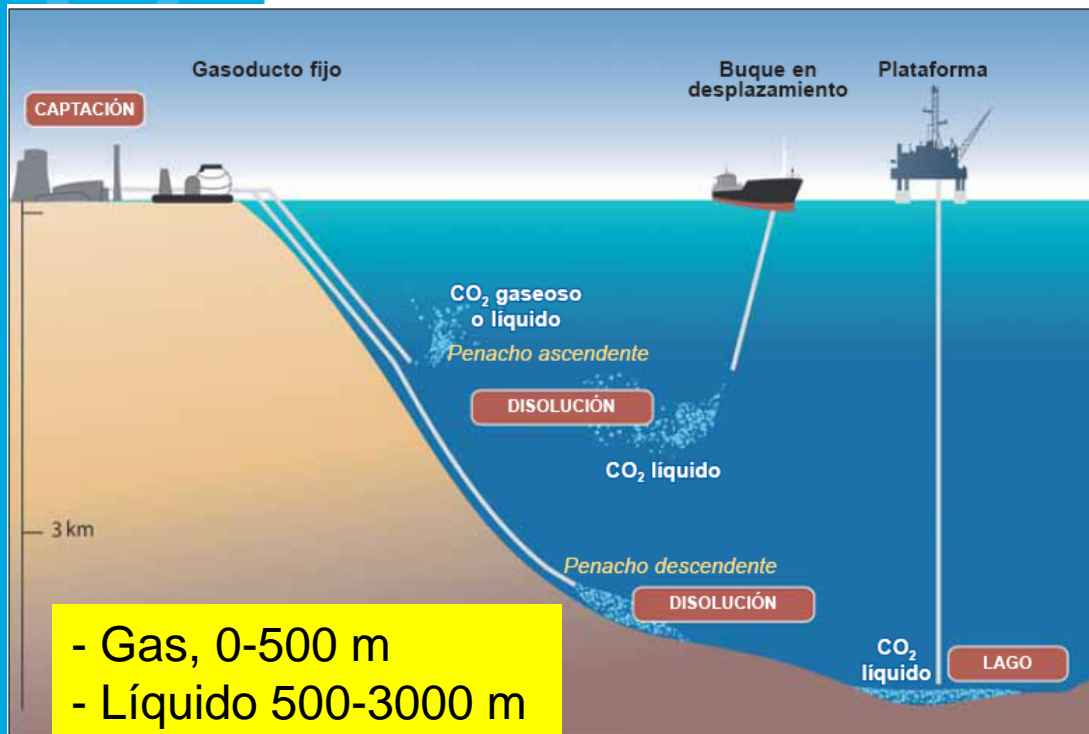
Opciones  
de fondo marino o lago

Otras  
Opciones



## Visión de las opciones de inyección directa de CO<sub>2</sub>

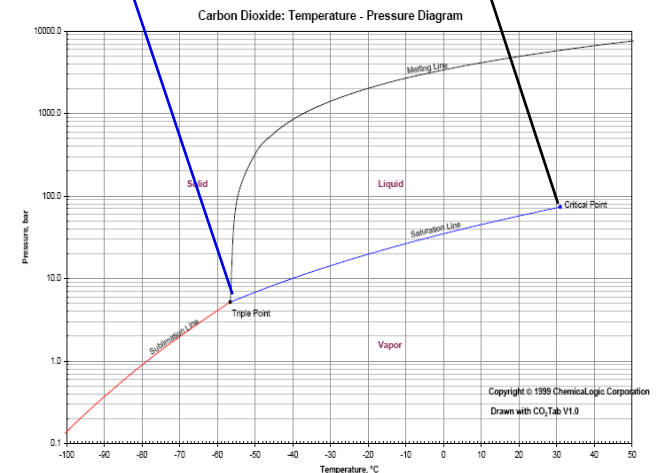
Condicionado por la situación de la fuente productora de CO<sub>2</sub> cerca de la costa.



