

Visualización de Fluidos

Dr. Luis Gerardo de la Fraga

E-mail: fraga@cs.cinvestav.mx
Departamento de Computación
Cinvestav Zacatenco

28 de marzo, 2012

Contenido

1. Contexto de la *visualización de fluidos*
2. Técnicas de visualización
3. Simulación de fluidos
4. Visualización de la superficie del fluido
5. Conclusiones

Mis áreas de investigación

- ▶ Visión por computadora
- ▶ Aplicaciones de algoritmos evolutivos
- ▶ Modelos deformables
- ▶ Seguridad en redes de computadoras

Las tres áreas principales ^a

^aFoley, van Dam, Feiner, Hughes, Computer Graphics: principles and practice, 2000, Addison Wesley.

1. **Graficación:** Trata la síntesis de escenas con objetos reales o imaginarios a partir de sus modelos computacionales.
2. **Procesamiento de Imagen:**
 - 2.1 Realzado de imagen
 - 2.2 Detección y reconocimiento de patrones
 - 2.3 Análisis de escenas
 - 2.4 **Visión por computadora:** Reconstrucción de un modelo 3D de una escena a partir de varias imágenes 2D.

Desde los años 90 del siglo pasado, visión es un área es sí misma debido al número de publicaciones y revistas en el área.

Áreas relacionadas

1. Procesamiento de imágenes
2. Graficación
 - 2.1 Realidad virtual
 - 2.2 Geometría computacional
 - 2.3 Interfaces hápticas
 - 2.4 Interfaces hombre-máquina
 - 2.5 Modelos deformables
 - 2.6 Visualización de fluidos
3. Visión
 - 3.1 Geometría proyectiva
 - 3.2 Realidad aumentada (usa las tres áreas)
 - 3.3 Análisis numérico
 - 3.4 Procesamiento paralelo (GPUs)

Para representar fenómenos de la naturaleza

1. Formación de estrellas en galaxias [1]
2. Formación planetaria y estelar
3. Movimiento de arena [2]
4. Fenómenos atmosféricos
(tornados, inundaciones)

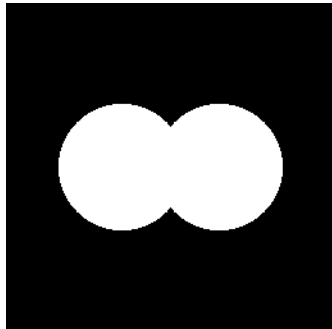
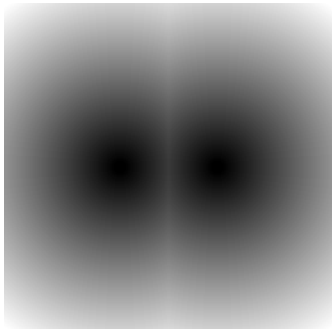
Para realizar aplicaciones como:

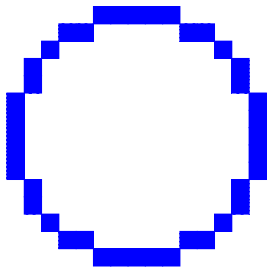
1. Simuladores para entrenamiento [3]
(simular fuego, humo, agua)
2. Cambios de fase en objetos deformables [4]

Estado del arte

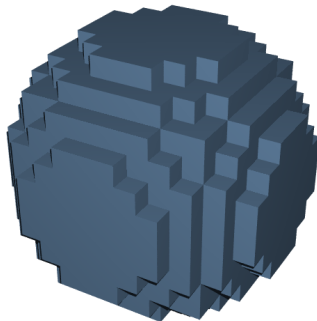
Los algoritmos de visualización de fluidos usados en trabajos revisados:

Encajamiento de cubos	★★★★★★★★★9
Trazo de rayos, superficies implícitas	★★★★★5
Trazo de rayos, polígonos	★★★3
Esferas poligonales	★★★3
Aplanados	★★2
Objetos sin forma	★★2
Conjuntos de nivel	★★2
Conjuntos de nivel con partículas	★1
Encajamiento de mosaicos	★1
Encajamiento de rebanadas	★1
Sprites	★1
Sema-implícito de partículas móviles	★1
Volumétrico	★1





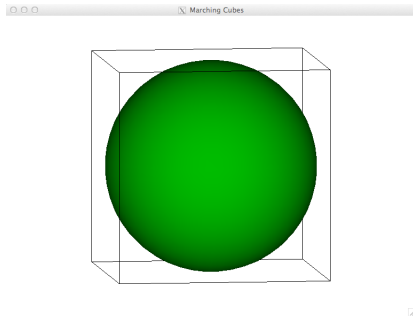
Pixels en 2D



Voxels en 3D

Encajamiento de cubo (1/2)

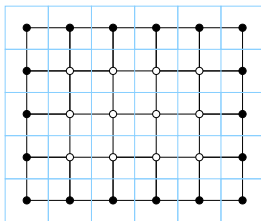
Este es un algoritmo de graficación [5] para extraer una malla poligonal de una isosuperficie de un campo escalar tridimensional.



