



# Universidad de Navarra

MÁSTER UNIVERSITARIO EN PROFESORADO

*Especialidad Ciencias experimentales*

Facultad de Educación y Psicología

**MOVIMIENTO DE UN INTRUSO DENTRO  
DE UN MEDIO GRANULAR DENSO:  
*Una propuesta didáctica para Bachillerato  
Internacional***

Alumno: **Mario Adrián Chasco Frauca**

Director: **Dr. Raúl Cruz Hidalgo**

Co-director: **MSc. Alexander Martínez Concepción**

*Pamplona, 14 de junio de 2021*



## ***Abstract***

*This project consists of the analysis of the dynamics of a projectile in a dense granular medium for its implementation in an International Baccalaureate (IB) context.*

*The starting point of the project is data obtained through software simulation, which gives information about the movement of a spherical body in a dense granular medium along the direction of gravity. It is provided by the Department of Physics and Applied Mathematics of the University of Navarra.*

*In this master's thesis, these data are analysed for the case of zero gravity and a critical study is conducted, which is based on the equation of motion that defines the dynamics of the projectile in the given medium. We develop the code that best defines the behaviour of a projectile along the granular medium, which is validated by the data provided.*

*In parallel with that, a didactic proposal is developed through the Group 4 Project focusing exclusively on the discipline of Physics, where students can analyse these data using the code to reach pertinent conclusions.*

*This type of project is ideal for students to become aware of the way in which professional scientists work and communicate with each other on an international level.*

**Keywords:** drag, impact, granular medium, International Baccalaureate, Group 4 Project



## **Resumen**

*Este proyecto consiste en el análisis de la dinámica de un proyectil en un medio granular denso para su puesta en práctica en un contexto de Bachillerato Internacional (BI).*

*El punto de partida del proyecto son unos datos que se obtienen mediante simulación software facilitados por el Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra y que otorgan información sobre el movimiento de un cuerpo esférico en un medio granular denso a lo largo de la dirección de la gravedad.*

*En este Trabajo Final de Máster se analizan estos datos para el caso de gravedad cero y se lleva a cabo un estudio crítico apoyándonos en la ecuación de movimiento que define la dinámica del proyectil en el medio dado. También se desarrolla el código que mejor defina el comportamiento de un proyectil a lo largo del medio granular, el cual se valida con los datos proporcionados.*

*Al mismo tiempo, se va a desarrollar una propuesta didáctica a través del Proyecto del Grupo 4 enfocándonos exclusivamente en la disciplina de la Física, en donde el alumnado es capaz de analizar esos datos haciendo uso del código para llegar a unas conclusiones pertinentes.*

*Este tipo de proyectos es idóneo para que los alumnos tomen conciencia de la forma en que los científicos profesionales trabajan y se comunican entre ellos a nivel internacional.*

**Palabras clave:** arrastre, impacto, medio granular, Bachillerato Internacional, Proyecto del Grupo 4



## ÍNDICE

CAPÍTULO 1. Introducción .....	11
1.1    Ámbito del proyecto .....	11
1.1.1    Objetivo .....	11
1.1.2    Metodología .....	12
CAPÍTULO 2. Fundamentos teóricos .....	13
2.1    Impacto en un medio granular .....	13
2.1.1    Introducción .....	13
2.2    Fuerza de arrastre.....	16
2.3    Configuración del experimento .....	17
2.4    Dinámica del intruso: fuerza de arrastre dada en un medio granular (arena).....	18
2.4.1    Medidas de posición.....	19
2.4.2    Medidas directas de aceleración.....	23
2.4.3    Efecto Janssen .....	26
CAPÍTULO 3. Análisis de datos .....	31
3.1    Desarrollo del código.....	31
3.2    Interpretación del resultado del código .....	35
3.3    Análisis de la curva exponencial .....	35
3.4    Utilidad didáctica del código.....	38
CAPÍTULO 4. Propuesta didáctica de una actividad experimental en un contexto IB.....	39
4.1    Introducción.....	39
4.2    ¿Qué es el Bachillerato Internacional? .....	39
4.3    Organización del IB .....	40
4.4    El modelo del Programa Diploma en el IB.....	41
4.4.1    Perfil de la comunidad de aprendizaje del IB .....	44
4.5    Naturaleza de la ciencia.....	46
4.6    Naturaleza de la física.....	47
4.6.1    Enfoques de enseñanza.....	48
4.6.2    Las ciencias y la dimensión internacional.....	49
4.7    La evaluación en el Programa del Diploma.....	50
4.7.1    Introducción .....	50

4.7.2	Evaluación externa .....	51
4.7.3	Evaluación interna.....	51
4.7.4	Empleo del criterio de evaluación para la evaluación interna de física .....	53
4.8	Metodología.....	55
4.9	El esquema práctico de trabajo (PSOW) .....	57
4.9.1	Distribución temporal.....	57
4.9.2	Alcance del programa de estudios.....	58
4.9.3	Planificación del PSOW .....	58
4.9.4	Tipos de experimentos .....	59
4.9.5	Evaluación.....	59
4.9.6	Proyecto Grupo 4 .....	60
4.9.7	Etapas del Proyecto Grupo 4.....	62
4.10	Plan de estudios en los experimentos requeridos de Física .....	64
4.11	Aplicación del Proyecto Grupo 4 .....	65
4.11.1	Física .....	67
4.11.2	Distribución del tiempo.....	68
4.11.3	Evaluación Proyecto Grupo 4 .....	69
4.11.4	Justificación del tema propuesto .....	69
CONCLUSIONES .....		71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		73
ANEXOS .....		75
Anexo 1: Planificación Proyecto Grupo 4 .....		75
Anexo 2: Evaluación Proyecto Grupo 4 .....		77
Anexo 3: Propuesta experimental .....		79
Anexo 4: Preguntas y respuestas sobre el Proyecto del Grupo 4.....		81
Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB) .....		85
Anexo 6: Código ploteo curvas datos experimentales y simulados (PYTHON).....		87



*“When inquiry is suppressed by previous knowledge, or by the authority and experience of another, then learning becomes mere imitation, and imitation causes a human being to repeat what is learned without experiencing it.”*

**Jiddu Krishnamurti**



## CAPÍTULO 1. Introducción

### 1.1 *Ámbito del proyecto*

El presente proyecto surge por parte del **Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra**. La labor investigadora de este departamento se centra en aspectos básicos y, además, se trabaja teniendo presente en todo momento la conexión que pudieran existir con aplicaciones industriales para así poder transmitir los resultados, cuando fuese posible, hacia el sector productivo. Por lo tanto, se podría decir que se basa en un departamento guiado por la investigación aplicada. Por otro lado, este departamento registra los siguientes grupos de investigación.

- Física Médica y Biofísica (PHYSMED).
- Laboratorio de Medios Granulares (GMG).
- Topología y lógica FUZZY (TOPYLF).

El proyecto se desarrollará en base a las líneas de investigación perseguidas en el **Laboratorio de Medios Granulares (GMG)**.