- Gas, 0-500 m
- Líquido 500-3000 m
- Hidratos > 500m

Punto Triple: 5,11 bar, 216,8 K

Punto Crítico:  
72,8 bar  
304,2 K



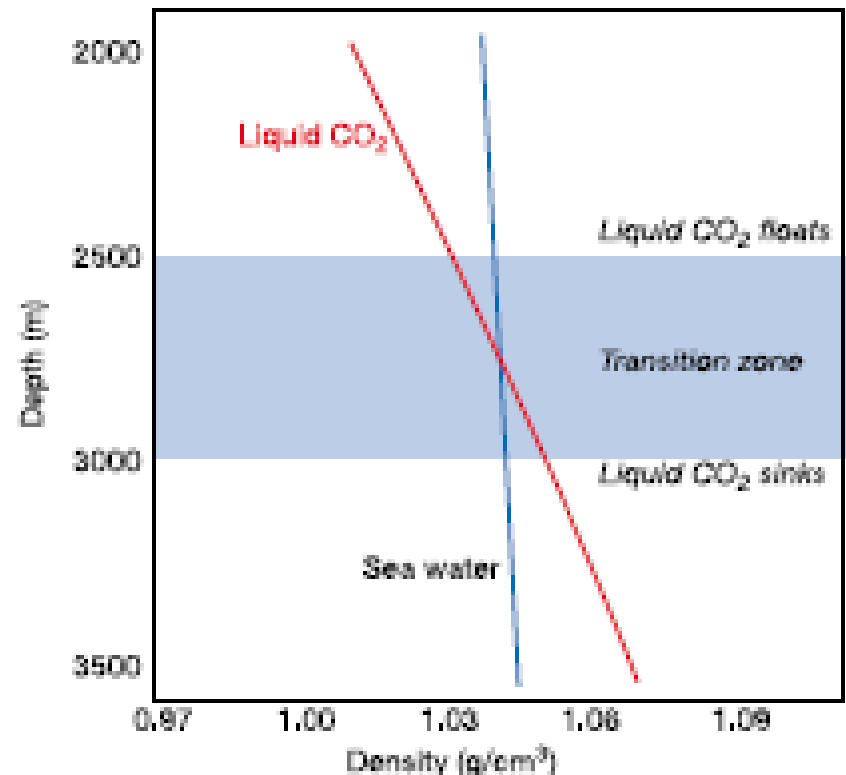


## Temas para considerar en el estudio riguroso del confinamiento oceánico del $\text{CO}_2$

- Propiedades del  $\text{CO}_2$ 
  - Densidad
  - Solubilidad
  - Formación de Hidratos
- Impacto ambiental → Variación del pH marino

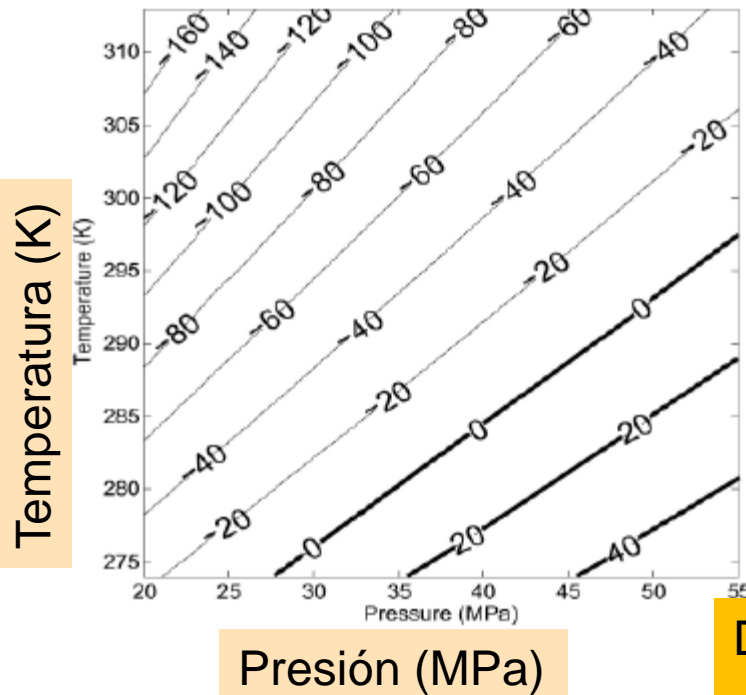
Al seleccionar la profundidad donde se libera el CO<sub>2</sub> se selecciona la presión y temperatura del H<sub>2</sub>O y por lo tanto la presión hasta la que hay que comprimir