Encajamiento de cuadros (1/2)

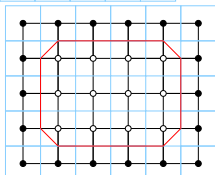
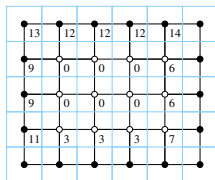
1	1	1	1	1	1
1	2	3	3	2	1
1	3	3	3	3	1
1	2	3	3	2	1
1	1	1	1	1	1

0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0



www.wikipedia.org

Encajamiento de cuadros (2/2)



Caso 0



Caso 1



Caso 2



Caso 3



Caso 4



Caso 5



Caso 6



Caso 7



Caso 8



Caso 9



Caso 10



Caso 11



Caso 12



Caso 13

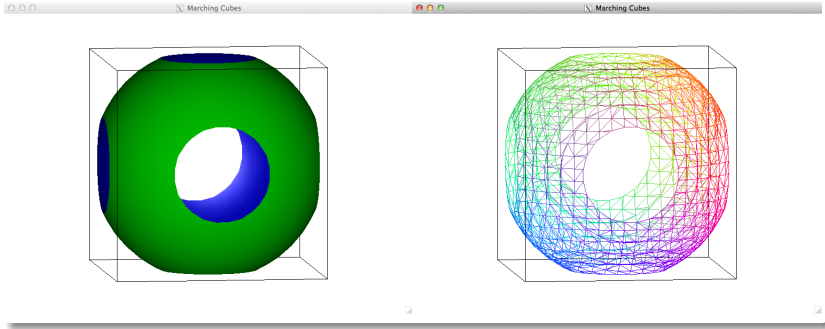


Caso 14



Caso 15

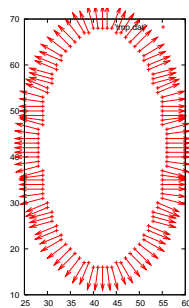
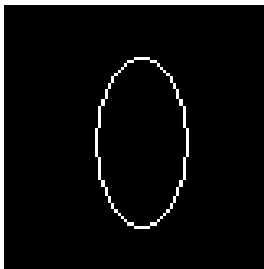
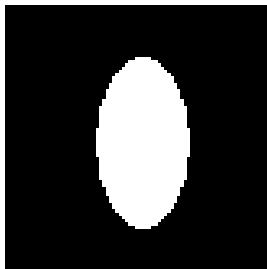
Encajamiento de cubo (2/2)



Aplanados (splatting) [6]

En esta técnica de visualización se linealiza por trozos la superficie del objeto a visualizar, por cada punto en la superficie se dibuja un *aplanado* orientado de acuerdo a la normal a la superficie.

Aplanados en 2D

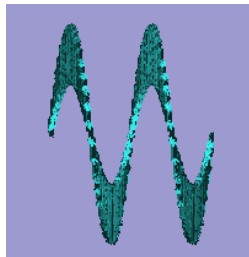
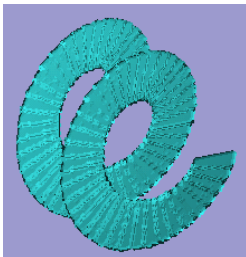
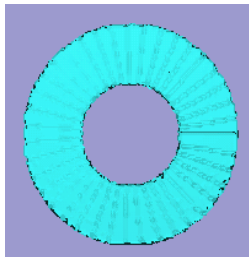


Aplanados en 3D (1/2)

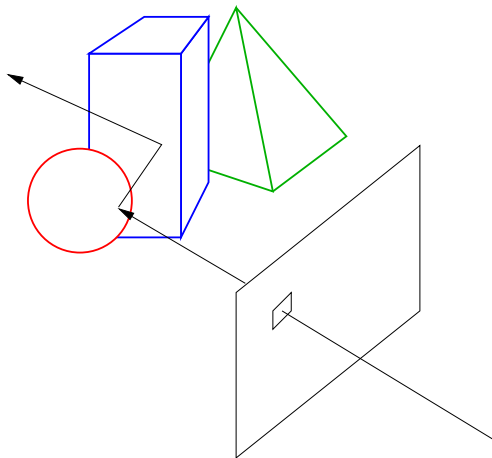
Se puede usar cualquier figura plana: círculos, triángulos, cuadrados, etc.



