



C I D T C A

Centro de Investigación y Desarrollo
Tecnológico en Ciencias Aplicadas

SOFTWARE

FlowMove

Autores

Diego Valencia-Enríquez¹
Javier Revelo-Fuelagán²

¹Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Ciencias Aplicadas (CIDTCA)

²Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Nariño, Pasto,
Colombia)

Listado de Contenidos

1 Enlace de descarga	2
2 Introducción	2
2.1 Sobre el Método SPH	3
2.2 Modelos Reológicos	3
2.2.1 Modelo de Herschel-Bulkley	4
2.2.2 Formulación tensorial - SPH del modelo de Herschel-Bulkley	5
2.3 Implementación de la consistencia $K(z)$ dependiente de la altura en la formulación SPH	7
3 Requisitos del Sistema	9
3.1 Requisitos del Sistema	9
4 Estructura del Código	10
4.1 Descripción General	10
4.2 Estructura de Directorios y Archivos	10
4.2.1 Directorios Principales	10
4.2.2 Archivos Clave	10
4.3 Flujo de Trabajo	11
4.4 Configuración y Ejecución	11
5 Flujo de trabajo: configuración, instalación y ejecución	12
5.1 Configuración e Instalación en Linux	12
5.1.1 Generación de Condiciones Iniciales	12
5.1.2 Configuración de Parámetros	12
5.1.3 Compilación y Ejecución	12
5.2 Salida de la Simulación	13
6 Ejemplos	14
6.1 Ejemplo 1 (ej1)	14
6.2 Ejemplo 2 (ej2)	19
6.3 Ejemplo 3 (ej3)	24
6.4 Ejemplo 4 (ej4)	28
6.5 Ejemplo 5 (ej5)	32
6.6 Ejemplo 6 (ej6)	36
6.7 Ejemplo 7 (ej7)	40
6.8 Ejemplo 8 (ej8)	44
6.9 Ejemplo 9 (ej)	48
6.10 Ejemplo 10 (ej10)	52
7 Contacto y Soporte	56

1 Enlace de descarga

<https://github.com/diegovalencia82/massmove.git>

2 Introducción

Este manual describe el uso del código desarrollado para la simulación numérica de flujos de lodo utilizando el método de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH) y el modelo de Herschel-Bulkley.

Los movimientos de masa, como los flujos de lodos o lahares, constituyen algunos de los fenómenos naturales más catastróficos que captan la atención de ingenieros, investigadores y organismos gubernamentales. Estudios indican que estos movimientos afectan áreas con una planificación territorial deficiente y su principal desencadenante son las precipitaciones (Enríquez 2012).

Un ejemplo reciente tuvo lugar en el municipio de Rosas, Cauca, donde el aumento de las lluvias y la falla geológica conocida como falla Mosquerillo-La Tetilla del Sistema de Fallas de Romeral resultaron en un deslizamiento de tierra que destruyó al menos 150 viviendas, terrenos agrícolas, áreas boscosas, infraestructura de acueductos y eléctrica, además de dañar un tramo de 300 metros de la vía Panamericana. Esta catástrofe dejó incomunicada la región sur de Colombia y causó pérdidas económicas significativas (Carrillo et al. 2023).

Otro ejemplo relevante es el desastre natural en Mocoa, que ocurrió en marzo de 2017. Este evento, conocido como avenida torrencial, implica el aumento descontrolado de los niveles de agua en una cuenca o microcuenca. Los informes indican alrededor de 300 muertes, 400 heridos, 200 personas desaparecidas y alrededor de 1,000 personas afectadas (Santamaría et al. 2018).

Estos eventos de movimientos de masa también se presentan a nivel mundial. Por ejemplo, en Nicaragua en 1998, un lahar en el Volcán Casita resultó en unas 2,500 muertes y la devastación de las localidades de El Porvenir y Rolando Rodríguez (Scott et al. 2005). En 2005, debido a las lluvias asociadas al Huracán Stan, el Río Coatán en México se desbordó, generando un flujo de lodo que destruyó alrededor de 2,000 viviendas, afectó a 100,000 personas y causó daños en la red ferroviaria y cuatro puentes (Murcia & Macías 2009).

Por lo tanto, el estudio y modelado de la dinámica de flujos de lodos puede servir como base para la planificación de la gestión del riesgo por parte de las autoridades. Los modelos numéricos son capaces de simular fenómenos específicos y predecir el movimiento de masa de los flujos, estimar volúmenes de deslizamientos depositados en una corriente, espesores de flujo a distancias y tiempos determinados, así como proporcionar información sobre velocidades, presiones y otros parámetros físicos (Enríquez 2012). En esta línea, existen códigos comerciales y de acceso libre utilizados por el SGC, como RiverFlow2d®, FLO2D® y Titan2d.

Por otro lado, un flujo de lodos es un flujo esencialmente bifásico: la fase líquida está conformada por agua y la fase sólida son los depósitos de suelos de deslizamientos de

laderas o de erupciones volcánicas, la cual es difícil implementar en los anteriores códigos mencionados. Además, los Software anteriormente mencionados resuelven las ecuaciones mediante métodos de diferencias finitas estableciendo la correspondiente mallas en modelos en dos dimensiones lo que genera limitaciones en los resultados obtenidos. Por lo que en este estudio se propone implementar el método de SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics, por sus siglas en inglés), para modelar este tipo de fluidos multifase en tres dimensiones para tener una mejor aproximación de las características físicas del fluido y del área de cobertura del movimiento de masa.

2.1 Sobre el Método SPH

El método SPH (por sus siglas en inglés, *Smoothed Particle Hydrodynamics*) es un método Lagrangiano, fue desarrollado inicialmente para solucionar problemas de astrofísica (Goldreich & Monaghan 1977; Lucy 1977) y en los últimos años ha sido aplicado en problemas de dinámica de fluidos (Ye et al. 2019).

El método SPH discretiza el fluido como un conjunto de puntos o nodos llamados partículas, las ecuaciones de movimiento son resueltas usando el formalismo Lagrangiano, calculando el espacio de fase (velocidad, posición, densidad y presión) para cada partícula como la interpolación de los valores de las partículas vecinas más cercanas usando las ecuaciones diferenciales acopladas de la hidrodinámica. La interpolación se realiza estableciendo una función de suavizado, conocida como función núcleo o *kernel*, esta es usada para ejecutar la transición de un dominio continuo a uno discreto; el dominio de esta función es definido por la longitud de suavizado que indica la distancia de interacción entre las partículas.

2.2 Modelos Reológicos

Los modelos reológicos describen el comportamiento de los fluidos bajo esfuerzo de cizalla, fundamentales en el estudio de lodos y suelos.

La figura 1 muestra que en la parte Newtoniana, la relación tensión-velocidad es lineal, lo que refleja una viscosidad constante independiente de la tasa de deformación, por ejemplo agua o aceites. El modelo pseudoplástico (o shear-thinning) presenta una curva sublineal: a bajas velocidades su viscosidad aparente es grande, pero disminuye a medida que $\dot{\gamma}$ crece, facilitando el flujo bajo esfuerzo. Por el contrario, el modelo dilatante (shear-thickening) muestra un crecimiento supralineal de τ con la tasa de deformación, característico de materiales que se endurecen al acelerar el cizallamiento. Finalmente, la ley de Bingham incorpora un esfuerzo de cedencia inicial, visible como la ordenada al origen, seguido de un comportamiento lineal similar al Newtoniano, lo que captura la necesidad de superar un umbral de tensión antes de que el fluido comience a fluir. Estas diferencias son clave al seleccionar la formulación reológica más adecuada para simular desde aceites y aguas cargadas hasta suspensiones densas o lodos.

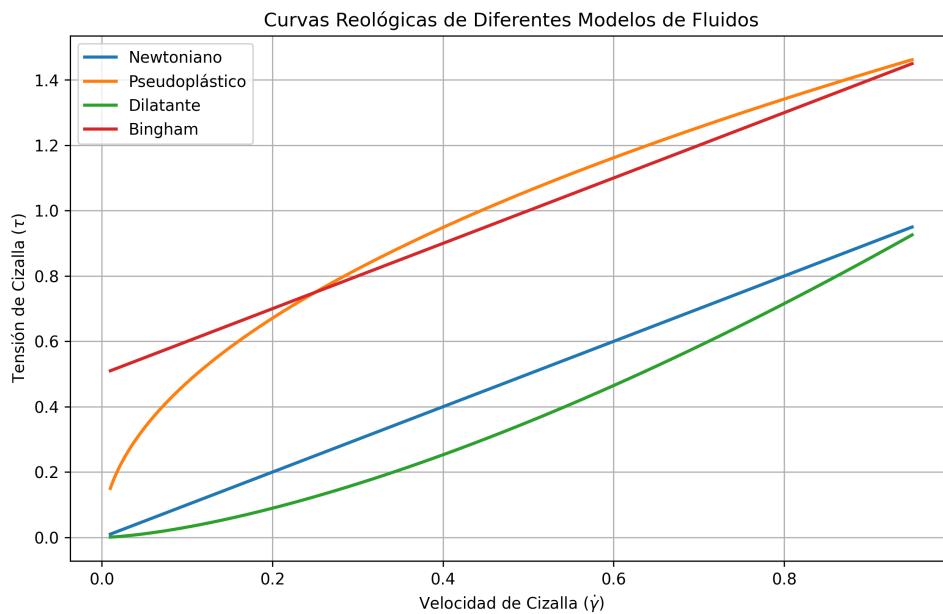


Figure 1: Curvas reológicas comparativas de cuatro modelos de fluidos: Newtoniano, pseudoplástico (shear-thinning), dilatante (shear-thickening) y Bingham (flujo con esfuerzo de cedencia), representando la tensión de cizalla τ frente a la velocidad de cizalla $\dot{\gamma}$

2.2.1 Modelo de Herschel-Bulkley

Este modelo extiende los modelos mencionados al permitir una relación no lineal o lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) al variar ciertos parámetros:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde τ_y es umbral de fluencia, K es coeficiente de consistencia, y n es el índice de comportamiento.

Para $n = 1$ es un fluido newtoniano, donde la viscosidad es constante e independiente de $\dot{\gamma}$, este es un tipo de fluido Bingham que fluye tras superar τ_0 , adecuado para materiales viscosos a altas tasas de corte. Para lodos con contenido variable de sólidos el modelo de Herschel-Bulkley es adecuado ya que generaliza el modelo Bingham, capturando comportamientos no lineales. Para $n > 1$ indica comportamiento dilatante, donde la viscosidad aumenta con la tasa de deformación y $n < 1$ pseudoplástico, donde la viscosidad disminuye con la tasa de deformación. La figura 2 ilustra el efecto de n y la figura 3 muestra el impacto de K .

Los fluidos pseudoplásticos ($0 < n < 1$) disminuyen su viscosidad con el esfuerzo, mientras que los dilatantes ($n > 1$) la incrementan. En general el tamaño de partícula influye en n : arcillas ($n \approx 0.33$) son pseudoplásticas, arenas finas ($n \approx 0.75-0.92$) intermedias y

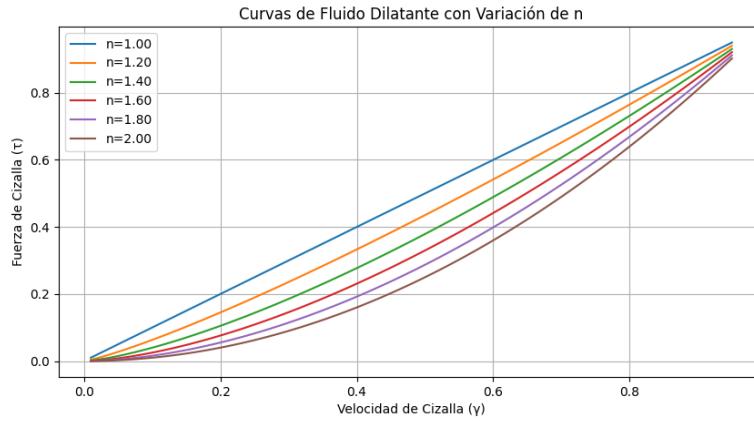


Figure 2: Curvas de comportamiento dilatante para diferentes valores del índice n (1 a 2).

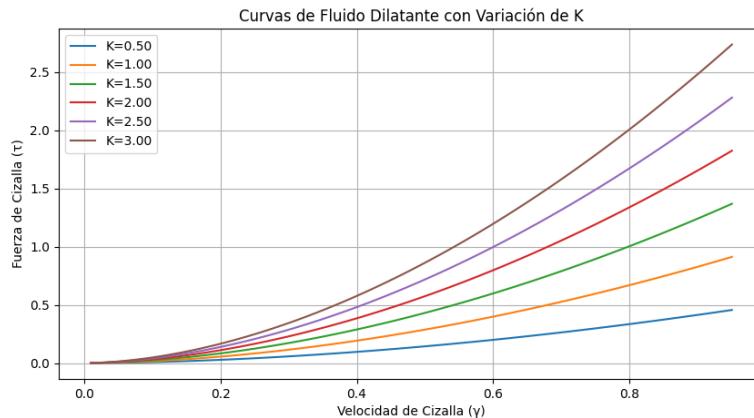


Figure 3: Curvas de comportamiento dilatante para diferentes valores de K con $n = 1.8$.

arenas gruesas ($n \approx 1.35$) dilatantes (Suárez 2009).