#### 1.1.1 *Objetivo*

Se va a entender y documentar un modelo sencillo y simplificado mediante el cual será posible la simulación de la respuesta dinámica de un proyectil en un medio granular dado. Para ello, se considerará el caso más sencillo con gravedad cero.

Se van a analizar una serie de datos obtenidos mediante simulación software a través de un modelo sencillo y simplificado mediante el cual será posible entender las leyes de la física que expliquen el comportamiento dinámico de un objeto que impacta en un medio granular a diferentes velocidades iniciales. Por lo tanto, se desarrollará un modelo relativamente sencillo de coste computacional bajo, el cual podrá ser usado como herramienta de análisis de cualquier tipo de datos ubicados en este mismo contexto.

Finalmente, se pretende poner en práctica todo lo anterior a través de la ejecución de un Proyecto del Grupo 4 relacionado con el análisis de datos sobre el impacto de un proyectil en un medio granular dado, de tal manera que el estudiante usará el código desarrollado en su investigación grupal.

### 1.1.2 Metodología

El modelo se realizará en las plataformas software MATLAB y PYTHON.

Se empleará la ecuación de movimiento traslacional para poder cuantificar el movimiento del proyectil en el medio granular dado y según la dirección de la gravedad.

Se partirá de los datos obtenidos mediante simulación software de acorde al artículo (Huang et al., 2020), y que han sido proporcionado por el Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra; por lo tanto, no son datos obtenidos experimentalmente.

Una vez escrito el código, se ejecutará la validación del mismo mediante una comparación del resultado ofrecido por dicha herramienta con los datos facilitados al principio.

Una vez validado el código, podrá ser utilizado como herramienta por cualquier docente a la hora de generar nuevos datos que simulen el movimiento de un proyectil en un medio granular con gravedad cero o por el propio alumno en su proyecto de investigación futura en el aula.

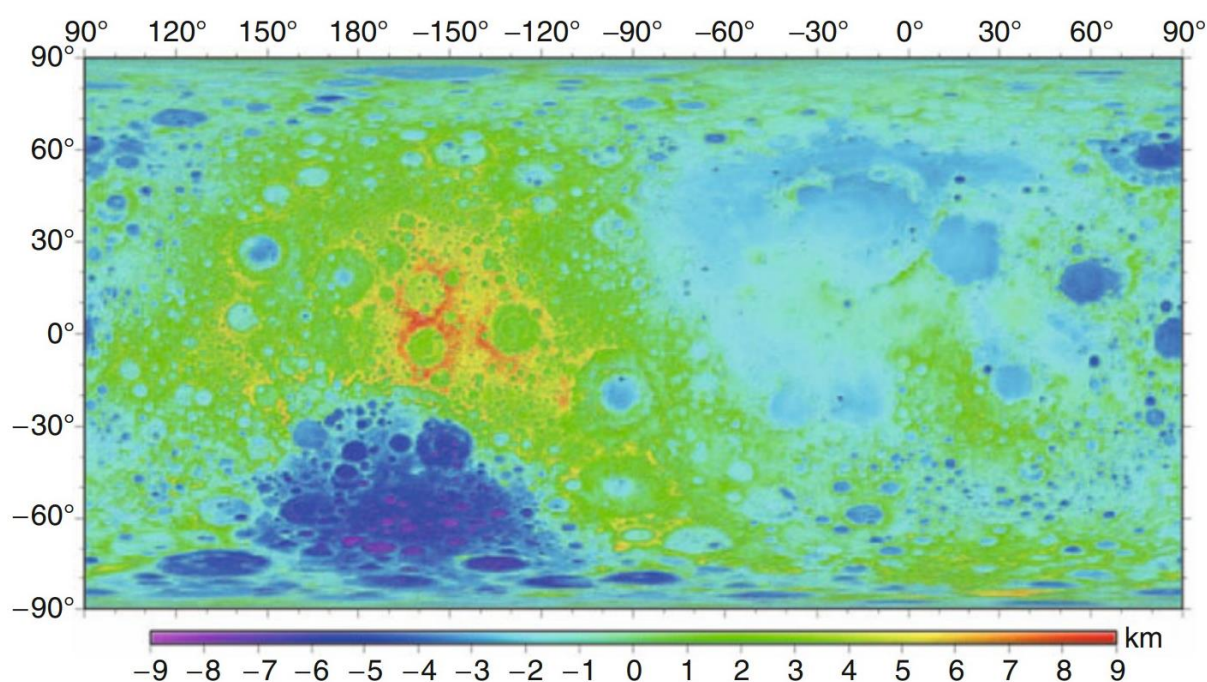
Este código y los datos obtenidos mediante simulación software según (Huang et al., 2020) es el punto de partida que se considera para desarrollar la propuesta didáctica en el contexto del Bachillerato Internacional (Proyecto del Grupo 4; véase el punto **4.9 El esquema práctico de trabajo (PSOW)** y, en concreto, el apartado **4.9.6 Proyecto Grupo 4**), específicamente en la disciplina de la Física. Al mismo tiempo, deberá también ser capaz de estudiar dichos datos apoyándose mediante la simulación de un experimento casero en el laboratorio de impactos de meteoritos. El objetivo final sería estudiar la tendencia exponencial que siguen los datos y explicar su pendiente en función de las diferentes velocidades iniciales con la que se lanza el proyectil al medio granular.

## CAPÍTULO 2. Fundamentos teóricos

### 2.1 Impacto en un medio granular

#### 2.1.1 Introducción

Desde que Galileo Galilei observó que la superficie lunar era irregular y rugosa, numerosos estudios se han enfocado en comprender la razón de todo ello. En la actualidad, tenemos acceso a una estructura detallada del terreno de la superficie de la luna, tal y como puede verse reflejado en la **Ilustración 1**. Una gran cantidad de estructuras circulares denominados cráteres aparecen a lo largo de casi toda la superficie lunar; estos cráteres son el resultado de impactos de objetos astronómicos en el único satélite de la Tierra (H. Katsuragi, 2016).



#### Ilustración 1

*Mapa de elevación de la superficie lunar basado en los datos de SELENE (Kaguya). Los cráteres presentes en la imagen se reflejan como hoyos circulares en donde se consideran restos de los impactos (H. Katsuragi, 2016).*

El impacto de un cuerpo en un medio granular sólido es un fenómeno muy ubicuo en la naturaleza puesto que puede darse en rangos que va desde el impacto de una gota de lluvia en la arena hasta el de un gran asteroide en un planeta. De hecho, este tipo de impactos son relevantes en la **agricultura** y en la **industria** (por ejemplo, *wet granulation* o granulación húmeda, proceso básico en la producción de muchos productos farmacéuticos). A pesar de la evidente relevancia de dichos impactos, el estudio de los mecanismos físicos que hay detrás de cada uno de ellos es relativamente joven (H. Katsuragi, 2016).