Aplanados en 3D (2/2)



Trazo de rayos (1/2)



Trazo de rayos (2/2)

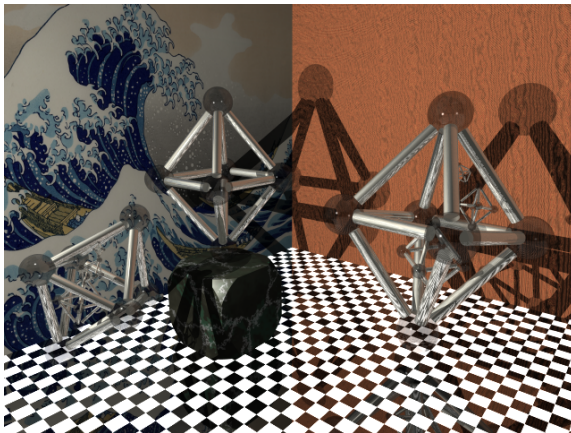
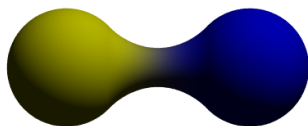


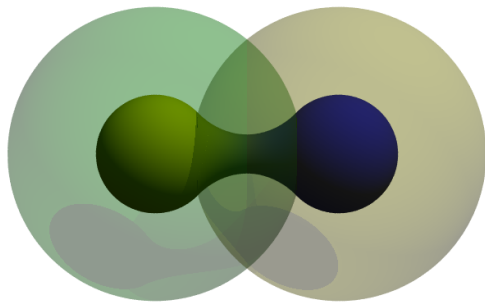
Imagen realizada por Carlos Daniel Venegas Tamayo en el curso de Graficación 2011 usando povray (www.povray.org)

Objetos sin forma (blobs)

- ▶ Son ideales para modelar átomos y moléculas.
- ▶ Matemáticamente son isosuperficies de campos escalares



Objetos sin forma



Fluido

Definición de la Real Academia Española de la Lengua:

*(es un adjetivo que se usa también como sustantivo)
Dícese de cualquier cuerpo cuyas moléculas tienen entre sí poca o ninguna coherencia, y toma siempre la forma del recipiente o vaso que lo contiene; como los líquidos y los gases.*

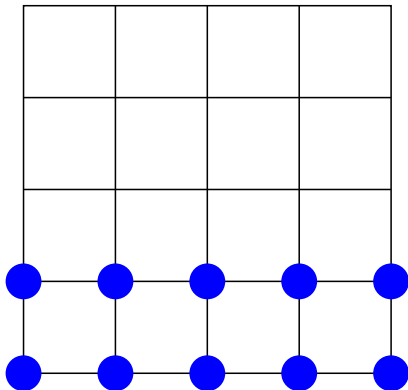
Simulación de fluidos

Existen dos enfoques:

1. Euleriano (usa una rejilla)
2. Lagrangiano (con partículas)

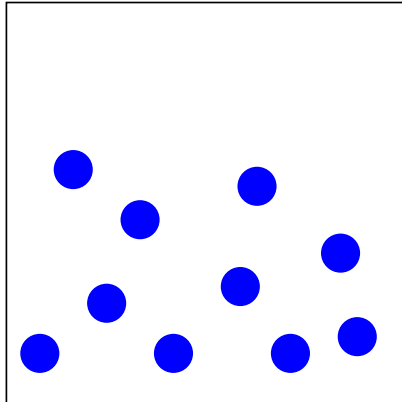
Euleriano

El espacio de trabajo es fijo



Lagrangiano

El espacio de trabajo es arbitrario



Hidrodinámica Suavizada con Partículas [7, 8]

- ▶ HSP es un método de interpolación que funciona a partir de un número finito de partículas.
- ▶ Utiliza una ventana de interpolación