- ✓ 0-500 m CO<sub>2</sub> gas
- ✓ 500-2700 m CO<sub>2</sub> líquido que flota
- ✓ >3000 m CO<sub>2</sub> líquido que se hunde
- ✓ La zona entre 2500 y 3000 m el comportamiento del CO<sub>2</sub> variará según la localización. Podría quedar estable sin elevarse ni hundirse.





# Densidad del CO<sub>2</sub>



Diferencias entre densidad de CO<sub>2</sub> y la del H<sub>2</sub>O

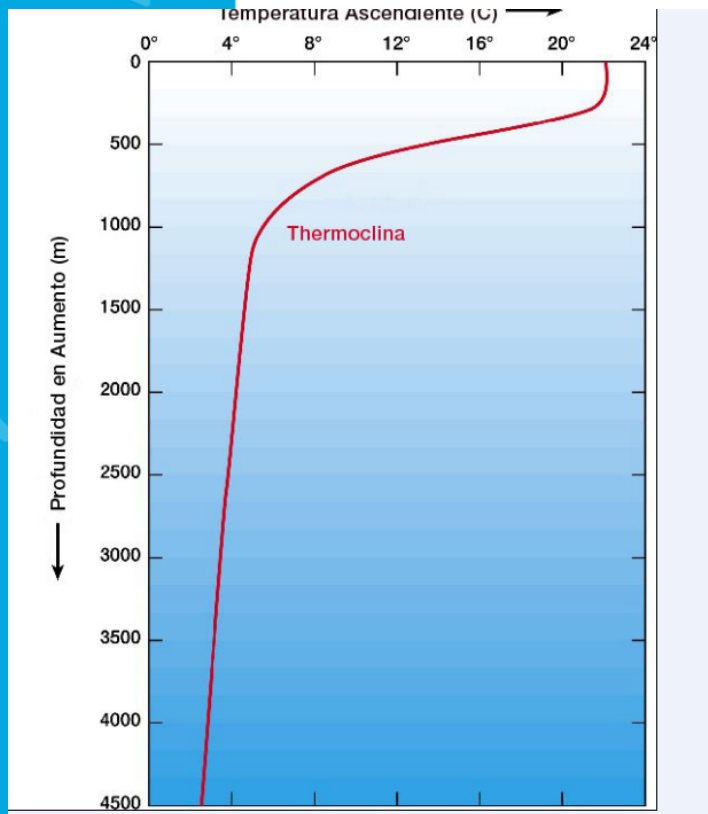
✓ Líneas gruesas el CO<sub>2</sub> se hunde

✓ Líneas finas el CO<sub>2</sub> flota

Densidad del H<sub>2</sub>O = 1027 kg/m<sup>3</sup>



## Función de la temperatura, presión, salinidad..



- Capa de mezcla 0-100 m
  - Intercambio CO<sub>2</sub>
  - Temperatura dependiente de la latitud y de la estación
  - Importancia de la presión en la solubilidad
  - Modelos
- Termoclina 100 – 1000 m
  - Variaciones importantes de temperatura
  - Modelos
- Capa profunda
  - Variación suave de la temperatura
  - Modelos de solubilidad y transferencia de masa constante