2.2.2 Formulación tensorial - SPH del modelo de Herschel-Bulkley

En el marco de modelado de fluidos no newtonianos, la tensión cortante se define mediante:

$$\tau^{\alpha\beta} = K \left(\frac{1}{2} \varepsilon_{\gamma\delta} \varepsilon^{\gamma\delta} \right)^{\frac{n-1}{2}} \varepsilon^{\alpha\beta}, \quad (2)$$

donde K es la consistencia del fluido, una constante dependiente de la naturaleza del material, n es el índice de comportamiento reológico y $\varepsilon^{\alpha\beta}$ es el tensor de tasa de deformación, y $\varepsilon_{\gamma\delta} \varepsilon^{\gamma\delta}$ representa el segundo invariante de dicho tensor.

Ventajas de la formulación unificada

La definición de $\tau^{\alpha\beta}$ presentada anteriormente posee varias ventajas que justifican su implementación en modelos de dinámica de fluidos:

1. Generalidad y flexibilidad

La formulación unificada permite describir una amplia gama de comportamientos reológicos:

- En fluidos newtonianos ($n = 1$), $\tau^{\alpha\beta} = K\varepsilon^{\alpha\beta}$, lo que implica una viscosidad constante.
- En fluidos no newtonianos ($n \neq 1$), la viscosidad varía con la tasa de deformación de manera proporcional al índice n .

2. Dependencia escalar de la tasa de deformación

El término $\varepsilon_{\gamma\delta}\varepsilon^{\gamma\delta}$ es una magnitud escalar que relaciona directamente la tensión cortante con la tasa de deformación efectiva:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\varepsilon_{\gamma\delta}\varepsilon^{\gamma\delta}}.$$

Esto proporciona una interpretación física intuitiva y consistente, ya que el comportamiento del fluido depende de las propiedades invariantes del tensor de deformación.

3. Consistencia matemática

La formulación mantiene la simetría y las propiedades tensoriales del esfuerzo cortante. Además, garantiza que $\tau^{\alpha\beta}$ siga el mismo eje tensorial que $\varepsilon^{\alpha\beta}$, lo que preserva la coherencia entre las fuerzas viscosas y los gradientes de velocidad.

4. Adaptabilidad numérica

En simulaciones numéricas, esta formulación simplifica el cálculo de la viscosidad efectiva:

$$\eta_{\text{eff}} = K\dot{\gamma}^{n-1}.$$

Esto evita ajustes ad hoc para diferentes fluidos, ya que K y n encapsulan toda la variabilidad reológica.

5. Interpretación física directa

El término $(0.5\varepsilon_{\gamma\delta}\varepsilon^{\gamma\delta})^{\frac{n-1}{2}}$ modula la viscosidad efectiva del fluido según la tasa de deformación. Esto permite capturar:

- Aumento de resistencia al flujo en fluidos dilatantes ($n > 1$).
- Disminución de resistencia en fluidos seudoplásticos ($n < 1$).
- Resistencia constante en fluidos newtonianos ($n = 1$).

Implicaciones de la formulación

Esta formulación unificada no solo permite modelar fluidos complejos, sino que también asegura:

- Una descripción coherente del comportamiento viscoso para diferentes índices n .
- Facilidad de implementación en métodos numéricos como SPH, gracias a la dependencia clara de magnitudes escalares.
- Consistencia matemática y física en la representación del esfuerzo cortante.

Por lo tanto, la implementación de $\tau^{\alpha\beta} = K (\varepsilon_{\gamma\delta} \varepsilon^{\gamma\delta})^{\frac{n-1}{2}} \varepsilon^{\alpha\beta}$ es esencial para capturar el comportamiento de fluidos no newtonianos en un marco generalizado.

2.3 Implementación de la consistencia $K(z)$ dependiente de la altura en la formulación SPH

En el modelo clásico de Herschel-Bulkley la consistencia K se considera constante, lo cual asume un material homogéneo en toda su columna. No obstante, para capturar la estratificación observada en muchos deslizamientos naturales, hacemos que

$$K \longrightarrow K(z), \quad (3)$$

de modo que las capas superiores, con menor concentración de sólidos, fluyan con menor viscosidad efectiva, mientras que el lecho, más compacto, ofrezca mayor resistencia.

Se define primero un perfil lineal de fracción volumétrica de sólidos $\phi(z)$:

$$\phi(z) = \phi_{\text{base}} - (\phi_{\text{base}} - \phi_{\text{surf}}) \frac{z}{h_{\text{max}}} \quad 0 \leq z \leq h_{\text{max}},$$

donde h_{max} es la altura total del bloque, ϕ_{base} la concentración en la base y ϕ_{surf} en la superficie libre.

Luego se implementa el modelo de Krieger–Dougherty para $K(z)$. A partir de $\phi(z)$, la consistencia local se obtiene mediante

$$K(z) = \eta_0 \left[1 - \frac{\phi(z)}{\phi_{\text{max}}} \right]^{-\kappa \phi_{\text{max}}},$$

donde η_0 es la viscosidad de referencia, κ la viscosidad intrínseca y ϕ_{max} la concentración de colapso. Este exponente asegura que la viscosidad crezca rápidamente al acercarse ϕ a ϕ_{max} .

Luego el modelo se incorpora en la ley constitutiva SPH. Se sustituye la constante K por $K(z)$ en la expresión tensorial:

$$\tau^{\alpha\beta}(z) = K(z) \left(\frac{1}{2} \varepsilon_{\gamma\delta} \varepsilon^{\gamma\delta} \right)^{\frac{n-1}{2}} \varepsilon^{\alpha\beta}.$$

De este modo, el tensor de tensiones refleja la heterogeneidad vertical de la viscosidad.

Finalmente para el modelo se realiza la implementación numérica en cada paso de tiempo y para cada partícula i :

- Se obtiene su altura z_i dentro del bloque.
- Se calcula $\phi_i = \phi(z_i)$ con el perfil lineal.
- Se evalúa la consistencia local $K_i = K(z_i)$ mediante Krieger–Dougherty.
- Se forma el tensor de tensiones $\tau_i^{\alpha\beta} = K_i (\varepsilon_{i,\gamma\delta} \varepsilon_i^{\gamma\delta})^{\frac{n-1}{2}} \varepsilon_i^{\alpha\beta}$ y se usan las fuerzas viscosas SPH correspondientes.

Gracias a esta formulación, las capas superficiales resbalan con menor resistencia y el fondo, más viscoso, frena el flujo, reproduciendo fielmente la estratificación observada en el evento real.

3 Requisitos del Sistema

- **Sistema Operativo:** Linux o Windows
- **Lenguaje:** Fortran F90 y Python 3.9+
- **Hardware recomendado:** 8GB RAM, Procesador multinúcleo

3.1 Requisitos del Sistema

- Compilador Fortran 90 (gfortran recomendado)
- Python 3.6 o superior
- Bibliotecas científicas para Python: NumPy, Matplotlib
- Sistema operativo Linux (probado en Ubuntu 20.04+) y Windows

4 Estructura del Código

4.1 Descripción General

El proyecto implementa el método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) para simular el movimiento de lodos, combinando:

- **Fortran:** Para el núcleo computacional de alta performance
- **Python:** Para pre/post-procesamiento de datos

La estructura sigue un esquema organizado que facilita el desarrollo, ejecución y análisis de resultados.

4.2 Estructura de Directorios y Archivos

4.2.1 Directorios Principales

- **doc:** Documentación técnica y manuales.
- **src:** Código fuente principal en Fortran (implementación SPH).
- **examples:** Casos de prueba y configuraciones predefinidas.
- **include:** Contiene el archivo de parámetros para compilar el código fortran SPH.
- **obj:** Archivos objeto compilados.
- **scripts:** Contiene los códigos en python para crear condiciones iniciales y para el análisis de datos.

4.2.2 Archivos Clave

- **makefile:** Automatización de compilación
- **crear_ejecutable.sh:** Script de automatización que realiza dos funciones principales:
 - Ejecuta el proceso de compilación mediante el comando `make`
 - Mueve el ejecutable resultante a un subdirectorio específico dentro de `examples/`

Uso:

```
./crear_ejecutable.sh <nombre_directorio>
```

Ejemplo:

```
./crear_ejecutable.sh ej1 # El ejecutable se ubicará en examples/ej1/
```

Tener en cuenta que el directorio destino debe existir previamente dentro de `examples/`. Esto facilita la organización al mantener cada caso de estudio en su propio directorio

4.3 Flujo de Trabajo

1. Pre-procesamiento (Python):

- Generación de condiciones iniciales
- Configuración de parámetros

2. Simulación SPH (Fortran):

- Cálculo núcleo de ecuaciones de movimiento
- Generación de resultados brutos

3. Post-procesamiento (Python):

- Visualización científica
- Análisis cuantitativo

4.4 Configuración y Ejecución

El sistema incluye mecanismos de automatización:

- Compilación mediante `makefile`
- Script `crear_ejecutable.sh` para construcción simplificada
- Plantillas configurables en `examples/`

Esta arquitectura modular permite:

- Mantenimiento sencillo
- Extensibilidad para nuevos modelos
- Colaboración eficiente

5 Flujo de trabajo: configuración, instalación y ejecución

5.1 Configuración e Instalación en Linux

5.1.1 Generación de Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales se generan mediante el script Python ubicado en el directorio del caso (ej*):

```
1 python3 condiciones_iniciales_ej1.py
```

Salida:

- Archivo `snapshot_000` con la configuración inicial de partículas
- Datos en terminal para editar el archivo `params.inc` con parámetros sugeridos.

5.1.2 Configuración de Parámetros

Edite el archivo de parámetros con un editor de texto:

```
1 nano params.inc # o su editor preferido
```

Ajuste los siguientes parámetros clave: tamaño del paso de tiempo (dt), número de iteraciones (nsteps), viscosidad del fluido (alpha), densidad de referencia (rho0), entre otros, ver la tabla 1.

5.1.3 Compilación y Ejecución

1. Navegue al directorio principal del proyecto
2. Ejecute el script de compilación:

```
1 ./crear_ejecutable.sh <directorío_destino>
```

Acciones del script:

- Copia `params.inc` a `.include/`
- Compila el código Fortran mediante `makefile`
- Mueve el ejecutable `sph` al directorio destino

3. Ejecute la simulación:

```
1 cd ej1 # navegue al directorio del caso
2 ./run_1p.sh # inicia la simulacion
```

Parámetro	Descripción y Valor
<code>dim</code>	Dimensión del problema (1D, 2D o 3D). Valor: 3 (simulación en 3D).
<code>nmax</code>	Número máximo de partículas permitidas. Valor: 60,000.
Dominio de Simulación	Define los límites del dominio en cada eje: <code>dxmin, dxmax</code> Límite en <i>x</i> . Valor: [948,400.0, 948,800.0]. <code>dymin, dymax</code> Límite en <i>y</i> . Valor: [590,600.0, 591,000.0]. <code>dzmin, dzmax</code> Límite en <i>z</i> . Valor: [2300.0, 2400.0].
<code>cns</code>	Método de búsqueda de vecinos: 1 = búsqueda directa, 2 = búsqueda paralelizada directa, 3 = Grid Hashing, 4 = Grid Hashing paralelizada, 5 = Grid Hashing implementa medida de distancia para gradiente de concentración en modelos de lodos. Valor: 3.
<code>np</code>	Número de procesadores si <code>cns</code> = 4. Valor: 8.
Pasos de Tiempo	
<code>initime, fintime</code>	Tiempo inicial y final en pasos (no en segundos). Valor: [0, 50,000].
<code>inioutfile</code>	Archivo inicial de salida. Valor: 'snapshot_000'.
<code>dt0</code>	Paso de tiempo para la integración. Valor: 0.005.
Dominio de Soporte	
<code>h0, kappa0</code>	Longitud de suavizado inicial y constante del dominio. Valor: [1.0, 2.0].
<code>skf</code>	Función de suavizado: 1 = spline cúbico, 2 = Gaussiana, 3 = spline quíntico. Valor: 1.
<code>ht</code>	Altura máxima del bloque en metros. Valor: 1.0.
<code>g</code>	Aceleración de la gravedad en <i>z</i> . Valor: 9.82.
Ecuación de Estado Artificial	
<code>gamma, beta, rho0</code>	Constantes para la densidad inicial. Valor: [7.0, 1.0, 1000.0].
Viscosidad	
<code>mu, muc</code>	Coeficientes de viscosidad dinámica. Valor: [1.002e-3, 1000.0].
Modelos Viscosidad	
<code>mvisc</code>	Modelo de viscosidad: 1 = constante (Fluido Newtoniano), 2 = viscosidad variable (Fluido No-Newtoniano, modelo de Herschel-Bulkey). Valor: 1.
<code>mvisk</code>	Modelo de viscosidad: 1 = parametro de viscosidad constante constante (modelo de Herschel-Bulkey K=constante), 2 = parametro de viscosidad variable (modelo de Herschel-Bulkey K=depende de la concentración). Valor: 1.
<code>nn</code>	Índice de comportamiento reológico. Valor: 1.5.
Fuente de Partículas	
<code>source_mode</code>	Activa el modo de fuente de partículas ('y').
<code>QQ, mu_new, length</code>	Flujo, viscosidad de la fuente y longitud de la fuente. Valor: [11.5, 1.002e-3, 0.1].
<code>start_x, start_y, start_z,</code>	Posición inicial y ángulo de la fuente. Valor: [948,452.3, 590,680.8, 2348, 90.0].
<code>angle</code>	
<code>v_fuente0, d_horizontal</code>	Velocidad de la fuente y distancia horizontal. Valor: [1.0, 17.0].
<code>save_step</code>	Frecuencia para guardar resultados. Valor: 40 pasos.