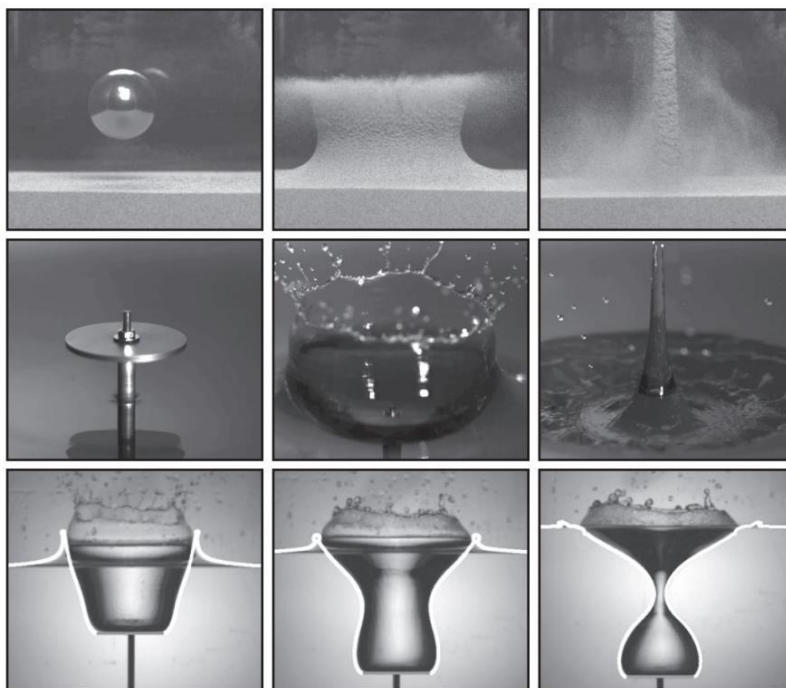
Los materiales granulares se pueden comportar como sólidos, líquidos o gaseosos. Además, estos materiales son colecciones de granos sólidos macroscópicos y discretos de tal manera que

tienen un tamaño lo suficientemente grande para que el **movimiento Browniano** sea irrelevante (H. Katsuragi, 2016).

Antes del impacto, el medio granular está típicamente en estado sólido y solo adquiere un estado de fluidez como consecuencia del impacto dado. Tras el impacto, el cuerpo comienza a interactuar con el medio granular experimentando una fuerza de arrastre. Esto es el principio básico para la formación de cráteres o la creación en un instante de tiempo muy corto de una cavidad transitoria que, cuando colapsa, parece un chorro desde la superficie de la arena (H. Katsuragi, 2016).

A diferencia de lo que sucede durante el impacto en un líquido, el cuerpo impactante necesita superar un **umbral de tensión o esfuerzo** para poder penetrar en el medio granular, donde la magnitud de dicho umbral depende del **empaquetamiento** del material que conforma el medio granular dado. Además, los materiales granulares disipan de forma efectiva la energía que reciben del cuerpo impactante y es diferente a como ocurre a la disipación viscosa dada en un líquido ordinario. Sin embargo, en las últimas décadas de investigación, se ha dejado más claro que durante y después del impacto en la arena, los fenómenos dados son muy similares a aquellos dados en un líquido (Thoroddsen & Shen, 2001).

La **Ilustración 2** compara el impacto de una esfera de acero en un medio granular compuesto por arena poco empaquetada con el impacto de un disco en el agua. De izquierda a derecha el tiempo aumenta, y se puede observar el objeto justo antes del impacto, la *salpicadura* originada por el propio impacto y, finalmente, el chorro de material proveniente del medio granular o el agua. Evidentemente, los sucesos que se pueden observar tanto con la arena como el agua es que ocurren hechos muy similares. Sin embargo, en el líquido, se puede ver qué sucede en el sustrato: en el momento del impacto, se crea una cavidad en expansión según la estela originada por el cuerpo impactante el cual, posteriormente, colapsará debido a la presión hidrostática en el líquido. Dicho colapso produce un  *cuello de botella* en un único punto a lo largo del eje de simetría en donde, a partir de este punto, se crean dos chorros: uno disparado hacia arriba y otro hacia abajo (Van Der Meer, 2017).



**Ilustración 2**

*(Fila superior) Impacto de una esfera de acero en un medio granular compuesto de arena fina poco empaquetada en comparación con (fila intermedia) el impacto de un disco en el agua. El tiempo aumenta de izquierda a derecha, y podemos observar el objeto justo antes del impacto, durante el momento puntual del impacto y el "chorro" de material del medio granular o el agua que se forma el instante después del impacto. (Fila inferior) Formación de la cavidad y colapso de la misma a través del "cuello de botella" en un líquido (Van Der Meer, 2017).*

Generalmente, cuando se forma un chorro durante el impacto, el proceso finaliza mediante una erupción granular en el momento final de la secuencia de impacto. Esto está asociado con la superficie de una burbuja de aire que queda atrapada durante el pellizco o *cuello de botella* y, posteriormente, se eleva lentamente a través del medio granular tras la aparición del chorro. Finalmente, un cráter de impacto se suele formar como remanente del suceso mucho tiempo después de que el impacto haya tenido lugar. Esto es lo que se puede observar a gran escala en los impactos de asteroides que han dejado evidencia a lo largo del todo sistema solar, por ejemplo, cráteres en la luna o el planeta Marte (Van Der Meer, 2017).

Los cráteres que se forman en la Tierra y en la Luna son similares a los cráteres que se forman en el laboratorio con energías mucho menores mediante el uso de proyectiles o intrusos y explosivos. En los experimentos de laboratorio a grandes niveles energéticos, *chorros* estrechos se han observado que han alcanzado una altura superior a la altura inicial del proyectil. Experimentos recientes han podido comprobar cómo la forma, profundidad y anchura de los cráteres que se forman en un medio granular depende de la energía del proyectil que va a impactar, aunque hay muy poco conocimiento sobre la dinámica del proyectil durante la formación del cráter (Ciamarra et al., 2004).



Llegados a este punto, solo nos queda plantearnos como punto de partida en esta investigación ¿qué leyes gobiernan la penetración de un objeto en un medio granular dado? ¿Cuál es el papel de la fracción de empaquetamiento de ese medio granular? Por lo tanto, todo esto es fundamental para, por ejemplo, poder conocer la historia del sistema solar.

El impacto en medios granulares ha sido un campo de estudio reciente en donde los experimentos llevados a cabo han permitido revelar qué sucede en una colisión entre un proyectil sólido y un medio granular dado. Por ejemplo, se ha podido desarrollar una forma fenomenológica de la fuerza de arrastre granular en base a resultados experimentales.

## 2.2 Fuerza de arrastre

Cuando una bola de acero es lanzada en una piscina de agua, ésta continuará hundiéndose con una velocidad terminal. Pero si la misma bola es lanzada en una caja de arena, normalmente se parará casi al instante y en la vecindad de la superficie. ¿Cómo podemos clasificar estos dos casos en términos de la física? Para responder a esta pregunta, el impacto de la **fuerza de arrastre** debe de ser un factor clave. Durante el impacto de un intruso sobre una superficie, éste sentirá una fuerza de resistencia repentina debido a una diferencia de densidades (H. Katsuragi, 2016); esta diferencia de densidades causará la fuerza de arrastre.