Perfil temperatura (°C), profundidad (m) latitud media

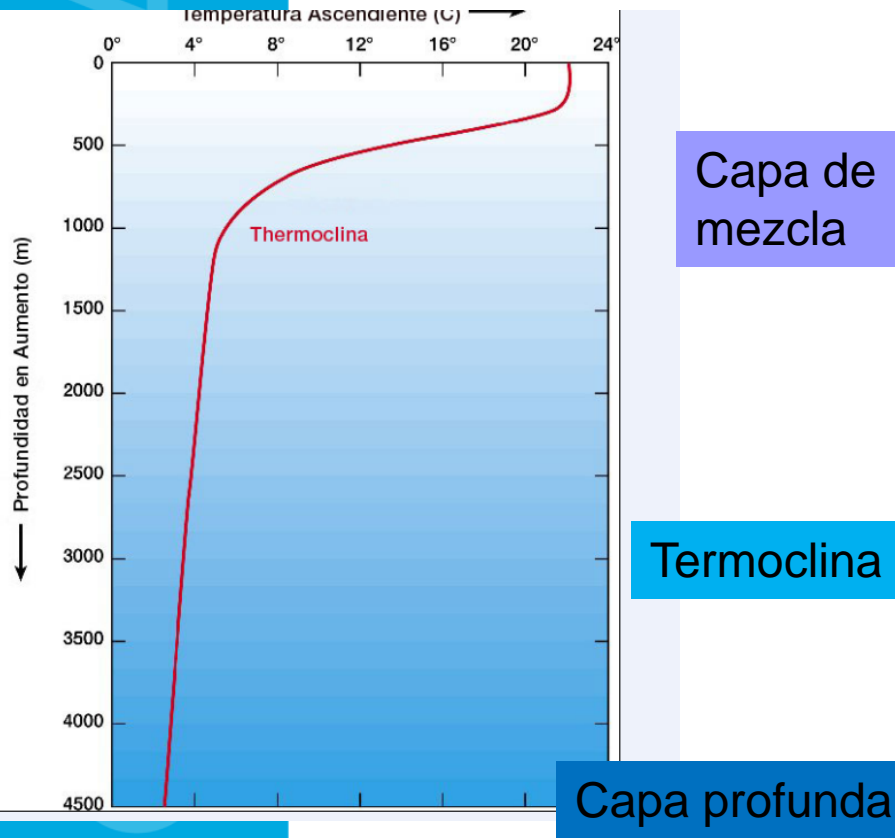


Table 1. CO<sub>2</sub> Solubility in the Ocean

| y [m]      | T [°C]      | C <sub>s</sub> [kmol/m <sup>3</sup> ] | State of discharged CO <sub>2</sub> |
|------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 0          | 20.0        | 0.033                                 | gas bubbles                         |
| 100        | 20.0        | 0.349                                 | gas bubbles                         |
| 200        | 19.5        | 0.663                                 | gas bubbles                         |
| 300        | 18.5        | 0.965                                 | gas bubbles                         |
| 400        | 13.5        | 1.412                                 | gas bubbles                         |
| <b>450</b> | <b>11.5</b> | <b>1.621</b>                          | <b>phase change depth</b>           |
| 500†       | 9.0         | 1.759                                 | liquid droplets                     |
| 600        | 7.6         | 1.785                                 | liquid droplets                     |
| 700        | 6.6         | 1.848                                 | liquid droplets                     |
| 800        | 6.0         | 1.886                                 | liquid droplets                     |
| 900        | 5.5         | 1.920                                 | liquid droplets                     |
| 1000       | 5.3         | 1.954                                 | liquid droplets                     |
| 1100       | 5.0         | 1.961                                 | liquid droplets                     |
| 1200       | 4.8         | 1.968                                 | liquid droplets                     |
| 1300       | 4.7         | 1.975                                 | liquid droplets                     |
| 1400       | 4.5         | 1.983                                 | liquid droplets                     |
| 1500       | 4.4         | 1.990                                 | liquid droplets                     |

† hydrate formation anticipated at depths  $\geq 500$  m (i.e., when  $p > 44$  atm and  $t < 10.2^\circ\text{C}$ )