Table 1: Descripción del archivo de parámetros para el código SPH.

5.2 Salida de la Simulación

Durante la ejecución, el programa genera:

- Archivos `snapshot_XXXX`.
- Datos en terminal sobre la ejecución.
- Archivos de diagnóstico temporal `time_cpu.txt`.

Nota: Para simulaciones largas, considere ejecutar en segundo plano:

```
1 nohup ./run_1p.sh > output.log &
```

6 Ejemplos

El repositorio se encuentra en <https://github.com/diegovalencia82/massmove.git>

6.1 Ejemplo 1 (ej1)

La figura 4 muestra los primeros instantes del rompimiento de presa. El bloque se desintegra y forma un chorro con pico de velocidad en la cabeza del flujo (puntos rojizos), seguido de un avance casi plano de la lámina líquida. A partir de $t = 1.8$ segundo se observa la desaceleración y dispersión de las partículas, dando lugar a ondulaciones persistentes en la superficie libre que se atenúan paulatinamente hacia $t = 6.7$ segundos. Esta secuencia confirma que el modelo captura tanto la fase de choque inicial como la posterior relajación y estabilidad del lecho, exhibiendo un comportamiento cualitativo coherente con estudios experimentales de colapso de láminas de agua.

El modelo SPH bidimensional, mostrado en la figura 5, muestra la comparación de los datos experimentales de Lobovský et al. (2014). El modelo reproduce satisfactoriamente la dinámica global del frente de agua capturando la pendiente casi lineal de su propagación una vez superada la fase inicial de arranque. Sin embargo, existe una leve subestimación en los primeros instantes, atribuible al suavizado inherente al kernel y a la resolución espacial utilizada. Los bajos valores de rango y desviación estándar de los residuales confirman que, a pesar de esas pequeñas diferencias, el modelo es capaz de predecir con buena fidelidad la evolución temporal del frente de flujo en condiciones experimentales.

Para el desarrollo de esta simulación a continuación se muestra el archivo de parámetros utilizado en el software.

Listing 1: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 !     Including file for parameters and constants used
3 !     in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6     double precision pi
7     parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10    integer dim
11    parameter ( dim = 2)
12
13 !     nmax : Maximum number of particles
14    integer nmax
15    parameter ( nmax = 8066 )
16
17 ! -----
18 !     dominio de simulacion
19    double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
20    parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.710000 )

```

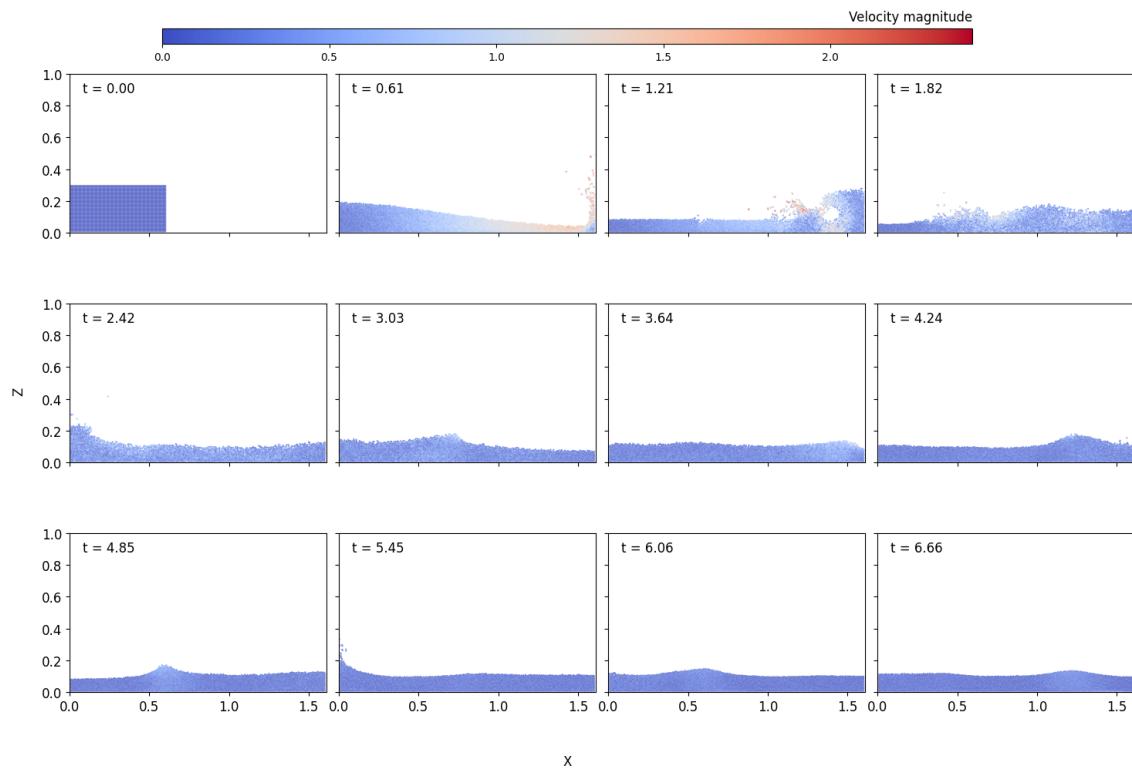


Figure 4: Instantáneas de la simulación SPH en 2D del colapso y propagación de un bloque de agua, presentadas en doce subgráficos correspondientes a tiempos t desde 0.00 hasta 6.66 segundos. Cada panel muestra la distribución espacial de las partículas en el plano $x - z$ coloreadas según la magnitud de su velocidad (barra de colores superior), con azul indicando velocidades bajas y rojo las máximas. El gráfico ilustra claramente el bloque inicial, el arranque del flujo, el desarrollo del frente, así como la dinámica de dispersión y asentamiento posteriores.

```

21 !      parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.250000 )
22 !      parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.800000 )
23
24 !-----#
25 !      call neighboring_search
26 !          cns = 1: direct Search for neighbors
27 !          cns = 2: parallelized neighbor search
28 !          cns = 3: Grid Hashing Search
29 !          cns = 4: Grid Hashing parallelized
30 !          cns = 5: Grid Hashing, radius for apparent viscosity
31 !      integer cns
32 !      parameter (cns = 3)
33
34 !      if cns = 4: set number of processors

```

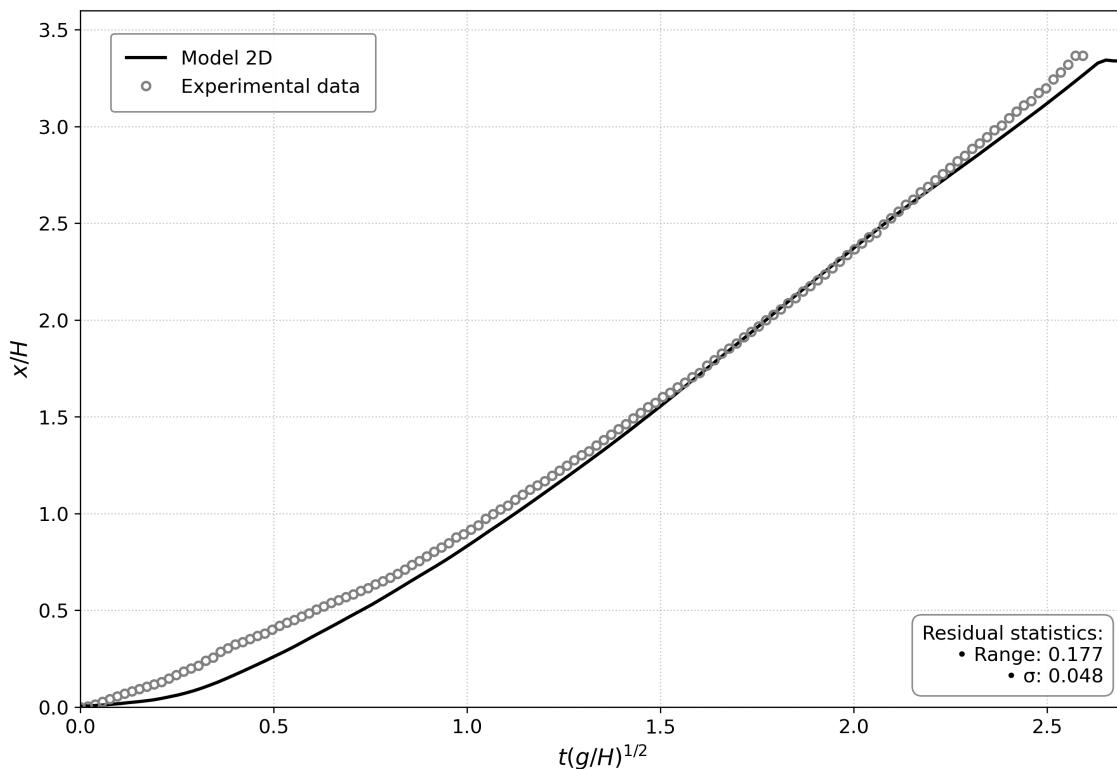


Figure 5: Comparación del avance normalizado del frente de flujo x/H en función del tiempo adimensionalizado $t(g/H)$ obtenida con el modelo SPH 2D (línea continua negra) frente a datos experimentales (círculos grises). Se incluyen en el recuadro las estadísticas de residuales, con un rango de error de 0.177 y una desviación estándar de 0.048, que cuantifican la dispersión entre la predicción numérica y las mediciones de laboratorio.

```

35      integer np
36      parameter (np = 8)
37
38 ! -----
39      integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
40      parameter ( initime = 0, fintime = 100000 )
41      parameter ( inioutfile = 000 )
42      character infile*80, infilev*80
43      parameter ( infile = 'snapshot_000' )
44      parameter ( infilev = 'snapshot_000' )
45
46 ! -----
47 !     Time step integration
48      double precision dt0, pdt0
49      parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 0.73 )
50

```

```
51 ! -----
52 !     To save steps
53     integer save_step
54     parameter ( save_step = 50 )
55
56 ! -----
57 !     Support domain
58     double precision h0, kappa0
59     parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.006d0 )
60
61 ! -----
62 !     Kernel function
63 !     SKF = 1: Cubic spline
64 !             = 2: Gaussian
65 !             = 3: Quintic
66     integer SKF
67     parameter (SKF = 1)
68
69 ! -----
70 !     Maximum height of fluid block
71     double precision ht
72     parameter ( ht = 0.3d0 )
73
74 ! -----
75 !     Gravity
76     double precision g
77     parameter ( g = 9.82d0 )
78
79 ! -----
80 !     Artificial EOS
81     double precision gamma, beta, rho0, rbeta
82     parameter ( gamma = 7.0, beta = 5.0, rbeta = 0.01, rho0 =
83                 1000.0 )
84
85 ! -----
86 !     Viscous force
87     double precision mu, muc
88     parameter ( mu = 1.002e-3, muc = 100 )
89
90 ! -----
91 !     Viscosity model
92 !     Mvisc = 1: constant
93 !             = 2: non-constant
94     integer mvisc, mvisk
95     double precision nn
96     parameter ( mvisc = 1, nn = 1.0, mvisk = 1 )
97
98     double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
         parameter ( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0,
```