Sentimos la fuerza de arrastre cuando caminamos, cuando vamos a correr o conduciendo un vehículo. De hecho, podemos sentir esta fuerza de arrastre en cada pisada que damos cuando caminamos sobre la arena de una playa. El punto clave aquí es poder conocer hasta qué punto las leyes de la fuerza de arrastre, que se utilizan para los fluidos newtonianos, pueden ser empleadas en materiales granulares (por ejemplo, arena, polvo o granos) (Huang et al., 2020). En base a investigaciones experimentales y numéricas, una ley empírica basada en el **modelo de arrastre de Poncelet** es empleada comúnmente para describir la **curva de penetración** de un proyectil. Dicho modelo incluye un término *hidrostático* dependiente de la profundidad de penetración  $z$  y un término de arrastre  $\propto v^2$  con  $v$  la velocidad instantánea del proyectil con respecto al medio granular (Huang et al., 2020).

Desde la perspectiva de las aplicaciones, las partículas de polipropileno expandido (EPP) o poliestireno expandido (EPS), ambas son muy usadas en la construcción, empaquetamiento de productos, materiales en crudo para formas de molde..., debido a su ligereza y rigidez junto con sus propiedades térmicas de aislamiento tan buenas. Por lo tanto, esto hace que seamos más conscientes de la necesidad de un mejor entendimiento del arrastre granular y, en concreto, los mecanismos físicos que hay detrás de las leyes empíricas (Huang et al., 2020).

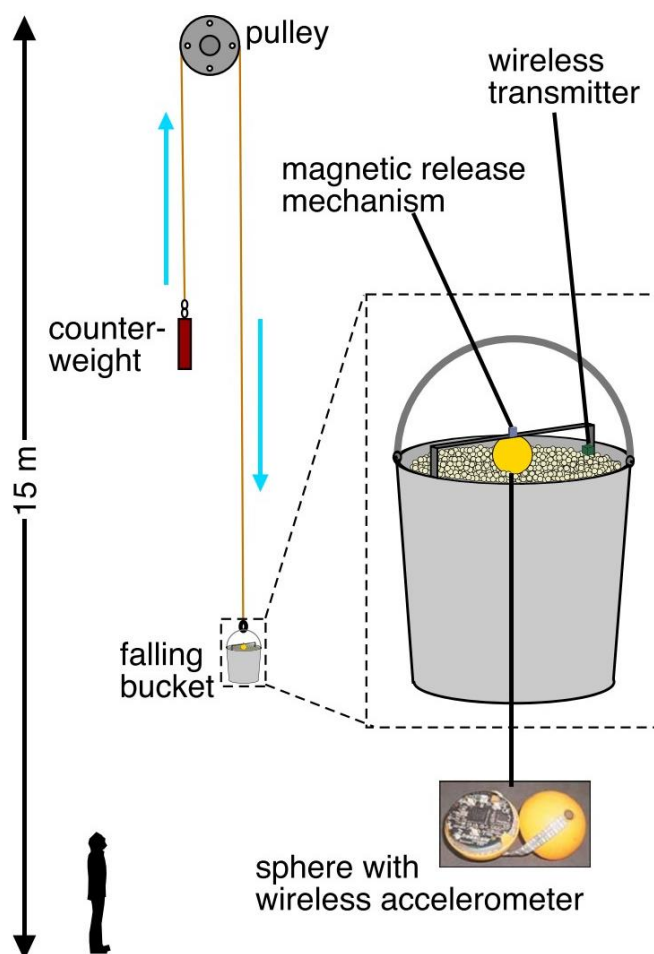


### 2.3 Configuración del experimento

El experimento que vamos a simular es el que se puede apreciar en la **Ilustración 3**. Lo que se puede apreciar ahí es un sistema que simula un cubo, el cual se va a llenar de partículas para simular el medio granular deseado. El sistema de poleas que se puede apreciar sirve para simular diferentes gravedades, incluido el caso de gravedad cero (nuestro caso).

Además, tal y como se explica en la **Ilustración 7**, se emplea un sistema de antenas emisoras que emiten constantemente señales de radiofrecuencia y que son captadas por otras antenas receptoras; lo interesante aquí es que estas señales de radiofrecuencia son invisibles para el medio granular y opacos para la bola donde se aloja el acelerómetro. Por lo tanto, este sistema permite tener localizada la posición del intruso con mucha facilidad y precisión, es decir, es posible conocer la cinemática de la bola en cada instante de tiempo.

Conociendo los valores de posición de la bola es posible integrarlos para conocer la velocidad y, integrando una vez más, es posible obtener los valores de aceleración de esta.



#### Ilustración 3

*Experimento que estamos simulando en nuestro caso. Vemos en su parte superior un muelle que tiene en su interior el acelerómetro que nos va a dar los datos (Altshuler et al., 2014).*

## 2.4 *Dinámica del intruso: fuerza de arrastre dada en un medio granular (arena)*

Cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido, experimentará una fuerza de arrastre o de resistencia que es proporcional a la velocidad de este (fuerza de fricción de acorde a la ley de Stokes) cuando las fuerzas viscosas son predominantes o, por otro lado, es proporcional a la velocidad al cuadrado (cuadrático o fuerza inercial de arrastre) en la región donde las fuerzas inerciales son dominantes. Además, cuando un cuerpo impacta en un líquido concretamente, habrá una tercera componente que contribuye a la formación de una cavidad detrás del mismo. De hecho, una vez que el cuerpo esté totalmente sumergido en el líquido, la presión ejercida por la cara que incide o *choca* con el fluido estará casi compensada con la presión ejercida por la cara opuesta; la diferencia de presiones constituye la fuerza de flotación del objeto. Sin embargo, cuando tenemos una cavidad en la estela del objeto, la integral de la presión ejercida por la cara, a partir de la cual se forma la estela, se reduce a una integral sobre la presión atmosférica. En este caso, la integral sobre la cara incidente en el fluido da lugar a un término de arrastre adicional proporcional a la presión hidrostática dentro del líquido y, por tanto, a la profundidad del objeto por debajo de la superficie del medio líquido (Van Der Meer, 2017).

En un medio granular, muchos de los aspectos descritos son similares, mientras que otros son diferentes. Cuando un cuerpo penetra verticalmente y hacia abajo en un medio granular, experimentará una fuerza de arrastre en el sentido contrario a su vector de velocidad, tal y como sucedía en un medio líquido. No obstante, aquí tenemos una gran diferencia entre ambos medios, y es que en el medio granular el cuerpo alcanzará un punto en el que tendrá velocidad cero dentro del propio medio granular. Dado que la gravedad está constantemente actuando sobre el cuerpo, esto implica que hay una fuerza estática que ha sustituido a la fuerza de arrastre que actuaba mientras el cuerpo se desplazaba a lo largo del medio granular. Por lo tanto, es esta fuerza estática la que permite que el cuerpo permanezca dentro del medio granular con velocidad cero (Van Der Meer, 2017).

(Hiroaki Katsuragi & Durian, 2007) demostró también que la interacción entre el proyectil y el medio granular dado puede ser descompuesto en la suma del término de arrastre inercial dependiente de la velocidad más el término de fricción dependiente con la profundidad.