# Formación de hidratos = Clatratos de CO<sub>2</sub>

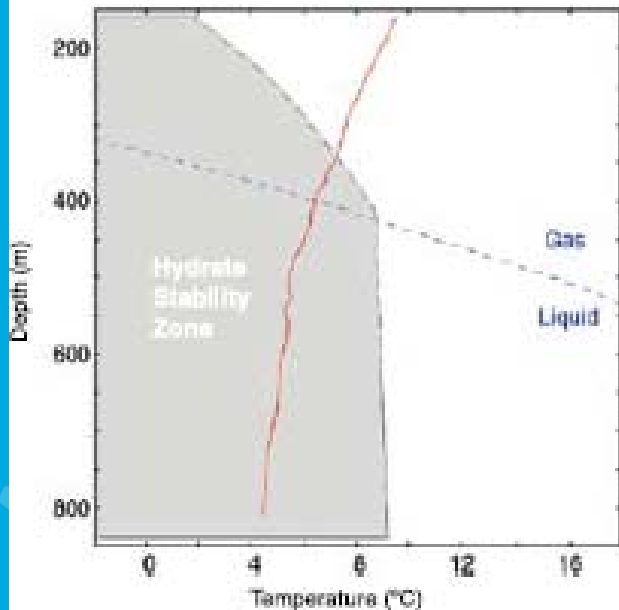
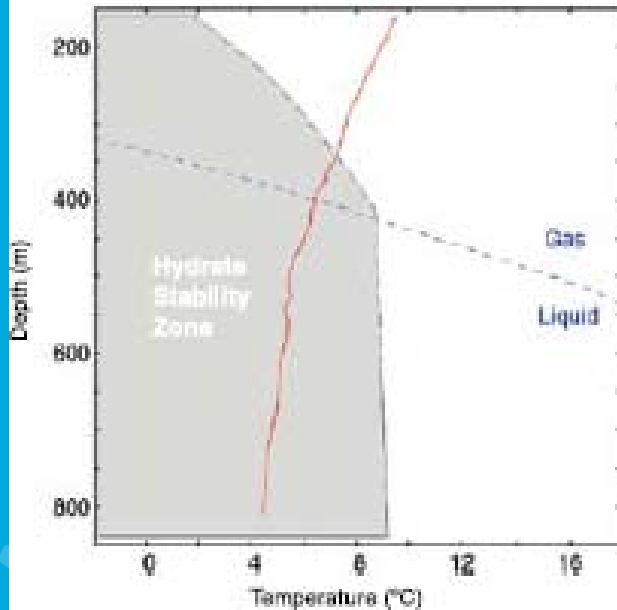


Diagrama de fases del CO<sub>2</sub> en agua marina

Línea roja: variación de la temperatura del agua con la profundidad

- La fisicoquímica del CO<sub>2</sub> en el agua marina es compleja
- Se forman a temperaturas bajas y presiones altas
- Estructura de aspecto similar al hielo. Existe para otros gases como metano o anhídrido sulfúrico
- Constituido por una molécula de CO<sub>2</sub> rodeado por una malla de moléculas de H<sub>2</sub>O, {CO<sub>2</sub> n H<sub>2</sub>O}
- La formación de hidratos influye en la tasa de difusión y transferencia de masa.
- La descripción matemática del confinamiento del CO<sub>2</sub> pasa por el estudio de la cinética de esta capa

# Formación de hidratos = Clatratos de CO<sub>2</sub>



- Efectos de la formación de hidratos
- Si se forman hidratos entre 500 y 2700 m la gota de CO<sub>2</sub> ascendente vería dificultada su disolución final
- Si se forman hidratos a profundidades superiores a 2700 m aumentará el confinamiento del CO<sub>2</sub> ya que favorece el transporte hasta mayores profundidades antes de disolverse.
- En el transporte por tuberías habría problemas a presiones superiores a 50 bar y temperaturas inferiores a 10 °C.



# Impacto Ambiental : Variación del pH

- CO<sub>2</sub> gas débilmente ácido. Océano suavemente alcalino
- El intercambio del CO<sub>2</sub> aire-agua está condicionado por el equilibrio químico del CO<sub>2</sub> y el ácido carbónico en el agua



- Efecto neto → Disminución del pH y de la concentración del ion carbonato → Acidificación del agua