```
99      intrinsic_viscosity = 2.5d0 )  
100 !-----  
101 ! Source mode parameters  
102 character source_mode  
103 parameter (source_mode = 'n')  
104  
105 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle  
106 double precision v_fuente0, d_horizontal  
107 parameter ( QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3 )  
108 parameter ( start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06,  
    angle = 90.0d0 )  
109 parameter ( v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0 )
```

6.2 Ejemplo 2 (ej2)

La figura 6 muestra los primeros instantes del rompimiento de presa del modelo desarrollado en 3D. El bloque sigue un comportamiento similar al descrito en el ejemplo 1.

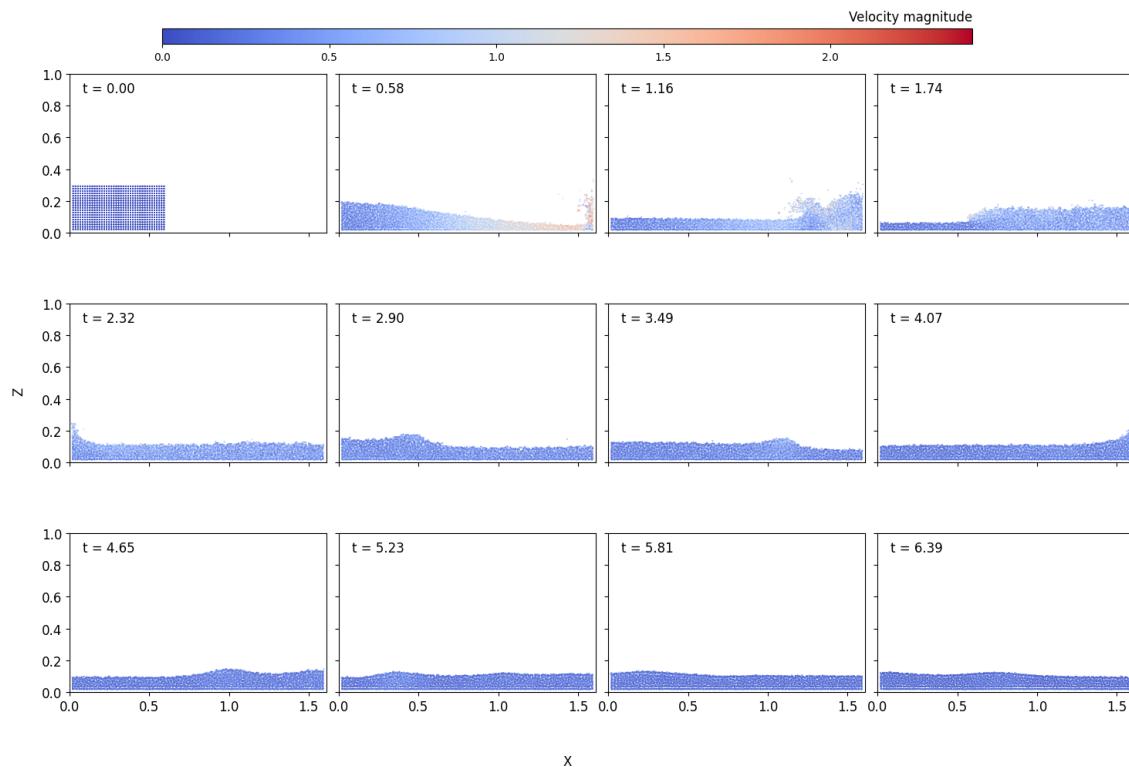


Figure 6: Instantáneas de la simulación SPH en 3D, proyectadas en 2D del colapso y propagación de un bloque de agua, presentadas en doce subgráficos correspondientes a tiempos t desde 0.00 hasta 6.66 segundos. Es figura es similar a la figura 4.

El modelo SPH tridimensional, mostrado en la figura 5 (proyectado en el plano $x - z$), muestra la comparación de los datos experimentales de Lobovský et al. (2014). Tal como en el ejemplo 1, el modelo reproduce satisfactoriamente la dinámica global del frente de onda del agua capturando la pendiente casi lineal de su propagación. Sin embargo, existe una leve subestimación en los primeros instantes, atribuible al suavizado inherente al kernel y a la resolución espacial utilizada. Los bajos valores de rango y desviación estándar de los residuales confirman que, a pesar de esas pequeñas diferencias, el modelo es capaz de predecir con buena fidelidad la evolución temporal del frente de flujo en condiciones experimentales.

Para el desarrollo de esta simulación a continuació se muestra el archivo de parámetros utilizado en el software.

Listing 2: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

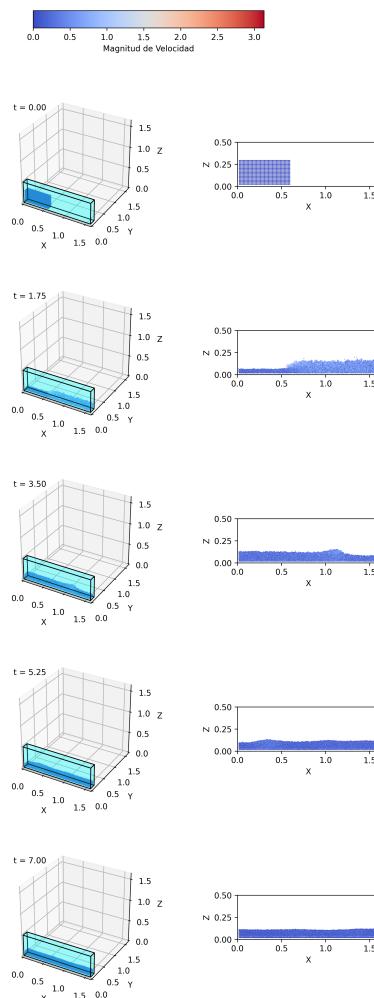


Figure 7: Instantáneas de la simulación SPH en 3D, proyectadas en 3D. 6.

```

1 ! -----
2 ! Including file for parameters and constants used
3 ! in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6     double precision pi
7     parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10    integer dim
11    parameter ( dim = 3)
12
13 !     nmax      : Maximum number of particles
14    integer nmax
15    parameter ( nmax = 47862 )

```

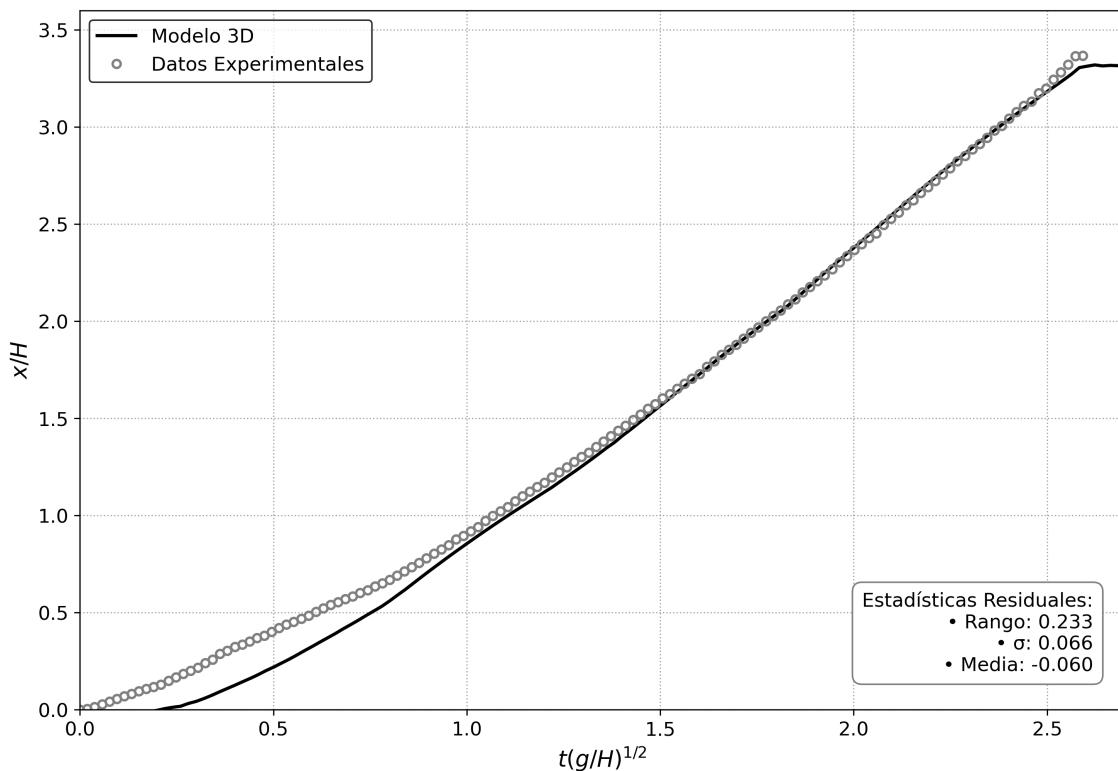


Figure 8: Comparación del avance normalizado del frente de flujo x/H en función del tiempo adimensionalizado $t(g/H)$ obtenida con el modelo SPH 3D (línea continua negra) frente a datos experimentales (círculos grises). Esta figura es como en la figura ??

```

16 !
17
18 !-----!
19 !      dominio de simulacion
20     double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21     parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.710000 )
22     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.250000 )
23     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 1.0000 )
24
25 !-----!
26 !      call neighboring_search
27 !          cns = 1, direct Search for neighbors
28 !          cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !          cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !          cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !          cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 !      for aparent viscosity
33     integer cns
34     parameter (cns = 3)

```

```

35 !      if cns = 4 you have to set the number of processors
36 integer np
37 parameter (np = 8)

38 ! -----
39 !      integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
40 !      parameter ( initime = 0, fintime = 100000 ) !This refers to the
41 !          number of steps itself, not the time in seconds.
42 parameter ( inioutfile = 000)
43 character infile*80, infilev*80
44 parameter ( infile = 'snapshot_000' )
45 parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando
46 !      inicia con archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el
47 !      archivo inicial el que tiene todas las particulas

48 ! -----
49 !      Time step integration
50 double precision dt0, pdt0
51 parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 0.7 )

52 ! -----
53 !      To save steps
54 integer save_step
55 parameter ( save_step = 50)

56 ! -----
57 !      Definition of the support domain
58 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
59 double precision h0, kappa0
60 parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 ) ! h0 = 0.01

61 ! -----
62 !      Smoothing kernel function
63 !      SKF = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
64 !          = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
65 !          = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
66 integer SKF
67 parameter (SKF = 1)

68 ! -----
69 !      ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
70 !      conditions
71 !      The measurement must be in meters
72 double precision ht
73 parameter ( ht = 0.3d0)

74 ! -----
75 !      g = 9.82. Gravity
76 double precision g
77 parameter ( g = 9.82d0 )

78 ! -----
79 !      Artificial EOS.
80
81
82 ! -----
83 !      Artificial EOS.

```

```

84 !      Initial density of particles, rho0
85 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
86 parameter ( gamma=7.0, beta = 5.0, rbeta = 0.001, rho0 = 1000.0)
87
88 ! -----
89 !      viscous force
90 double precision mu, muc
91 parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
92
93 ! -----
94 !      mvisc = 1 constant viscosity
95 !      mvisc = 2 non-constant viscosity
96 !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
97 !      mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
98 !      Herschel-Bulkley
99 !      mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
100 el modelo de Herschel-Bulkley
101 integer mvisc, mvisk
102 double precision nn
103 parameter (mvisc = 1, nn = 1.0, mvisk = 1)
104
105 !      if mvisk = 2 you have to choose
106 !      phi_base, phi_surface
107 double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
108 parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity
109 = 2.5d0)
110
111 ! -----
112 !      source_mode = y: The code use the source mode
113 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
114 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
115 !      length = length of the line source of fluid
116 !      start_x = initial position of the source in x axe
117 !      start_z = initial position of the source in y axe
118 !      angle = source angle
119 character source_mode
120 parameter (source_mode = 'n')
121 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle,
122 v_fuente0, d_horizontal
123 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
124 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle =
125 90.0d0)
126 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)

```

6.3 Ejemplo 3 (ej3)

La figura muestra una secuencia de instantáneas de una simulación bidimensional de una fuente de agua interactuando con un dominio fluido. La simulación ilustra la evolución temporal del movimiento de las partículas y la distribución de velocidades, donde el color indica la magnitud de la velocidad. Inicialmente, el chorro proveniente de la fuente impacta la superficie del fluido, generando una perturbación localizada. A medida que transcurre el tiempo, el fluido inyectado se dispersa y se propaga horizontalmente, formando una capa delgada sobre el dominio. El campo de velocidades muestra una atenuación progresiva como resultado de la difusión del momento y los efectos viscosos.

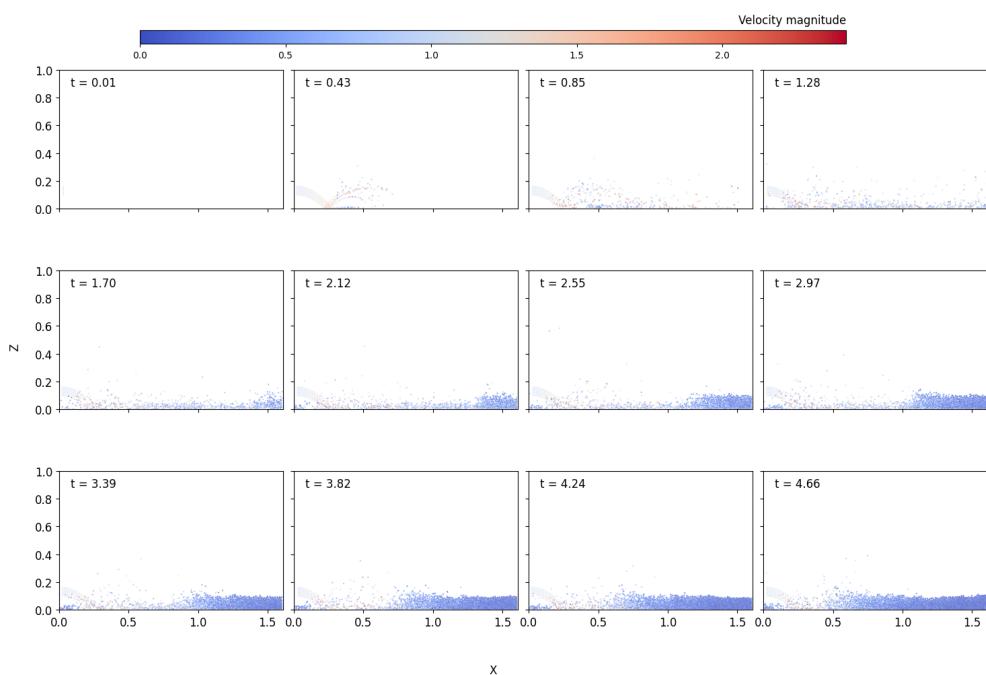


Figure 9: Evolución temporal de la magnitud de la velocidad en una simulación 2D con SPH de una fuente de agua. Se presentan 12 instantáneas para tiempos distintos, desde $t = 0.01$ hasta $t = 4.66$ segundos. La escala de colores representa la magnitud de la velocidad de las partículas, desde valores bajos (azul) hasta altos (rojo).

Listing 3: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 ! Including file for parameters and constants used
3 ! in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6     double precision pi
7     parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)