En definitiva, muchos de los estudios centrados en la investigación de un intruso que penetra en un medio granular, han intentado siempre encontrar la ley que mejor define la fuerza macroscópica  $f$  que se ejerce sobre un intruso. En general, estas leyes de las fuerzas tienen la forma:

$$f(z, v) = f_z(z) + f_v(z, v) \quad (2-1)$$

Donde  $f_z$  es una fuerza que depende de la profundidad  $z$  a la que llega a penetrar el intruso y, por otro lado,  $f_v$  es una fuerza de arrastre que depende de la velocidad del intruso siendo cero en el límite  $v \rightarrow 0$  y, también, cerca de la profundidad de penetración. De hecho, resultados experimentales han llegado a demostrar que, en escenarios de objetos en caída libre vertical, los impactos en un medio granular horizontal mostraron que la ley de fuerza macroscópica contenía un término  $f_z = kz$ , donde el parámetro  $k$  caracteriza el aumento de la fuerza con el aumento de la profundidad  $z$  y, al mismo tiempo, una fuerza de arrastre que se escala linealmente con la velocidad  $v$  (Xu et al., 2014).

Cabe destacar que esta fuerza de arrastre puede llegar a ser independiente con velocidades del proyectil lo suficientemente bajas (Seguin & Gondret, 2017).

También ha habido una línea de investigación centrada en la determinación de la fuerza de arrastre en un medio granular teniendo presente el factor de empaquetamiento del medio, donde se ha demostrado que la componente dinámica de la fuerza, obtenida como una media de la fluctuación de fuerzas fuertes, se escala claramente con la velocidad del proyectil al cuadrado (Takehara & Okumura, 2014).

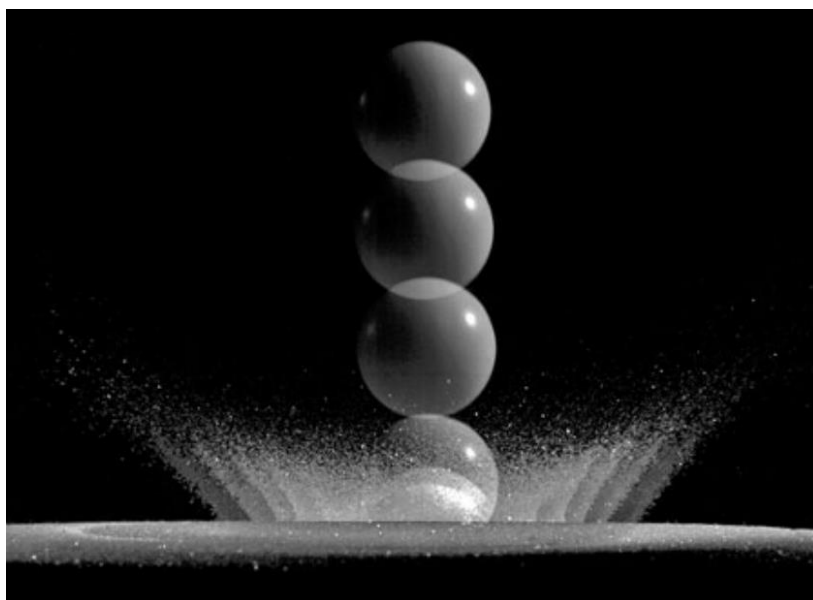
Por último, para poder conocer a la profundidad a la que puede llegar el proyectil en un medio granular dado, (De Bruyn & Walsh, 2004) demostró que proyectiles esféricos tienen una dependencia lineal con el momento del impacto, y también que este comportamiento puede ser explicado en términos de límite de elasticidad.

#### **2.4.1 Medidas de posición**

Se ha visto cómo proyectiles esféricos ligeros penetran en un medio granular dado tras un impacto, desacelera y, finalmente, se para a una profundidad final dada. Este hecho es consistente prácticamente con cualquier escenario relacionado con los fenómenos de impacto y formación de cráteres. Sin embargo, proyectiles esféricos pesados penetran y desaceleran a lo largo del medio hasta que alcanzan velocidades nulas. El origen de este fenómeno se debe a la gran saturación del término de fricción dependiente con la profundidad (Pacheco-Vázquez et al., 2011).

La forma más sencilla de estudiar un objeto desconocido es probablemente a través de los **sondeos mecánicos**. Consideremos una situación en la que estamos enfrente de un objeto desconocido. ¿Qué es lo primero que deberíamos de hacer? La cosa más simple sería llevar a cabo observaciones cuidadosas desde varios ángulos. Después, el siguiente paso, uno

interactuaría con dicho objeto con el fin de observar su comportamiento. Este método del sondeo mecánico corresponde a uno de los métodos más primitivos en el mundo de la investigación física. Por lo tanto, el sondeo mecánico puede considerarse como una especie de técnica de medición de la fuerza de arrastre que determinará las características mecánicas de un objeto desconocido o intruso. Cuantitativamente, la fuerza de resistencia a la penetración debería poder medirse; después, los datos obtenidos deberían analizarse con la velocidad de penetración y la profundidad para obtener la caracterización típica de la fuerza de arrastre. Por ejemplo, una serie de imágenes de vídeo de alta velocidad de una piedra golpeando un medio granular de arena nos permite cuantificar la fuerza de arrastre del impacto utilizando la segunda ley de movimiento de Newton. En la **Ilustración 4** podemos apreciar un ejemplo muy sencillo del movimiento de una esfera sólida impactando en un medio granular arenoso. Asumiendo el criterio de mecánica tipo continuo, la correspondiente fuerza granular de arrastre debería ser escrita por una ecuación concisa. Además, la teoría estándar de la fuerza de arrastre ha sido implementada en mecánica de fluidos. Por lo tanto, una comparación de las ecuaciones de la fuerza de arrastre es muy útil para clasificar un medio granular y un medio líquido. También, la fuerza de arrastre puede caracterizar, además del medio granular y líquido, medios compuestos de materiales viscoelásticos. Por lo tanto, la caracterización de la fuerza de arrastre puede ser empleada como una herramienta esencial para clasificar un amplio rango de medios en los que se movería un intruso (H. Katsuragi, 2016).



#### Ilustración 4

*Ejemplo de un impacto granular. El movimiento de una esfera sólida impactando en un medio granular arenoso es capturado por una cámara de alta velocidad. Las salpicaduras de los granos de arena son consecuencia de la deceleración de la esfera como efecto directo del impacto. Se puede apreciar dicha deceleración ya que la cámara hace capturas de imágenes en intervalos de tiempo iguales (esto se puede apreciar en la región en la que la esfera aún no ha tocado el medio granular); de tal manera que en el impacto vemos cómo la esfera va reduciendo su movimiento hasta el punto en el que se para totalmente sin llegar a sumergirse en su totalidad en dicho medio granular (H. Katsuragi, 2016).*

De acorde con lo anterior y junto con las explicaciones mencionadas en puntos anteriores, los científicos han propuesto varias expresiones para la fuerza de arrastre que un cuerpo o intruso experimenta cuando penetra en un sólido granular. **Poncelet (1829)** puede que sea el modelo más antiguo y en donde se asume que la fuerza de arrastre que actúa en un cuerpo consiste en una fuerza de resistencia constante y un término de arrastre cuadrático. A través del estudio de la formación de cráteres, Bruyn & Walsh (2004) describieron su medio granular como un material Bingham (o límite elástico), en donde se originaba una fuerza de arrastre con una fuerza de resistencia constante y un término de arrastre de Stokes. Un problema común para este modelo resulta cuando se da la situación en la que la gravedad pueda superar la fuerza de arrastre; si esto ocurre, el cuerpo continúa moviéndose a través del medio granular con una velocidad constante (**velocidad terminal**), lo cual contradice las observaciones experimentales (Van Der Meer, 2017).