Interpolación

Una cantidad $A : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ se interpola en la posición \mathbf{r} como:

$$A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h)$$

Propiedades de la ventana W

- ▶ Es par: $W(r, h) = W(-r, h)$
- ▶ Está normalizada: $\int W(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1$
- ▶ Gradiente: $\nabla A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h)$
- ▶ Laplaciano: $\nabla^2 A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h)$

Ecuaciones de Navier-Stokes (1/2)

- ▶ Rigen el comportamiento de los fluidos
- ▶ Todos los simuladores las utilizan
- ▶ Estas son ecuaciones diferenciales que se basan en
 - ▶ La conservación de la masa
 - ▶ La conservación del momento lineal
 - ▶ La conservación del momento angular
 - ▶ La conservación de la energía

La ecuación de conservación del movimiento:

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$

donde ρ es la densidad del fluido, p es la presión, \mathbf{v} es la velocidad, \mathbf{g} es la aceleración gravitacional y μ es un factor de viscosidad.

La ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \nabla \mathbf{v} = 0$$

La conservación de la energía

$$\rho = k p$$

donde k depende de la temperatura.

- ▶ En HSP la masa se conserva de forma automática, debido a que se usa un número finito de partículas con la misma masa.
- ▶ Debido a que las partículas se mueven junto con el fluido, el término convectivo $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ es cero.

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_v$$

Viscosidad

Usamos en las simulaciones la viscosidad de Muller [5]

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_v &= \mu \nabla^2 \mathbf{v} \\ &= \mu \sum_j m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \nabla^2 W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h)\end{aligned}$$

Ventanas de Muller [5]

$$W_{\text{poli6}}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} C_{\text{poli6}}(h^2 - |\mathbf{r}|^2)^3, & \text{si } 0 \leq |r| < h \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$W_{\text{spiky}}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} C_{\text{spiky}}(h - |\mathbf{r}|)^3, & \text{si } 0 \leq |r| < h \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$W_{\text{vis}}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} C_{\text{vis}} \left(-\frac{|\mathbf{r}|^3}{2h^3} + \frac{|\mathbf{r}|^2}{h^2} + \frac{h}{2|\mathbf{r}|} - 1 \right), & \text{si } 0 \leq |r| < h \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Espacio	C_{poli6}	C_{spiky}	C_{vis}
2D	$\frac{4}{\pi h^8}$	$\frac{10}{\pi h^5}$	$\frac{10}{3\pi h^2}$
3D	$\frac{315}{64\pi h^9}$	$\frac{15}{\pi h^6}$	$\frac{15}{2\pi h^3}$

Método *salto de rana*

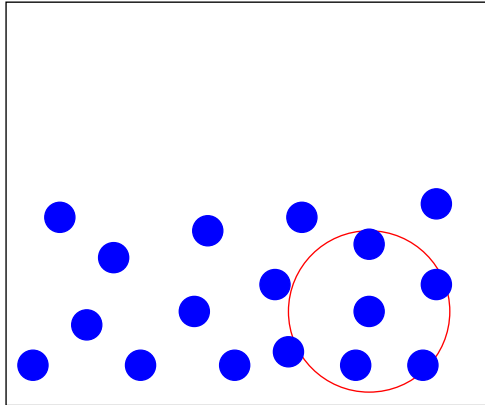
Dada una ecuación diferencial de la forma

$$m \frac{d^2 \mathbf{p}}{dt^2} = \mathbf{f} \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt}, \mathbf{p}, t \right)$$

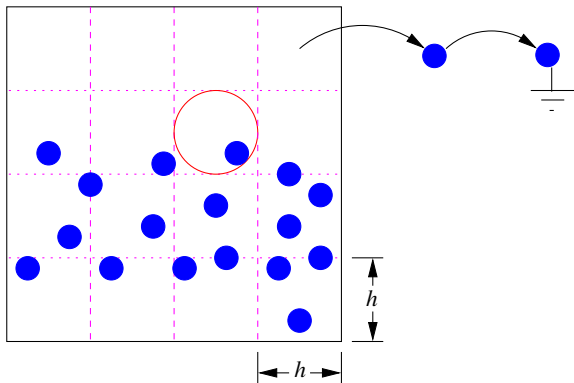
Se integra de la forma

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{i+1} &= \mathbf{p}_i + \mathbf{v}_{i+1/2} \delta t \\ \mathbf{v}_{i+1/2} &= \mathbf{v}_{i-1/2} + \mathbf{a}_i \delta t \end{aligned}$$

con las condiciones iniciales \mathbf{p}_0 y $\mathbf{v}_{-1/2}$.