```

```

10      integer dim
11      parameter ( dim = 2)
12
13 !     nmax      : Maximum number of particles
14      integer nmax
15      parameter ( nmax = 100000 )
16 !
17
18 !-----!
19 !     dominio de simulacion
20      double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21      parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.710000 )
22 !     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.250000 )
23 !     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.80000 )
24
25 !-----!
26 !     call neighboring_search
27 !             cns = 1, direct Search for neighbors
28 !             cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !             cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !             cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !             cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 !             for aparent viscosity
33      integer cns
34      parameter (cns = 3)
35
36 !     if cns = 4 you have to set the number of processors
37      integer np
38      parameter (np = 8)
39
40 !-----!
41      integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
42      parameter ( initime = 0, fintime = 200000 ) !This refers to the
43          number of steps itself, not the time in seconds.
44      parameter ( inioutfile = 000)
45      character infile*80, infilev*80
46      parameter ( infile = 'snapshot_000' )
47      parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando
48          inicia con archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el
49          archivo inicial el que tiene todas las particulas
50
51 !-----!
52 !     Time step integration
53      double precision dt0, pdt0
54      parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 0.73 )
55
56 !-----!
57 !     To save steps
58      integer save_step
59      parameter ( save_step = 100)
60
61 !-----!
62 !     Definition of the support domain

```

```

59 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
60      double precision h0, kappa0
61      parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.006d0 ) ! h0 = 0.01
62
63 ! -----
64 !      Smoothing kernel function
65 !      SKF = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
66 !          = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
67 !          = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
68      integer SKF
69      parameter(SKF = 1)
70
71 ! -----
72 !      HT           Maximum high of the block, it is equal to the initial
73 !      conditions
74 !      The measurement must be in meters
75      double precision HT
76      parameter ( HT = 0.3d0)
77
78 ! -----
79 !      G = 9.82. Gravity
80      double precision g
81      parameter ( g = 9.82d0 )
82
83 ! -----
84 !      Artificial EOS.
85 !      Initial density of particles, rho0
86 !      rbeta es un parametro de regularizacion
87      double precision gamma, beta, rho0, rbeta
88      parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1., rho0 = 1000.0)
89      parameter ( gamma=7.0, beta = 2.23607, rbeta = 0.05, rho0 = 1000.0)
90
91 ! -----
92 !      Viscous force
93      double precision mu, muc
94      parameter ( mu=1.002e-3, muc=100)
95      parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
96      parameter ( mu=8.41, muc=1.)
97      parameter ( mu=800.41, muc=1.)
98
99 ! -----
100 !      mvisc = 1 constant viscosity
101 !      mvisc = 2 non-constant viscosity
102 !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
103 !      mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
104 !      Herschel-Bulkley
105 !      mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
106 !      el modelo de Herschel-Bulkley
107      integer mvisc, mvisk
108      double precision nn
109      parameter (mvisc = 1, nn = 1.0, mvisk = 1)

```

```
109 !      if mvisk = 2 you have to choose
110 !      phi_base, phi_surface
111 !      double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
112 !      parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity
113 !                  = 2.5d0)
114 !-----
115 !
116 !      source_mode = y: The code use the source mode
117 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
118 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
119 !      length = length of the line source of fluid
120 !      start_x = initial position of the source in x axe
121 !      start_z = initial position of the source in y axe
122 !      angle = source angle
123 !      character source_mode
124 !      parameter (source_mode = 'y')
125 !      double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle,
126 !                  v_fuente0, d_horizontal
127 !      parameter (QQ = 0.03d0, mu_new = 1.002e-3)
128 !      parameter (start_x = 0.02, start_y = 0.2, start_z = 0.1, angle = 90.0
d0)
parameter (v_fuente0 = 1.0d0, d_horizontal = 0.2d0)
```

6.4 Ejemplo 4 (ej4)

La figura presenta una serie de instantáneas de una simulación tridimensional, en la que una fuente de agua interactúa con un dominio. Se muestran dos vistas complementarias para cada instante de tiempo: a la izquierda, una vista en 3D del dominio completo que permite observar la distribución espacial de las partículas; a la derecha, una proyección 2D del plano XZ, que resalta el perfil longitudinal del flujo. En ambas visualizaciones, el color de las partículas indica la magnitud de la velocidad, de acuerdo con la escala de color mostrada. A medida que transcurre el tiempo, el chorro de agua proveniente de la fuente genera una perturbación inicial que se propaga y se disipa sobre el dominio, lo cual es especialmente evidente en la proyección lateral. La simulación permite observar la evolución del flujo, su expansión y el efecto del confinamiento del dominio en el comportamiento del fluido.

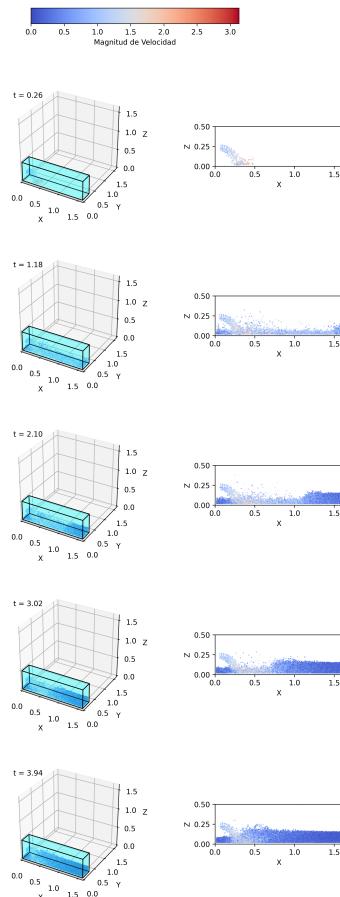


Figure 10: Secuencia temporal de la magnitud de la velocidad en una simulación 3D de una fuente de agua vertida sobre un dominio cerrado. Para cada instante ($t = 0.26$ a $t = 3.94$ segundos), se muestra a la izquierda una vista en perspectiva del dominio tridimensional, y a la derecha una vista en el plano XZ . El color representa la magnitud de la velocidad, desde valores bajos (azul) hasta altos (rojo).

Listing 4: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 ! Including file for parameters and constants used
3 ! in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6     double precision pi
7     parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9     ! dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10    integer dim
11    parameter ( dim = 3 )
12
13    ! nmax      : Maximum number of particles
14    integer nmax
15    parameter ( nmax = 100000 )
16
17
18 ! -----
19 ! dominio de simulacion
20     double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21     parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.710000 )
22     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.310000 )
23     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.7 )
24
25 ! -----
26 ! call neighboring_search
27 !         cns = 1, direct Search for neighbors
28 !         cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !         cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !         cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !         cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 ! for aparent viscosity
33     integer cns
34     parameter (cns = 3)
35
36 ! if cns = 4 you have to set the number of processors
37     integer np
38     parameter (np = 8)
39
40 ! -----
41     integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
42     parameter ( initime = 0, fintime = 150000 ) !This refers to the
43 !       number of steps itself, not the time in seconds.
44     parameter ( inioutfile = 000 )
45     character infile*80, infilev*80
46     parameter ( infile = 'snapshot_000' )
47     parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando
48 !       inicia con archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el
        archivo inicial el que tiene todas las particulas
49
50 ! -----
51 ! Time step integration

```

```

49      double precision dt0, pdt0
50      parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 0.7 )
51
52 ! -----
53 !      To save steps
54      integer save_step
55      parameter ( save_step = 75)
56
57 ! -----
58 !      Definition of the support domain
59 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
60      double precision h0, kappa0
61      parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 ) ! h0 = 0.01
62
63 ! -----
64 !      Smoothing kernel function
65 !      skf = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
66 !      = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
67 !      = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
68      integer skf
69      parameter(skf = 1)
70
71 ! -----
72 !      ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
73 !      conditions
74 !      The measurement must be in meters
75      double precision ht
76      parameter ( ht = 0.3d0)
77
78 ! -----
79 !      g = 9.82. Gravity
80      double precision g
81      parameter ( g = 9.82d0 )
82
83 ! -----
84 !      Artificial EOS.
85 !      Initial density of particles, rho0
86      double precision gamma, beta, rho0, rbeta
87      parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1.0, rho0 = 1000.0)
88      !      parameter ( gamma=7.0, beta = 3.16, rho0 = 1000.0)
89
90 ! -----
91 !      viscous force
92      double precision mu, muc
93      parameter ( mu=1.002e-3, muc=600)
94      !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
95      !      parameter ( mu=8.41, muc=1.)
96      !      parameter ( mu=800.41, muc=1.)
97
98 ! -----
99 !      mvisc = 1 constant viscosity
100 !      mvisc = 2 non-constant viscosity

```

```
101 !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
102 !      mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
103 Herschel-Bulkley
104 !      mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
105 el modelo de Herschel-Bulkley
106 integer mvisc, mvisk
107 double precision nn
108 parameter (mvisc = 1, nn = 1.0, mvisk = 1)
109
110 !      if mvisk = 2 you have to choose
111 !      phi_base, phi_surface
112 !      double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
113 !      parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity
114 !                  = 2.5d0)
115 !
116 !-----.
117 !
118 !      source_mode = y: The code use the source mode
119 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
120 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
121 !      length = length of the line source of fluid
122 !      start_x = initial position of the source in x axe
123 !      start_z = initial position of the source in y axe
124 !      angle = source angle
125 character source_mode
126 parameter (source_mode = 'y')
127 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle,
128 v_fuente0, d_horizontal
129 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
130 parameter (start_x = 0.05, start_y = 0.05, start_z = 0.2, angle =
131 90.0d0)
132 parameter (v_fuente0 = 0.9d0, d_horizontal = 0.17d0)
```

6.5 Ejemplo 5 (ej5)

La figura 11 se muestra el rompimiento de presa para el modelo H-B, los parámetros se muestran en el archivo de parámetros. Se observa que las velocidades se mantienen en valores bajos y homogéneos, sin picos repentinos, reflejando el endurecimiento por esfuerzo característico del modelo H-B. El rompimiento de presa inicial produce un frente difuso que avanza lentamente, y conforme transcurre el tiempo, el material se extiende formando una capa cada vez más delgada y de velocidad decreciente hasta asentarse sobre la pared posterior del canal.

Listing 5: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1      ! -----
2      !     Including file for parameters and constants used
3      !     in the entire SPH software packages.
4      ! -----
5
6      double precision pi
7      parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9      !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10     integer dim
11     parameter ( dim = 3 )
12
13     !     nmax      : Maximum number of particles
14     integer nmax
15     parameter ( nmax = 81321 )
16     !
17
18     ! -----
19     !     dominio de simulacion
20     double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21     parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 2.510000 )
22     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.310000 )
23     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.520000 )
24
25     ! -----
26     !     call neighboring_search
27     !             cns = 1, direct Search for neighbors
28     !             cns = 2, direct parallelized neighbor search
29     !             cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30     !             cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for
31     !             neighbors
32     !             cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors , meausre
33     !             raidus for aparent viscosity
34     integer cns
35     parameter (cns = 5)
36
37     !     if cns = 4 you have to set the number of processors
38     integer np
39     parameter (np = 8)
40
41     ! -----

```

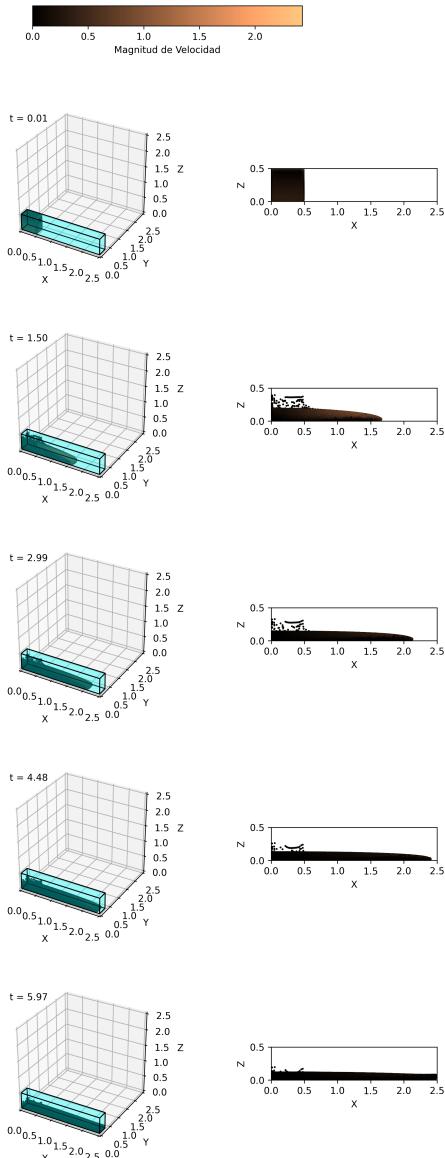


Figure 11: Instantáneas de la magnitud de velocidad en el modelo H-B para $n = 1.5$, mostradas en cinco tiempos desde $t = 0.01$ hasta $t = 5.97$ segundos. La figura tiene el mismo formato 3D que las anteriores.

```

40   integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
41   parameter ( initime = 0, fintime = 60000 ) !This refers to the
42   number of steps itself, not the time in seconds.
43   parameter ( inioutfile = 000)
44   character infile*80, infilev*80
45   parameter ( infile = 'snapshot_000' )
      parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando

```

```

        inicia con archivos sin particulas de frontera (Siempre carga
        el archivo inicial el que tiene todas las particulas
46
47      ! -----
48      !       Time step integration
49      double precision dt0, pdt0
50      parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 1.0 )
51
52      ! -----
53      !       To save steps
54      integer save_step
55      parameter ( save_step = 100)
56
57      ! -----
58      !       Definition of the support domain
59      !       h0 is taken from the space of particles in the initial
60      !       conditions
61      double precision h0, kappa0
62      parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 ) ! h0 = 0.01
63
64      ! -----
65      !       Smoothing kernel function
66      !       skf = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
67      !       = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
68      !       = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
69      integer skf
70      parameter (skf = 1)
71
72      ! -----
73      !       ht           Maximum high of the block, it is equal to the
74      !       initial conditions
75      !       The measurement must be in meters
76      double precision ht
77      parameter ( ht = 0.5d0)
78
79      ! -----
80      !       g = 9.82. Gravity
81      double precision g
82      parameter ( g = 9.82d0 )
83
84      ! -----
85      !       Presion parameters
86      !       Initial density of particles, rho0
87      double precision gamma, beta, rho0, rbeta
88      parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 = 1950.0)
89      !       parameter ( gamma=7.0, beta = 3.16, rho0 = 1000.0)
90
91      ! -----
92      !       viscous force
93      double precision mu, muc
94      !       parameter ( mu=1.002e-3, muc=500)
95      !       parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
96      parameter ( mu=8.41, muc=1.)

```

```

95      !      parameter ( mu=800.41, muc=1.)
96
97
98      !-----
99      !      mvisc = 1 constant viscosity
100     !      mvisc = 2 non-constant viscosity
101     !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
102     !      mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el
103       modelo de Herschel-Bulkley
104     !      mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la
105       altura en el modelo de Herschel-Bulkley
106     integer mvisc, mvisk
107     parameter (mvisc = 2, mvisk = 1)
108
109     !      if mvisk = 2 you have to choose
110     !      phi_base, phi_surface
111     double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
112     parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0,
113               intrinsic_viscosity = 2.5d0)
114
115     !-----
116     !      source_mode = y:  The code use the source mode
117     !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
118     !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
119     !      length = length of the line source of fluid
120     !      start_x = initial position of the source in x axe
121     !      start_z = initial position of the source in y axe
122     !      angle = source angle
123     character source_mode
124     parameter (source_mode = 'n')
125     double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle,
126           v_fuente0, d_horizontal
127     parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
128     parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle =
129                 90.0d0)
130     parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)

```

6.6 Ejemplo 6 (ej6)

La Figura 12 muestra el rompimiento de presa de dos fluidos, uno es fluido tipo agua (azul) y el otro es un fluido tipo lodo modelado con H-B (marrón). La figura muestra que el comportamiento distintivo de los dos fluidos a medida que interactúan con el tiempo. Inicialmente, en $t = 0.00$, a medida que avanza la simulación, los fluidos exhiben dinámicas complejas de mezcla y estratificación debido a las diferencias de viscosidad y densidad.

Se identifican tres observaciones clave: en la primera etapa, el fluido tipo lodo colapsa, formando ondas y salpicaduras al interactuar con el fluido tipo agua. Luego, con el paso del tiempo, los fluidos comienzan a mezclarse en su interfaz. El lodo más denso se asienta hacia el fondo, mientras que el agua forma una capa más delgada en la parte superior, reflejando las diferencias de densidad y viscosidad. En las etapas posteriores, el fluido tipo lodo se distribuye principalmente en la parte inferior del dominio, mientras que el fluido tipo agua permanece en la parte superior, evidenciando una estratificación estable influenciada por la gravedad y las propiedades reológicas de cada fluido.

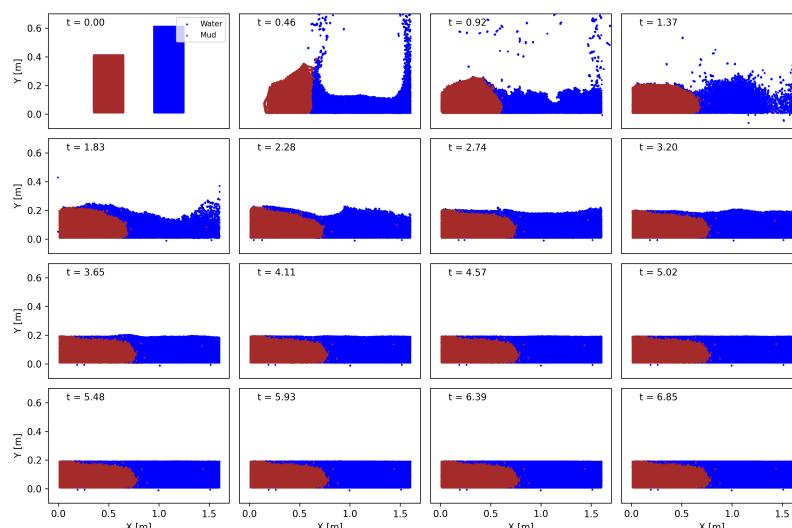


Figure 12: La figura ilustra la implementación de un modelo de fluido multifásico.

Listing 6: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 ! Including file for parameters and constants used
3 ! in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6     double precision pi
7     parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9     ! dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10    integer dim
11    parameter ( dim = 2 )

```

```

12      !      nmax      : Maximum number of particles
13      integer nmax
14      parameter ( nmax = 8066 )
15
16
17
18 !-----!
19 !      dominio de simulacion
20     double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21     parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.710000 )
22     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.250000 )
23     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 1.500000 )
24
25 !-----!
26 !      call neighboring_search
27 !          cns = 1, direct Search for neighbors
28 !          cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !          cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !          cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !          cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 !          for aparent viscosity
33     integer cns
34     parameter (cns = 3)
35
36 !      if cns = 4 you have to set the number of processors
37     integer np
38     parameter (np = 8)
39
40 !-----!
41     integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
42     parameter ( initime = 0, fintime = 2000000 ) !This refers to the
43             number of steps itself, not the time in seconds.
44     parameter ( inioutfile = 000)
45     character infile*80, infilev*80
46     parameter ( infile = 'snapshot_000' )
47     parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando
48             inicia con archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el
49             archivo inicial el que tiene todas las particulas
50
51
52 !-----!
53 !      Time step integration
54     double precision dt0, pdt0
55     parameter ( dt0 = 0.000005, pdt0 = 0.73 )
56
57 !-----!
58 !      To save steps
59     integer save_step
60     parameter ( save_step = 1000)
61
62
63 !-----!
64 !      Definition of the support domain
65 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
66     double precision h0, kappa0

```

```

61     parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.008d0 ) ! h0 = 0.01
62
63 ! -----
64 !     Smoothing kernel function
65 !     skf = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
66 !         = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
67 !         = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
68     integer skf
69     parameter(skf = 1)
70
71 ! -----
72 !     ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
73 !     conditions
74 !     The measurement must be in meters
75     double precision ht
76     parameter ( ht = 0.6d0)
77
78 ! -----
79 !     g = 9.82. Gravity
80     double precision g
81     parameter ( g = 9.82d0 )
82
83 ! -----
84 !     Artificial EOS.
85 !     Initial density of particles, rho0
86 !     rbeta es un parametro de regularizacion
87 !     double precision gamma, beta, rho0, rbeta
88 !     parameter ( gamma=7.0, beta = 5.0, rbeta = 0.000001, rho0 = 1000.0)
89 !     parameter ( gamma=7.0, beta = 2.23607, rbeta = 0.05, rho0 = 1000.0)
90
91 ! -----
92 !     viscous force
93     double precision mu, muc
94     parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
95 !     parameter ( mu=8.41, muc=1.)
96 !     parameter ( mu=800.41, muc=1.)
97
98 ! -----
99 !     mvisc = 1 constant viscosity
100 !     mvisc = 2 non-constant viscosity
101 !     nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
102 !     mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
103 !             Herschel-Bulkley
104 !     mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
105 !             el modelo de Herschel-Bulkley
106     integer mvisc, mvisk
107     double precision nn
108     parameter (mvisc = 2, nn = 1.5, mvisk = 1)
109
110 !     if mvisk = 2 you have to choose
111 !     phi_base, phi_surface
112     double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
113     parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity

```

```
111      = 2.5d0)
112 ! -----
113
114 !      source_mode = y: The code use the source mode
115 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
116 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
117 !      length = length of the line source of fluid
118 !      start_x = initial position of the source in x axe
119 !      start_z = initial position of the source in y axe
120 !
121 character source_mode
122 parameter (source_mode = 'n')
123 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle,
124     v_fuente0, d_horizontal
125 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
126 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle =
90.0d0)
126 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)
```

6.7 Ejemplo 7 (ej7)

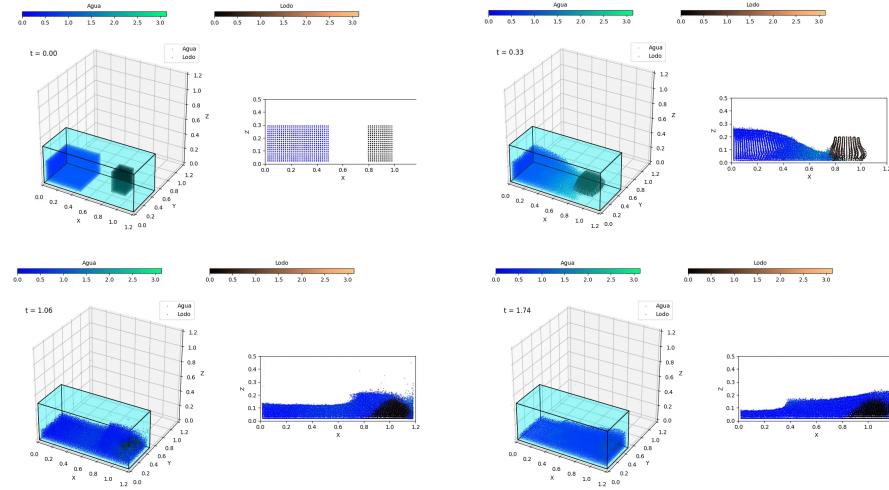


Figure 13: Instantáneas del flujo multifásico de rompimiento de presa de agua (azul) y lodo (café) simuladas mediante SPH con modelo de Herschel–Bulkley ($n = 1.5$). Para cada instante se presenta, a la izquierda, la vista en perspectiva 3D del dominio y, a la derecha, la proyección en el plano XZ en diferentes tiempos. Las barras de color superiores indican la magnitud de la velocidad en cada fase.

En la figura 13 muestra el rompimiento de presa de dos tipos de fluido agua en azul y lodo en café oscuro simulados en 3D. En la figura se aprecia que en $t = 0.00$ s, ambas fases aparecen claramente separadas, con el agua ocupando el extremo izquierdo y el lodo compacto a la derecha dentro de la caja. Al avanzar en $t = 0.33$ s, el agua fluye rápidamente formando un frente emergente, mientras que el lodo se mantiene más rígido y avanza con menor desplazamiento. Hacia $t = 1.06$ s, se aprecia una marcada estratificación: el agua crea una lámina delgada que fluye por encima del lecho, y el lodo conserva una columna más gruesa, lo cual es un reflejo del endurecimiento por esfuerzo del modelo H-B con $n = 1.5$. Finalmente, en $t = 1.74$ s, ambas fases desaceleran y la energía se disipa; el agua se asienta en una capa uniforme y el lodo se dispersa levemente, evidenciando la transición hacia un flujo más estable.

Listing 7: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 !       Including file for parameters and constants used
3 !       in the entire SPH software packages.
4 !
5
6 double precision pi
7 parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8