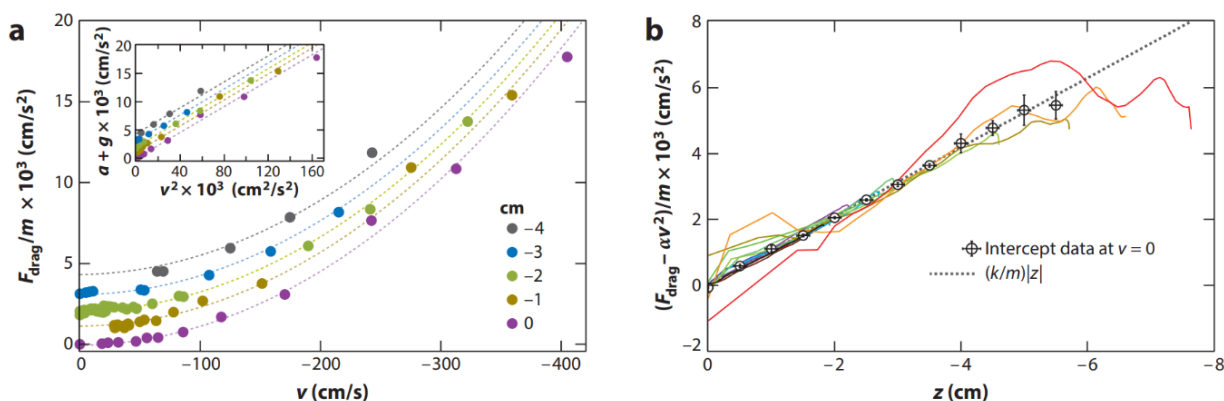
En el mismo año, Lohse et al. (2004) estudiaron el movimiento de una esfera lanzada con velocidad insignificante en un medio granular con arena muy fina y poco compacta, y pudieron obtener unos resultados que establecían que la fuerza de arrastre aumentaba de forma lineal con la profundidad  $z$  de la localización del intruso debajo de la superficie del medio arenoso; en otras palabras, una fuerza que es proporcional a la presión hidrostática (o litostática) en función de la profundidad  $z$ , la cual está debida al peso del material granular por encima del punto en el que se encuentre el intruso. También establecieron que para que el objeto pueda moverse a mayor profundidad, es necesario realizar un trabajo que sea opuesto a esta presión hidrostática mediante el desplazamiento del material granular y la fricción de Coulomb entre la esfera y los granos de arena (Van Der Meer, 2017).

A raíz de las investigaciones anteriores, y junto con otras desarrolladas en paralelo, se demostró que la fuerza de arrastre podía ser descrita a través de una ley de fuerza unificada:

$$F_{\text{arrastre}} = -kz - \alpha v^2 \quad (2-2)$$

Donde  $v$  es la velocidad del intruso,  $z$  su profundidad con respecto a la superficie del medio granular, y  $k$  y  $\alpha$  son constantes. Por lo tanto, se pudo ver que la ley de arrastre para medios granulares poco compactos dependía de los términos de arrastre hidrostático y cuadrático (véase **Ilustración 5**). La validez de la **ecuación (2-2)** para medios granulares poco compactos fue confirmada por unos científicos, pero se comenzó a observar desviaciones de la misma cuando los efectos del **tamaño del contenedor**, donde se almacena el medio granular particular, supuso una variable que influía notablemente en las simulaciones y experimentos (un cubo de diámetro grande y altura pequeña dará resultados diferentes que otro cubo de radio

más pequeño, pero de mayor altura). Al mismo tiempo, la densidad de los medios granulares también suponen una variable que se debe de tener en cuenta, lo cual estará relacionado con la **fracción de empaquetamiento  $\phi$**  (ratio del volumen ocupado por la fase sólida o los granos y el volumen total del medio granular) del medio granular (Van Der Meer, 2017).



### Ilustración 5

Evidencia experimental para la ley de fuerza de arrastre unificada. (a) Para una profundidad  $z$  fija, la aceleración debida a la fuerza de arrastre según  $F_{\text{arrastre}}/m$  se ajusta de manera cuadrática con la velocidad. (b) Cuando el término dependiente de la velocidad  $\alpha v^2/m$  es abstraído de  $F_{\text{arrastre}}/m$ , el resultado es proporcional a la profundidad  $z$ . Las curvas sólidas coloridas corresponden con diferentes velocidades de impacto entre 0 y 4.0 m/s (Van Der Meer, 2017).

Como dato curioso, durante el impacto de un intruso en un medio líquido, el término de arrastre hidrostático de la forma  $F_{\text{arrastre}} = -kz$  solo está presente cuando una cavidad está siendo creada a lo largo de la estela que dicho proyectil deja durante el impacto a lo largo del medio. Sin embargo, este término siempre existe en un medio granular. Esto último es debido a que varios fenómenos rompen la simetría entre la presión en la parte inferior del intruso (la que entra primeramente en contacto con el medio granular en el momento del impacto; *leading-edge*) y su parte superior (*trailing-edge*), incluso en la ausencia de dicha cavidad. Uno de los efectos es el del *arqueo*, en donde las fuerzas de la parte superior del intruso están protegidas por estructuras en forma de arco que los granos pueden estar formando por encima del objeto que se mueve hacia abajo. Al mismo tiempo, los granos del medio granular que están siendo presionados por la parte inferior del intruso puede conducir a mayores fuerzas de fricción en la parte inferior (*leading-edge*) que en comparación con la parte superior del intruso (*trailing-edge*) (Van Der Meer, 2017).