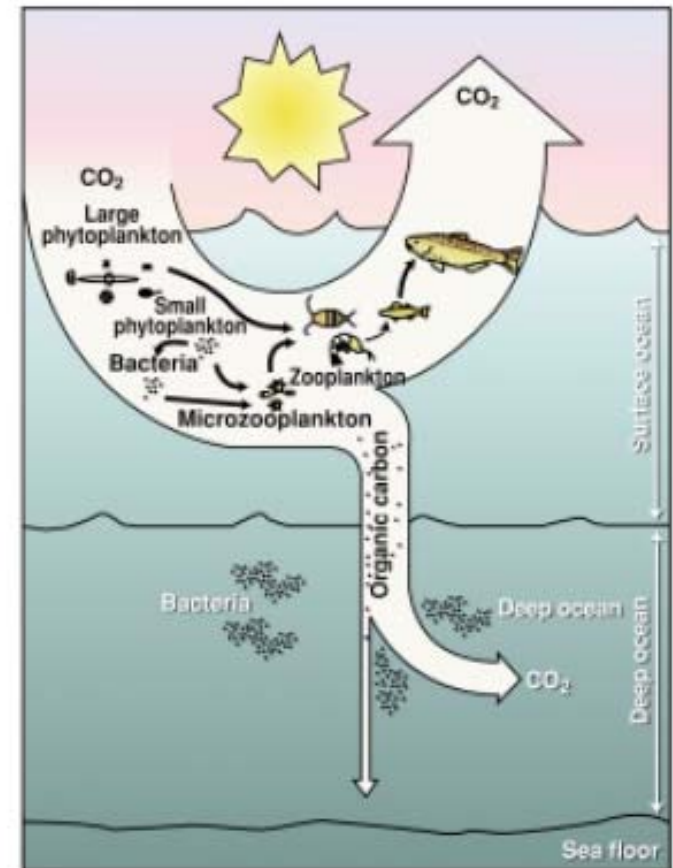
# Impacto Ambiental : Variación del pH

- Variación del pH desde la época preindustrial → acidificación de 0,1
- Para una concentración de 550 ppmv de estabilización se presume, con inyección, una disminución en el pH de 0,4 frente a una del 0,2 sin almacenamiento inducido
- Impacto en el Ecosistema Oceánico.
  - Efectos fisiológicos afectarían a generaciones
  - No hay un estudio riguroso
  - Especies más afectadas las del fondo del mar

**Objetivo:** Incrementar el flujo neto de  $\text{CO}_2$  del aire al océano

**Como :** Aumentando el flujo de C desde la superficie al fondo

- La fotosíntesis asociada al fitoplancton marino necesita  $\text{CO}_2$  para transformar nutrientes en materia orgánica vegetal
- La biomasa marina contiene carbono orgánico (DOC) que permanece en equilibrio con el DIC
- De la biomasa generada
  - El 50% → Consumida por organismos
  - 20-30% desciende y se disuelve o mineraliza → DIC
  - El resto se deposita en el fondo



- La absorción natural del  $\text{CO}_2$  atmosférico aumenta si aumenta el fitoplancton
- Necesita nutrientes: Carbono, nitrógeno, fósforo y hierro (relación de Redfiel)
- El Fe es limitante (Océano Pacífico).
- **Propuesta:** Fertilización artificial del océano con Fe
- Bombeo a 10 m de profundidad (hepta hidrido de sulfuro ferroso y agua salada)
- Experimentos 2005 → 1kg Fe genera 100 000 kg de fitoplancton
- Estudiar: Impacto ambiental
- Límite 3,67 Gt de  $\text{CO}_2$ /año