```

```
9      !      dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10     integer dim
11     parameter ( dim = 3)
12
13     !      nmax      : Maximum number of particles
14     integer nmax
15     parameter ( nmax = 62858 )
16
17     ! -----
18     !      Simulation domain
19     double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
20     parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 1.250000 )
21     parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.510000 )
22     parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.520000 )
23
24     ! -----
25     !      call neighboring_search
26     !          cns = 1, direct Search for neighbors
27     !          cns = 2, direct parallelized neighbor search
28     !          cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
29     !          cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for
30     !          neighbors
31     !          cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors,
32     !          measure radius for apparent viscosity
33     integer cns
34     parameter (cns = 3)
35
36     !      if cns = 4 you have to set the number of processors
37     integer np
38     parameter (np = 8)
39
40     ! -----
41     integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
42     parameter ( initime = 0, fintime = 60000 )
43     parameter ( inioutfile = 000)
44     character infile*80, infilev*80
45     parameter ( infile = 'snapshot_000' )
46     parameter ( infilev = 'snapshot_000' )
47
48     ! -----
49     !      Time step integration
50     double precision dt0, pdt0
51     parameter ( dt0 = 0.00005, pdt0 = 1.0 )
52
53     ! -----
54     !      To save steps
55     integer save_step
56     parameter ( save_step = 100)
```

```

56 ! -----
57 !      Definition of the support domain
58 double precision h0, kappa0
59 parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 )
60
61 ! -----
62 !      Smoothing kernel function
63 !      SKF = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan
64 !              1985)
65 !              = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
66 !              = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
67 integer SKF
68 parameter(SKF = 1)
69
70 ! -----
71 !      HT             Maximum high of the block
72 double precision HT
73 parameter ( HT = 0.3d0 )
74
75 ! -----
76 !      g = 9.82. Gravity
77 double precision g
78 parameter ( g = 9.82d0 )
79
80 ! -----
81 !      Pressure parameters
82 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
83 parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 =
84 !              1000.0 )
85
86 ! -----
87 !      viscous force
88 double precision mu, muc
89 parameter ( mu=1.002e-3, muc=300 )
90
91 ! -----
92 !      mvisc = 1 constant viscosity
93 !      mvisc = 2 non-constant viscosity
94 !      nn = rheological behavior index (índice de fluidos)
95 !      mvisk = 1 constant viscosity parameter K in Herschel
96 !              -Bulkley model
97 !      mvisk = 2 viscosity parameter K depends on height
98 integer mvisc, mvisk
99 double precision nn
100 parameter (mvisc = 2, nn = 1.5, mvisk = 1)

double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0,
           intrinsic_viscosity = 2.5d0)

```

```
101
102 ! -----
103 character source_mode
104 parameter (source_mode = 'n')
105 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z,
106     angle, v_fuente0, d_horizontal
107 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
108 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06,
109     angle = 90.0d0)
110 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)
```

6.8 Ejemplo 8 (ej8)

La figura 14 muestra el rompimiento de presa para un modelo de Herschel-Bulkley con parámetro de viscosidad variable (H-B-Kv). En este enfoque, las partículas ubicadas en la superficie superior tienen un valor de K reducido—es decir, menor viscosidad efectiva—y por tanto fluyen con más facilidad, mientras que las más profundas presentan un K mayor, endureciendo el lodo en la base y frenando el avance del frente. Como resultado, el frente de onda inicial se propaga lentamente, formando un estrato muy delgado de baja velocidad, y el perfil de velocidad a lo largo del eje X muestra claramente cómo la parte alta “resbala” con mayor rapidez sobre el lecho más viscoso. Esta heterogeneidad vertical, impuesta por el modelo de Krieger–Dougherty, reproduce la transición gradual de un colapso fluido a un asentamiento casi estático conforme la resistencia interna aumenta hacia el fondo.

Listing 8: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 !     Including file for parameters and constants used
3 !     in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6 double precision pi
7 parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10 integer dim
11 parameter ( dim = 3)
12
13 !     nmax      : Maximum number of particles
14 integer nmax
15 parameter ( nmax = 81321 )
16 !
17
18 ! -----
19 !     dominio de simulacion
20 double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21 parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 2.510000 )
22 parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.310000 )
23 parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 0.520000 )
24
25 ! -----
26 !     call neighboring_search
27 !             cns = 1, direct Search for neighbors
28 !             cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !             cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !             cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !             cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 !             for aparent viscosity
33 integer cns
34 parameter (cns = 5)
35
36 !     if cns = 4 you have to set the number of processors
37 integer np

```

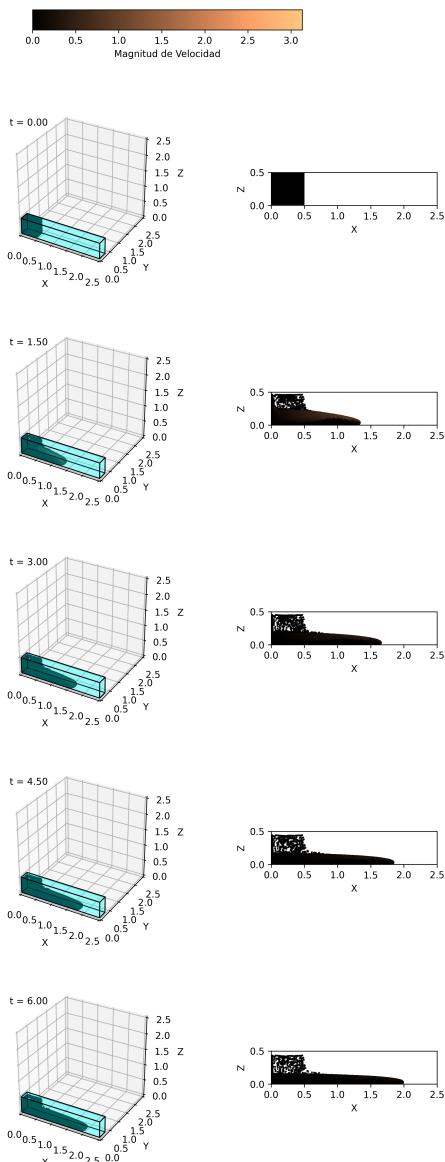


Figure 14: Instantáneas de la magnitud de velocidad para el flujo multifásico de agua (cenega azul) y lodo (tonos café) modelado con Herschel–Bulkley, donde la consistencia K varía exponencialmente con la altura de la partícula siguiendo el perfil de Krieger–Dougherty. Se muestran cinco tiempos, cada uno con la vista 3D (izquierda) y su proyección en el plano X–Z (derecha).

```

37 | parameter (np = 8)
38 |
39 | ! -----
40 | integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile

```

```

41 parameter ( initime = 0, fintime = 60000 ) !This refers to the number of
42 steps itself, not the time in seconds.
43 parameter ( inioutfile = 000)
44 character infile*80, infilev*80
45 parameter ( infile = 'snapshot_000' )
46 parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando inicia con
47      archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el archivo inicial
48      el que tiene todas las particulas
49
50 ! -----
51 !      Time step integration
52 double precision dt0, pdt0
53 parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 1.0 )
54
55 ! -----
56 !      To save steps
57 integer save_step
58 parameter ( save_step = 100 )
59
60 ! -----
61 !      Definition of the support domain
62 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
63 double precision h0, kappa0
64 parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 ) ! h0 = 0.01
65
66 ! -----
67 !      Smoothing kernel function
68 !      skf = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
69 !      = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
70 !      = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
71 integer skf
72 parameter (skf = 1 )
73
74 ! -----
75 !      ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
76 !      conditions
77 !      The measurement must be in meters
78 double precision ht
79 parameter ( ht = 0.5d0 )
80
81 ! -----
82 !      g = 9.82. Gravity
83 double precision g
84 parameter ( g = 9.82d0 )
85
86 ! -----
87 !      Presion parameters
88 !      Initial density of particles, rho0
89 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
90 parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 = 1950.0)
91 !      parameter ( gamma=7.0, beta = 3.16, rho0 = 1000.0)
92
93 ! -----

```

```

90 !      viscous force
91 double precision mu, muc
92 !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=500)
93 !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
94 parameter ( mu=8.41, muc=1.)
95 !      parameter ( mu=800.41, muc=1.)

96
97 !-----
98 !      mvisc = 1 constant viscosity
99 !      mvisc = 2 non-constant viscosity
100 !     nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
101 !     mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
102 !             Herschel-Bulkley
103 !             mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
104 !             el modelo de Herschel-Bulkley
105 integer mvisc, mvisk
106 !double precision nn
107 parameter (mvisc = 2, mvisk = 2)

108 !      if mvisk = 2 you have to choose
109 !          phi_base, phi_surface
110 double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
111 parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity = 2.5
112 !             d0)
113
114 !-----source_mode = y: The code use the source mode
115 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
116 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
117 !      length = length of the line source of fluid
118 !      start_x = initial position of the source in x axe
119 !      start_z = initial position of the source in y axe
120 !      angle = source angle
121 character source_mode
122 parameter (source_mode = 'n')
123 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle, v_fuente0,
124 !             d_horizontal
125 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
126 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle = 90.0d0)

127 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)

```

6.9 Ejemplo 9 (ej)

La figura 15 muestra que en las primeras etapas ($t = 0.00 - 0.40$ s) el volumen de lodo inicia su colapso impulsado por la gravedad, manteniendo una lámina relativamente uniforme al descender por la pendiente. Gracias al perfil de Krieger–Dougherty, las partículas cercanas a la superficie presentan menor viscosidad efectiva y, por tanto, deslizan con mayor facilidad sobre las capas inferiores más viscosas. Esto produce un frente de flujo más fino y rápido en la parte superior, mientras abajo el lodo retiene cierta cohesión.

Además, a medida que el flujo avanza ($t = 0.80 - 1.59$ s), se observa cómo la cabeza del colapso se alarga y adelgaza, generando un contorno cóncavo en la proyección XZ . El aumento gradual de K hacia el fondo frena el arrastre de las partículas más profundas, promoviendo una estratificación vertical del perfil de velocidades. Hacia el tiempo final, el flujo alcanza un régimen más estable y extiende una capa delgada de lodo sobre el lecho, reflejando la transición desde un colapso inicial dinámico hasta un deslizamiento controlado por la viscosidad variable.

Listing 9: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 !      Including file for parameters and constants used
3 !      in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6 double precision pi
7 parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !      dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10 integer dim
11 parameter ( dim = 3)
12
13 !      nmax      : Maximum number of particles
14 integer nmax
15 parameter ( nmax = 64135 )
16 !
17
18 ! -----
19 !      dominio de simulacion
20 double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21 parameter ( dxmin = -0.100000, dxmax = 2.5 )
22 parameter ( dymin = -0.100000, dymax = 0.310000 )
23 parameter ( dzmin = -0.100000, dzmax = 2.1 )
24
25 ! -----
26 !      call neighboring_search
27 !          cns = 1, direct Search for neighbors
28 !          cns = 2, direct parallelized neighbor search
29 !          cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
30 !          cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
31 !          cns = 5, Grid Hashing Search for neighbors, meausre raidus
32 !          for aparent viscosity
32 integer cns

```

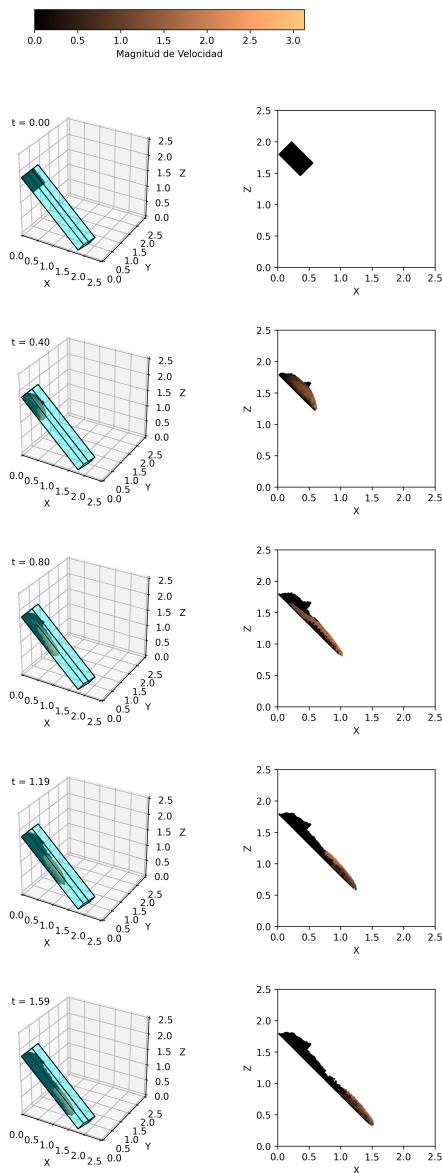


Figure 15: Instantáneas del rompimiento de presa sobre una pendiente modelado por SPH con el enfoque Herschel-Bulkley y consistencia K variable según altura (perfil de Krieger-Dougherty). Se muestran cinco tiempos, con vista 3D a la izquierda y proyección en el plano XZ a la derecha. La barra de color superior indica la magnitud de la velocidad.

```

33 parameter (cns = 5)
34 !      if cns = 4 you have to set the number of processors
35 integer np
36 parameter (np = 8)

```

```

38 ! -----
39 integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
40 parameter ( initime = 0, fintime = 32000 ) !This refers to the number of
41      steps itself, not the time in seconds.
42 parameter ( inioutfile = 000)
43 character infile*80, infilev*80
44 parameter ( infile = 'snapshot_000' )
45 parameter ( infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando inicia con
46      archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el archivo inicial
47      el que tiene todas las particulas
48 ! -----
49 !      Time step integration
50 double precision dt0, pdt0
51 parameter ( dt0 = 0.0001, pdt0 = 1.0 )
52 ! -----
53 !      To save steps
54 integer save_step
55 parameter ( save_step = 100 )
56 ! -----
57 !      Definition of the support domain
58 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
59 double precision h0, kappa0
60 parameter ( kappa0 = 2.0d0, h0 = 0.015d0 ) ! h0 = 0.01
61 ! -----
62 !      Smoothing kernel function
63 !      SKF = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
64 !      = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
65 !      = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
66 integer SKF
67 parameter (SKF = 1 )
68 ! -----
69 !      ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
70      conditions
71 !      The measurement must be in meters
72 double precision ht
73 parameter ( ht = 0.3d0 )
74 ! -----
75 !      g = 9.82. Gravity
76 double precision g
77 parameter ( g = 9.82d0 )
78 ! -----
79 !      Presion parameters
80 !      Initial density of particles, rho0
81 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
82 parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 = 1950.0 )
83 ! -----
84 !      Presion parameters
85 !      Initial density of particles, rho0
86 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
87 parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 = 1950.0 )