En general, la dinámica del intruso está predominantemente condicionada por las **condiciones iniciales**. Para todos los casos, el intruso penetra en el medio granular, desacelera lentamente hasta que se para a una cierta profundidad. Para impactos a baja velocidad, existe una fase de aceleración inicial puesto que la gravedad es superior a la fuerza de arrastre granular durante el impacto, a diferencia de una continua desaceleración en los casos con velocidades de impacto



altas. Cuantitativamente, el movimiento del intruso a lo largo de la dirección de la gravedad puede ser descrito usando la **ecuación de movimiento traslacional** (Huang et al., 2020).

$$m_i \frac{dv}{dt} = mg - \gamma v_i^2 - \kappa \lambda (1 - e^{-z/\lambda}) \quad (2-3)$$

Donde podemos encontrar la gravedad  $mg$  ( $m$  es la masa de intruso), fuerza de arrastre ( $\gamma$  caracteriza el arrastre inercial) y los términos de fricción (dependientes de la profundidad) con  $\gamma$ ,  $\kappa$  y  $\lambda$  parámetros fenomenológicos. El valor de  $\kappa$  es una fricción tipo al coeficiente relacionado con la presión que hay en el medio granular (unidades N/m). La escala de longitud característica  $\lambda$  se escoge de tal manera que es una longitud característica relacionada con la anchura del cubo, el cual tiene que ser lo suficientemente grande como para evitar los efectos de contorno. El término de fricción es lineal y libre de escala para penetraciones pequeñas y se satura hacia  $\kappa z$  para escalas mayores. El término exponente de la **ecuación (2-3)** surge del conocido efecto Janssen (véase **2.4.3 Efecto Janssen**) en donde la presión en el sistema granular se satura a una profundidad finita debido a la redistribución del peso hacia las paredes del cubo. En el pasado, varios trabajos experimentales han demostrado que la dependencia cuadrática con la velocidad es suficiente para describir la energía mecánica de disipación del intruso. De hecho, la energía de disipación que ocurre como consecuencia de la fuerza de arrastre en un medio granular se asemeja a un objeto moviéndose en un fluido a un número Reynolds grande (Huang et al., 2020).

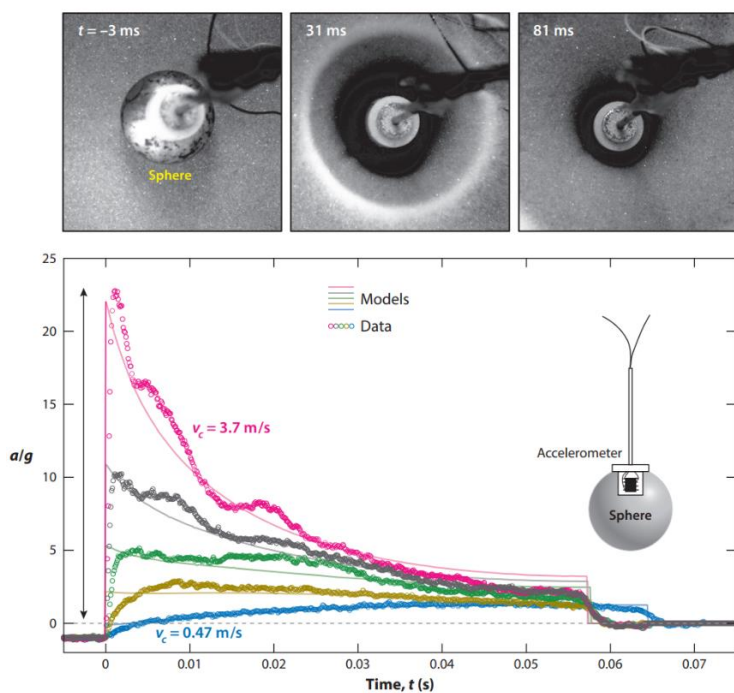
Por otro lado, el coeficiente  $\gamma$  no es una constante del material puesto que decae cuando la velocidad inicial  $v_i$  del intruso aumenta hasta el punto en el que se satura cuando tenemos impactos a alta velocidad. Esto sugiere que hay una respuesta mecánica para pequeñas  $v_i$ , lo cual supone que esto surge de una distancia perturbada diferente a la obtenida en impactos a alta  $v_i$ . Por último, se puede ver cómo la **ecuación (2-3)** describe la trayectoria del intruso en términos de la energía cinética inicial e introduciendo el coeficiente  $\gamma$  dependiente con la profundidad  $z$  (Huang et al., 2020).

#### 2.4.2 Medidas directas de aceleración

Todos los experimentos mencionados con anterioridad fueron ejecutados usando una medida visual exclusivamente de la posición del intruso del medio granular, generalmente fijando una varilla al objeto de forma que sea observable por encima del medio granular, aunque a veces usando técnicas más sofisticadas como las imágenes de rayos X. Dado que las aceleraciones y las fuerzas se obtienen ejecutando la segunda derivada de los datos, cabe esperar que algunos datos permanezcan ocultos.

Medidas basadas en la posición han sido realizadas mediante medidas directas de la fuerza que un intruso experimenta usando un acelerómetro con cable pegado en el intruso (véase **Ilustración 6**) (Goldman & Umbanhowar, 2008). A pesar de que los resultados obtenidos estaban generalmente en concordancia con la ley de la fuerza expresada por la **ecuación (2-3)**, se revelaron estructuras adicionales que pasaron desapercibidas en los datos de posición. La **Ilustración 6** refleja un ejemplo de los datos de aceleración. El modelo de la **ecuación (2-3)** se ajusta más o menos al comportamiento reflejado por los datos experimentales, pero también hay discrepancias relacionadas con el comportamiento observado para velocidades mayores en donde los datos parecen oscilar alrededor de la curva teórica (Van Der Meer, 2017).

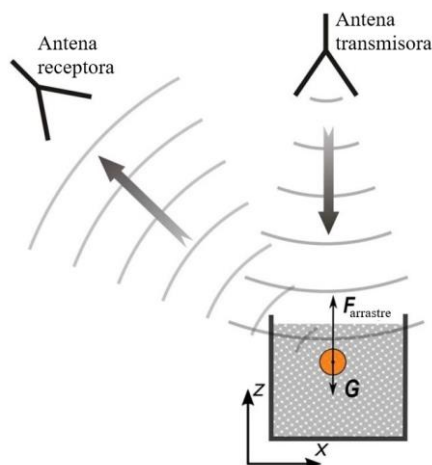
Altshuler et al. (2014), y simultáneamente Joubaud et al. (2014), midieron de forma no invasiva la aceleración haciendo uso de un cuerpo particular que contenía un acelerómetro y que enviaba sus datos radiográficamente a un controlador externo (véase **Ilustración 7**). Para un impacto en un medio granular poco compacto, observaron que había una clara influencia entre el momento de cierre de la cavidad y la producción del chorro o *jet*. Mientras que los datos de la aceleración de arrastre se ajustan fielmente a la teoría, se observa un pico agudo en el momento en que la cavidad se cierra y se produce el *jet*. Este hecho sigue interfiriendo en la aceleración medida de la partícula que se mueve hacia abajo durante el resto de la trayectoria (Van Der Meer, 2017).



**Ilustración 6**

Medida directa de la fuerza de arrastre en el interior de un medio granular usando un acelerómetro: (paneles superiores) capturas de fotos del experimento y (panel inferior) la evolución temporal de la aceleración medida. El modelo de la **ecuación (3-2)** (líneas sólidas) se ajusta muy bien con los datos obtenidos experimentalmente (círculos), pero hay claras diferencias entre ambos a medida que la velocidad del intruso aumenta (Goldman & Umbanhowar, 2008).