## Comparación de los dos métodos

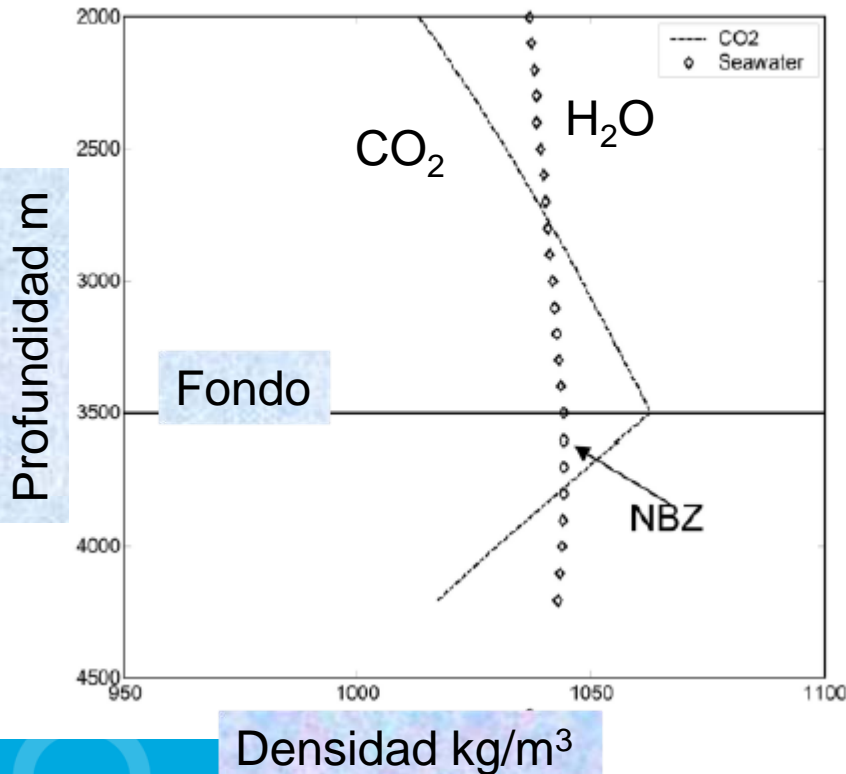
| Método            | Pros   | Contras  |
|-------------------|--|--|
| Inyección Directa | <ul style="list-style-type: none"><li>•-Efectividad →Cientos años</li><li>•-Tecnologías conocidas</li><li>•-Desarrollo estrategias para incrementar la efectividad y disminuir impacto ambiental</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>•-Elevado consumo energía</li><li>•-Condicionado por la proximidad al mar de la fuente de CO<sub>2</sub></li><li>•-Posibles consecuencias ambientales</li></ul>                                |
| Fertilización     | <ul style="list-style-type: none"><li>•-Barato</li><li>•-Tecnológicamente muy simple</li><li>•-Podría mejorar la pesca</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>•-Efectividad no probada</li><li>•-Posibles perturbaciones en los ecosistemas</li><li>•-Limitado por transporte biológico y tasas de mezcla oceánica (3,67 Gt de CO<sub>2</sub>/año)</li></ul> |

- **Inyección de hidratos.**
  - Son sólidos
  - Se hace una mezcla con un líquido
  
- **Inyección de emulsiones:  $H_2O-CaCO_3-CO_2$** 
  - Pueden tener hasta un 40% mas de densidad que el  $H_2O$
  - $pH > pH$  del  $CO_2$
  
- **Inyección de los gases producidos en una planta**
  - Elevados costes



- Propuesta por Koybe en 1997
- Inyección de  $\text{CO}_2$  a decenas de metros debajo de la capa de sedimentos del fondo del mar.
- No se produce mezcla con el  $\text{H}_2\text{O}$
- Profundidad  $> 3000$  m el  $\text{CO}_2$  es mas denso que el agua que ocupa los poros de los sedimentos → **Cubierta de flotabilidad** (estabilidad gravitacional), similar al concepto del confinamiento geológico. No hay fugas aunque haya fracturas
- Zona de inyección dada por House en 2006

# Confinamiento bajo sedimentos marinos



- Hay que considerar el gradiente térmico  $0,02 \text{ }^\circ\text{C/m}$  y  $0,04 \text{ }^\circ\text{C/m}$  → expansiones y contracciones del CO<sub>2</sub>
- El CO<sub>2</sub> iguala su densidad con el H<sub>2</sub>O a 200 m por debajo del fondo del mar
- NBZ = Zona de flotabilidad negativa
- Tener en cuenta la formación de hidratos. Mayor energía; obstruyen los poros de los sedimentos.

- Considerar la opción de confinamiento marino de CO<sub>2</sub>
- Investigación
  - Ingeniería (inyección, efectividad,...)
  - Modelos Físicoquímicos
  - Modelos de circulación oceánica
  - Impacto ecosistemas marinos
- Informar a la Sociedad para que tome decisiones.
- Recomendaciones del Department of Energy (DOE) y del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)