```

```

87 !      parameter ( gamma=7.0, beta = 3.16, rho0 = 1000.0)
88 !
89 ! -----
90 !      viscous force
91 double precision mu, muc
92 !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=500)
93 !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=300)
94 parameter ( mu=4.02, muc=1.)
95 !      parameter ( mu=84.1, muc=1.)
96
97
98 ! -----
99 !      mvisc = 1 constant viscosity
100 !      mvisc = 2 non-constant viscosity use the Herschel-Bulkley model
101 !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
102 !      mvisk = 1 indica parametro de viscosidad K constante en el modelo de
Herschel-Bulkley
103 !      mvisk = 2 indica parametro de viscosidad K depende de la altura en
el modelo de Herschel-Bulkley
104 integer mvisc, mvisk
105 parameter (mvisc = 2, mvisk = 2)
106
107 !      if mvisk = 2 you have to choose
108 !      phi_base, phi_surface
109 double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
110 parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity = 2.5
d0)
111
112 ! -----
113
114 !      source_mode = y: The code use the source mode
115 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
116 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
117 !      length = length of the line source of fluid
118 !      start_x = initial position of the source in x axe
119 !      start_z = initial position of the source in y axe
120 !      angle = source angle
121 character source_mode
122 parameter (source_mode = 'n')
123 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle, v_fuente0,
d_horizontal
124 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
125 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle = 90.0d0)
126 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)

```

6.10 Ejemplo 10 (ej10)

En esta simulación (ver Figura 16) se empleó un mallado derivado de elevaciones para reproducir fielmente las pendientes y el canal de flujo de la quebrada. El lodo, modelado con índice reológico $n > 1$ y viscosidad plástica de Herschel–Bulkley, inicia su ruptura al pie de la ladera y avanza formando un frente compacto que sigue el relieve natural. Conforme transcurren los primeros segundos, el frente acelera en tramos descendentes y desacelera al enfrentar cuellos y zonas de menor pendiente, tal como evidencian en la gráfica donde hay zonas de color marrón claro que representan mayor velocidad.

Hacia los instantes intermedios y finales (32.75 s, 65.55 s, 81.05 s y 95.20 s), el flujo muestra estratificación vertical y disipación de energía en zonas de rebaje topográfico, mientras que las velocidades máximas se atenúan al depositarse el material. El comportamiento obtenido, adelgazamiento del frente, formación de colas remanentes y acumulación en zonas más planas, concuerda con el comportamiento normal de un deslizamiento, validando la capacidad del esquema SPH con Herschel–Bulkley para capturar la dinámica de deslizamientos en relieve real.

Listing 10: Archivo de parámetros y constantes del código SPH

```

1 ! -----
2 !     Including file for parameters and constants used
3 !     in the entire SPH software packages.
4 ! -----
5
6 double precision pi
7 parameter ( pi = 3.14159265358979323846 )
8
9 !     dim : Dimension of the problem (1, 2 or 3)
10 integer dim
11 parameter ( dim = 3 )
12
13 !     nmax      : Maximum number of particles
14 integer nmax
15 parameter ( nmax = 1408153 )
16 !
17
18 ! -----
19 !     dominio de simulacion
20 double precision dxmin, dxmax, dymin, dymax, dzmin, dzmax
21 parameter ( dxmin = 160, dxmax = 1155 )
22 parameter ( dymin = 910, dymax = 2343 )
23 parameter ( dzmin = 1550, dzmax = 2125 )
24
25
26 ! -----
27 !     call neighboring_search
28 !             cns = 1, direct Search for neighbors
29 !             cns = 2, direct parallelized neighbor search
30 !             cns = 3, Grid Hashing Search for neighbors
31 !             cns = 4, Grid Hashing parallelized Search for neighbors
32 integer cns

```

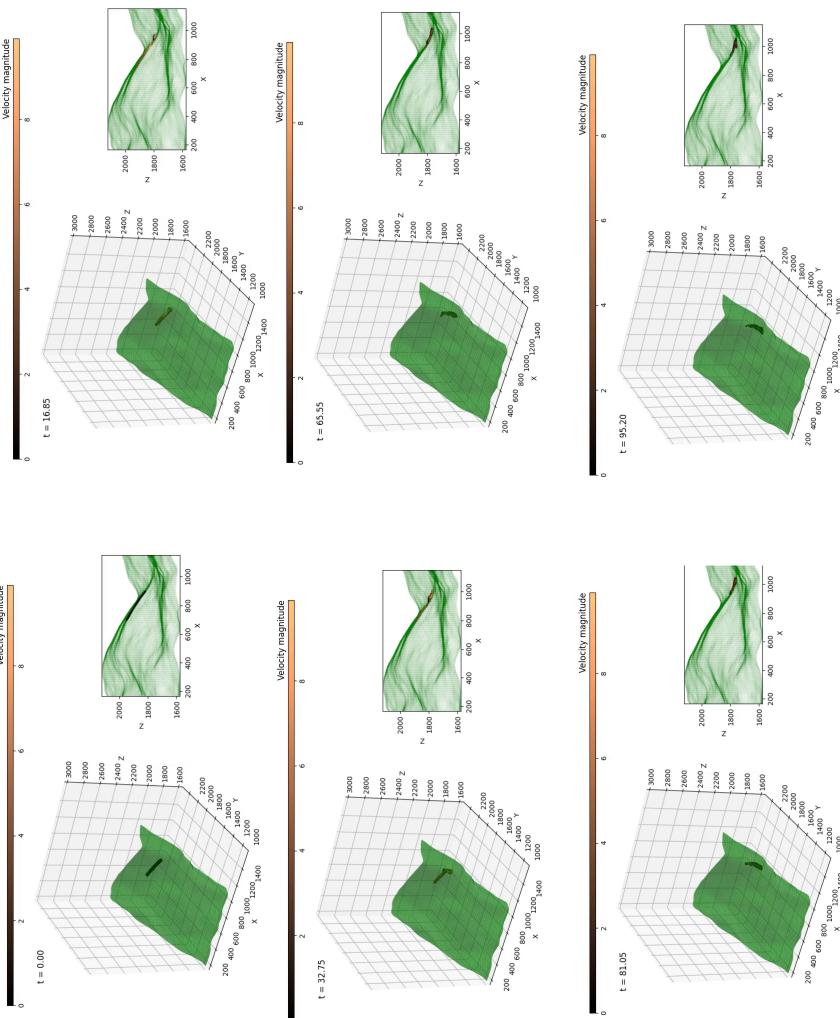


Figure 16: Instantáneas de la simulación del deslizamiento real ocurrido en Monopamba, Puerres (Nariño, Colombia), implementando el modelo reológico de Herschel-Bulkley sobre la topografía real de la cuenca. Se muestran seis tiempos representativos (de 0 s a 95.2 s), combinando, en cada par de subfiguras, la vista 3D del terreno (izquierda) con la proyección en el plano X-Z (derecha). La barra de color superior indica la magnitud de la velocidad del material.

```

33 parameter (cns = 3)
34 !      if cns = 4 you have to set the number of processors
35 integer np
36 parameter (np = 8)
37 !
38 !-----
39 integer maxtimestep, initime, fintime, inioutfile
40 parameter (initime = 0, fintime = 480000) !This refers to the number of
41 !      steps itself, not the time in seconds.
42 parameter (inioutfile = 000)
43 character infile*80, infilev*80
44 parameter (infile = 'snapshot_000' )
45 parameter (infilev = 'snapshot_000' ) ! carga el archivo cuando inicia con
46 !      archivos sin particulas de frontera (Siempre carga el archivo inicial
47 !      el que tiene todas las particulas
48 !
49 !-----Time step integration
50 double precision dt0, pdt0
51 parameter (dt0 = 0.0005, pdt0 = 1.0 )
52 !
53 !-----To save steps
54 integer save_step
55 parameter (save_step = 100)
56 !
57 !-----Definition of the support domain
58 !      h0 is taken from the space of particles in the initial conditions
59 double precision h0, kappa0
60 parameter (kappa0 = 2.0d0, h0 = 2.0d0) ! h0 = 0.01
61 !
62 !-----Smoothing kernel function
63 !      skf = 1, cubic spline kernel by W4 - Spline (Monaghan 1985)
64 !      = 2, Gauss kernel (Gingold and Monaghan 1981)
65 !      = 3, Quintic kernel (Morris 1997)
66 integer skf
67 parameter (skf = 1)
68 !
69 !-----ht           Maximum high of the block, it is equal to the initial
70 !      conditions
71 !      The measurement must be in meters
72 double precision ht
73 parameter (ht = 5.0d0)
74 !
75 !-----g           Gravity
76 double precision g
77 parameter (g = 9.82d0 )
78
79
80
81

```

```

82 ! -----
83 !      Presion parameters
84 !      Initial density of particles, rho0
85 double precision gamma, beta, rho0, rbeta
86 !      parameter ( gamma=7.0, beta = 3.16, rho0 = 1000.0)
87 parameter ( gamma=7.0, beta = 1.0, rbeta = 1, rho0 = 1000.0)
88
89 ! -----
90 !      viscous force
91 double precision mu, muc
92 !      parameter ( mu=1.002e-3, muc=500.)
93 !      parameter ( mu=8.41, muc=1.)
94 parameter ( mu=800.41, muc=1.)
95
96
97 ! -----
98 !      mvisc = 1 constant viscosity
99 !      mvisc = 2 non-constant viscosity
100 !      nn = indice de comportamiento reologico o indice de fluidez.
101 integer mvisc, mvisk
102 double precision nn
103 parameter (mvisc = 2, mvisk = 1)
104
105 !      if mvisk = 2 you have to choose
106 !      phi_base, phi_surface
107 double precision phi_base, phi_surface, intrinsic_viscosity
108 parameter( phi_base = 0.8d0, phi_surface = 0.5d0, intrinsic_viscosity = 2.5
109 d0)
110
111 ! -----
112 !      source_mode = y: The code use the source mode
113 !      mu_new = viscosity of soruce mode fluid
114 !      QQ = flow rate value [m^2 / s]
115 !      length = length of the line source of fluid
116 !      start_x = initial position of the source in x axe
117 !      start_z = initial position of the source in y axe
118 !      angle = source angle
119 character source_mode
120 parameter (source_mode = 'n')
121 double precision QQ, mu_new, start_x, start_y, start_z, angle, v_fuente0,
122 d_horizontal
123 parameter (QQ = 0.01d0, mu_new = 1.002e-3)
124 parameter (start_x = -2.02, start_y = 0.1, start_z = -0.06, angle = 90.0d0)
125
126 parameter (v_fuente0 = 0.7d0, d_horizontal = 0.17d0)

```

7 Contacto y Soporte

Para más información, contactar a: diegovalencia5@gmail.com.

Referencias

- Carrillo, E., Contreras, N., Sánchez, F., Alpala, J., Pulgarín, B., Medina, E., Reyes, A., Gamboa, C., Muñoz, C., Galarza, J., Laverde, C., & Agudelo, A. 2023, Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas (SGC)
- Enríquez, J. E. I. 2012, Revista Unimar, 30
- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. 1977, Monthly notices of the royal astronomical society, 181, 375
- Lobovský, L., Botia-Vera, E., Castellana, F., Mas-Soler, J., & Souto-Iglesias, A. 2014, Journal of Fluids and Structures, 48, 407
- Lucy, L. B. 1977, AJ, 82, 1013
- Murcia, H. F., & Macías, J. L. 2009, Revista mexicana de ciencias geológicas, 26, 1
- Santamaría, J. E. V., Vélez, M. I. G., & Hincapié, H. D. M. 2018, Revista de derecho, 145
- Scott, K. M., Vallance, J. W., Kerle, N., Luis Macías, J., Strauch, W., & Devoli, G. 2005, Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 30, 59
- Suárez, J. 2009, Colombia: Editorial Universidad Industrial de Santander
- Ye, T., Pan, D., Huang, C., & Liu, M. 2019, Physics of Fluids, 31, 011301

Elaborado por:



Diego Valencia Enríquez

Fecha de actualización: 30 de Abril de 2025

Documento creado en LaTex mediante la plataforma Overleaf. LaTeX es un sistema de composición de documentos que se utiliza principalmente para la creación de documentos científicos y técnicos, como artículos académicos, libros, informes y presentaciones. Utiliza un lenguaje de marcado para estructurar y formatear el texto, lo que permite a los usuarios concentrarse en el contenido del documento sin preocuparse por el diseño visual. LaTeX es especialmente popular en la comunidad académica debido a su capacidad para producir documentos con una apariencia profesional y su soporte para la escritura matemática compleja y la generación automática de referencias bibliográficas.