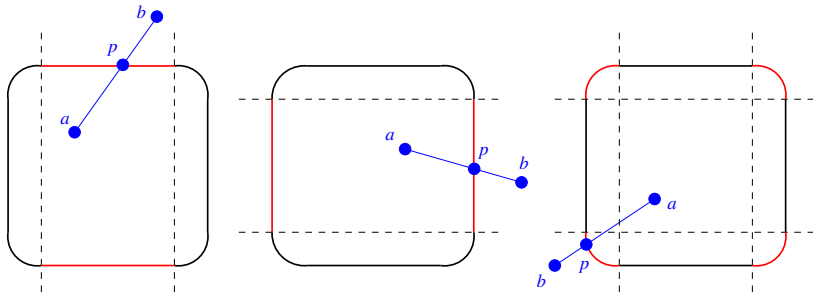


Búsqueda eficiente de los vecinos

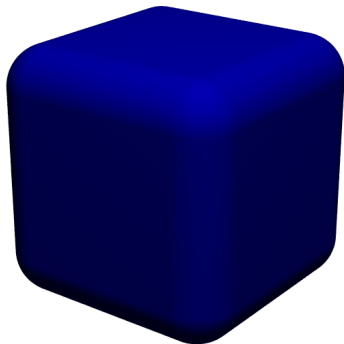


El espacio de trabajo se dividió en celdas de tamaño $h \times h$ y cada celda mantiene una lista de las partículas dentro de ella.

Diseño del contenedor en 2D

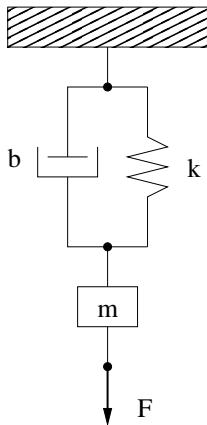


Contenedor en 3D



Colisión de las partículas con el contenedor

Suponemos que las superficies son elásticas y se comporta como un sistema masa–resorte–amortiguador (MRA)

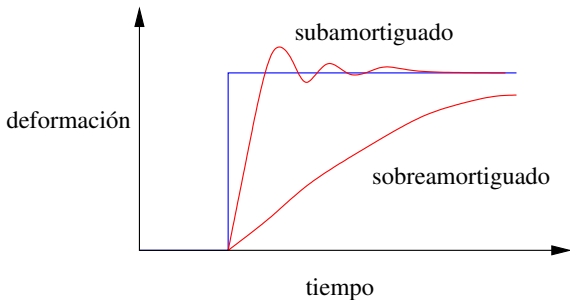


El sistema MRA se modela como:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$$

La solución de la ecuación diferencial $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$ es bien conocida y presenta tres casos:

Si $b^2 - 4mk$ es $\begin{cases} > 0, & \text{sobreamortiguada,} \\ = 0, & \text{críticamente amortiguada,} \\ > 0, & \text{subamortiguada.} \end{cases}$



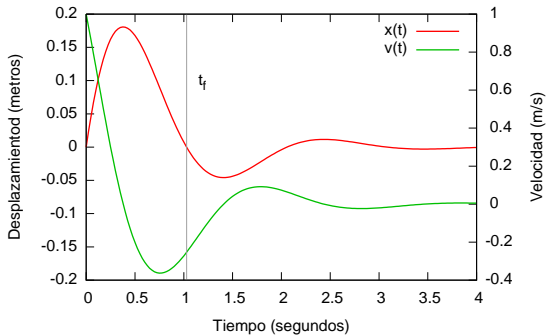
La solución subamortiguada para $\ddot{x} + 2\lambda\dot{x} + \omega^2x = 0$, tiene la respuesta más rápida y es, para $x(0) = 0$ y $\dot{x}(0) > 0$:

$$x(t) = \frac{\dot{x}(0)}{\sqrt{\omega^2 - \lambda^2}} e^{-\lambda t} \operatorname{sen} \left(t\sqrt{\omega^2 - \lambda^2} \right)$$

$$\dot{x}(t) = \frac{\dot{x}(0)}{\sqrt{\omega^2 - \lambda^2}} e^{-\lambda t} \left[\sqrt{\omega^2 - \lambda^2} \cos \left(t\sqrt{\omega^2 - \lambda^2} \right) - \lambda \operatorname{sen} \left(t\sqrt{\omega^2 - \lambda^2} \right) \right]$$

- ▶ La colisión termina en el tiempo $t_f = \frac{\pi}{\sqrt{\omega^2 - \lambda^2}}$
- ▶ La velocidad final será $\dot{x}(t_f) = -\dot{x}(0) \exp \frac{-\pi\lambda}{\sqrt{\omega^2 - \lambda^2}}$

Modelo de la colisión



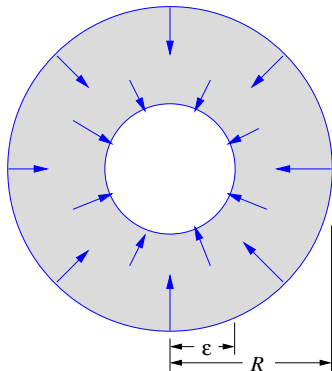
Bola del fluido

Campo de fuerza central

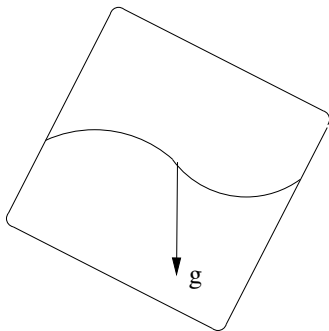
$$f_c : \mathbb{R}^n \leftarrow \mathbb{R}^n$$

$$f_c(\mathbf{p}) = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 < \|\mathbf{r}\| \leq \epsilon \\ F \frac{\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}\|}, & \text{si } \epsilon < \|\mathbf{r}\| \leq R \\ 0, & \text{si } R < \|\mathbf{r}\| \end{cases}$$

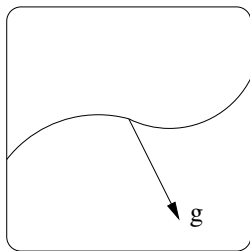
donde $\mathbf{r} = \mathbf{p}_{\text{centro}} - \mathbf{p}$.



Animación de la fuerza de gravedad



En vez de girar la caja



Gira la gravedad

Simulaciones

- ▶ Simulación en 2D con 300 partículas
- ▶ Simulación en 3D con 500 partículas
- ▶ Simulación en 2D con 300 y 200 celdas
- ▶ Visualización en 3D con trazo de rayo

1. Se expusieron las técnicas de visualización más usadas para visualizar fluidos: trazo de rayo, objetos sin forma y aplanados.
2. Se presentó como se simula un fluido utilizando el método de hidrodinámica suavizada con partículas.
3. Se mostraron dos ejemplos, en 2D y 3D, de un fluido dentro de una caja redondeada.

1. Entender que significado físico tienen los resultados de la simulación
2. Ejecución en GPUs
3. Diseño de un sensor para cantidades vectoriales
4. Modelar el cambio de fase
5. Representar objetos deformables como fluidos

¡Gracias!



J.J. Monaghan.

Simulating free surface flows with SPH.

Journal of Computational Physics, 110(2):399–406, 1994.



Y. Zhu and R. Bridson.

Animating sand as a fluid.

ACM Trans. Graph., 24(3):965–972, 2005.



M. Müller, S. Schirm, and M. Teschner.

Interactive blood simulation for virtual surgery based on smoothed particle hydrodynamics.

Technology and health care, 12:25–31, April 2004.



R. Keiser, B. Adams, D. Gasser, P. Bazzi, P. Dutré, and M. Gross.

An unified lagrangian approach to solid-fluid animation.

In *Symposium on Point-Based Graphics*, pages 124–148, 2005.



M. Müller, D. Charypar, and M. Gross.

Particle-based fluid simulation for interactive applications.

In *Symposium on Computer Animation*, pages 154–159, 2003.



Ma. del Rosario Martínez Gómez.

Sistema de visualización para un tomógrafo de rayos X.

Master's thesis, Cinvestav, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2006.



Andrés Cortés Dávalos.

Visualización de fluidos generados por el método hsp.

Master's thesis, Cinvestav, Departamento de Computación, 2011.



Fernando García Arreguín.

Objeto deformable inmerso en un fluido.

Master's thesis, Cinvestav, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007.

Ofrecemos la **maestría** y **doctorado** en
Ciencias de la Computación.

- ▶ Página del Departamento: <http://www.cs.cinvestav.mx>
- ▶ Página personal: <http://cs.cinvestav.mx/~fraga>
- ▶ Correo-e: fraga@cs.cinvestav.mx