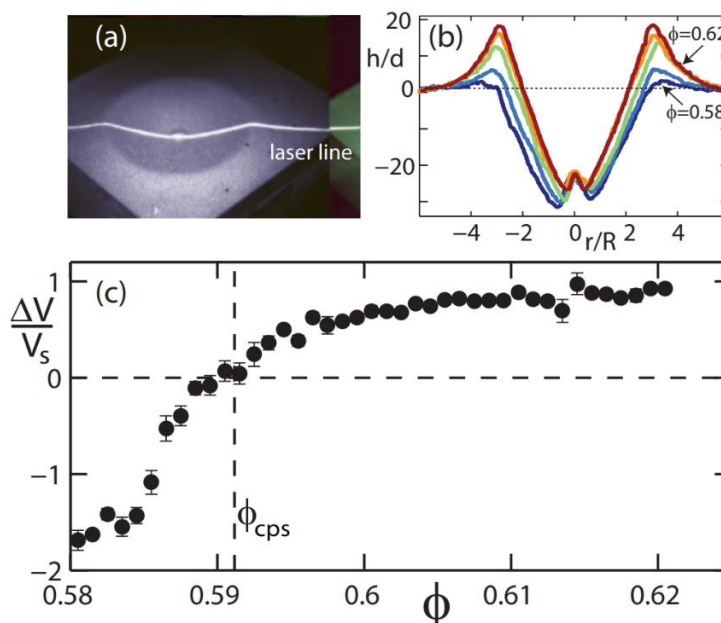


### Ilustración 7

*Esquema del sistema de seguimiento por radar (vista lateral). El sistema de radar compara la distancia relativa entre la antena de transmisión y la de recepción para obtener la trayectoria del intruso dentro del medio granular. Para ello, la antena transmisora emite una señal electromagnética en el espacio mientras el proyectil esférico o intruso se mueve siguiendo una trayectoria desconocida. El desplazamiento de dicho intruso con respecto a la(s) antena(s) receptora(s) se obtiene mediante el desfase entre la señal recibida y la emitida. Además, dada la naturaleza análoga con el sistema de radar, se consigue una resolución temporal muy alta. Debido a esto último y junto con la naturaleza no invasiva, hace que esta técnica sea perfecta para el monitoreo de cualquier trayectoria tanto de proyectiles o intrusos esféricos como no esféricos en tres dimensiones (3D). Al mismo tiempo, se suelen usar granos de PPE (polipropileno expandido) como medio granular particular ya que son transparentes a las ondas electromagnéticas porque la constante dieléctrica de dichos granos está muy próxima al valor del aire; de tal manera que el intruso puede ser detectado y ubicado en el espacio en cualquier instante de tiempo a través del uso de dichas antenas (Huang et al., 2020).*

Futuras investigaciones científicas han tenido en cuenta el parámetro de la fracción de empaquetamiento del medio granular (Umbanhowar & Goldman, 2010). Mientras que los datos discutidos hasta el momento habían sido obtenidos en medio granulares muy poco compactos, Umbanhowar & Goldman (2010) controlaron cuidadosamente el empaquetamiento del medio granular y encontraron que la **ecuación (2-3)** funcionaba mejor para lo que ellos llamaban el **estado crítico de empaquetamiento  $\phi_{cps}$**  (véase **Ilustración 8**), el cual es la fracción o factor de empaquetamiento para la cual no hay una **dilación** (efecto de que el volumen de un medio granular denso necesita expandirse para permitir el movimiento) o compresión del material granular bajo el efecto de cizallamiento. Por debajo y por encima del valor crítico de  $\phi$ , el *prefactor* del término cuadrático de la **ecuación (2-3)** depende de la profundidad  $z$  y, para el término hidrostático, se encuentra una **respuesta tipo Janssen** (Janssen 1895, Sperl 2006), en la que se produce una saturación de la presión hidrostática para mayores profundidades. Dicho en otras palabras, solo cuando estamos cerca de  $\phi_{cps}$  la fuerza se puede separar en los términos aditivos lineales con la profundidad y cuadrático con la velocidad; a una profundidad fija, el coeficiente de arrastre disminuye (aumenta) con la profundidad para  $\phi < \phi_{cps}$  ( $\phi > \phi_{cps}$ ), pero para una velocidad pequeña y constante, la dependencia de la

fuerza con la profundidad muestra una respuesta exponencial tipo Janssen con una escala de longitud que disminuye al aumentar  $\phi$  y es casi constante para  $\phi > \phi_{cps}$ .



### Ilustración 8

Influencia de la fracción de volumen en el fenómeno de formación de cráteres para una velocidad inicial del intruso de  $v_0 = 257 \pm 3$  cm/s. (a) Cráter tras el impacto para  $\phi = 0.61$  y la línea láser. (b) El desplazamiento de la superficie “h” relativo al diámetro del grano “d” aumenta con el volumen de fracción ( $\phi = 0.579, 0.589, 0.600, 0.610$ , y  $0.622$ ). (c) Cambio en el volumen del medio granular  $\Delta V$ , después del impacto, relativo al volumen de la esfera  $V_s$  vs.  $\phi$  es 0 para  $\phi_{cps} = 0.591$ , lo cual indica la localización del estado de empaquetamiento crítico (Umbanhowar & Goldman, 2010).

### 2.4.3 Efecto Janssen

Consideremos la presión de una columna granular en un contenedor cilíndrico, tal y como puede verse reflejado en la **Ilustración 9 (a)**. La profundidad  $z$  es medida hacia abajo desde la parte superior de la superficie de la columna. En general, las fuerzas internas granulares se dispersan aleatoriamente por complejas estructuras de cadenas de fuerza, tal y como puede verse reflejado en la **Ilustración 10** y en la **Ilustración 11**. Debido a esta dispersión de fuerzas, una parte de la tensión vertical originada por la *autogravedad* es soportada por la fricción de la pared lateral, así como por la pared inferior. Para considerar esta dispersión de fuerzas, Janssen empleó una relación constitutiva simple entre la presión vertical  $p_v$  y la presión horizontal  $p_h$  del siguiente modo:

$$p_h = \kappa p_v \quad (2-4)$$

Donde  $\kappa$  es un parámetro que oscila entre  $0 \leq \kappa \leq 1$ . La presión dispersa de fuerzas horizontales actúa como una tensión normal en una pared lateral y da lugar al apoyo por fricción,  $\mu_w p_h$ , donde  $\mu_w$  es un coeficiente de fricción (Coulomb) entre los granos y una pared

lateral. Considerando un trozo diferencial entre  $z$  y  $z + dz$  (área de intersección de  $A$  y la longitud del perímetro de  $L$ ), el balance de la fuerza vertical se puede escribir como:

$$Adp_v = \rho g Adz - \mu_w p_h L dz \quad (2-5)$$

Donde  $\rho$  es la densidad granular aparente. Sustituyendo la **ecuación (2-5)** en la **ecuación (2-4)**, la ecuación puede reescribirse como ecuación diferencial:

$$\frac{dp_v}{dz} + \frac{\mu_w \kappa L}{A} p_v = \rho g \quad (2-6)$$

Esta ecuación diferencial se puede transformar de tal manera que si la multiplicamos por un factor exponencial  $e^{\left(\frac{\mu_w \kappa L}{A} z\right)}$ , podrá ser resuelta del siguiente modo:

$$\frac{d}{dz} \left[ p_v e^{\left(\frac{\mu_w \kappa L}{A} z\right)} \right] = \rho g e^{\left(\frac{\mu_w \kappa L}{A} z\right)} \quad (2-7)$$

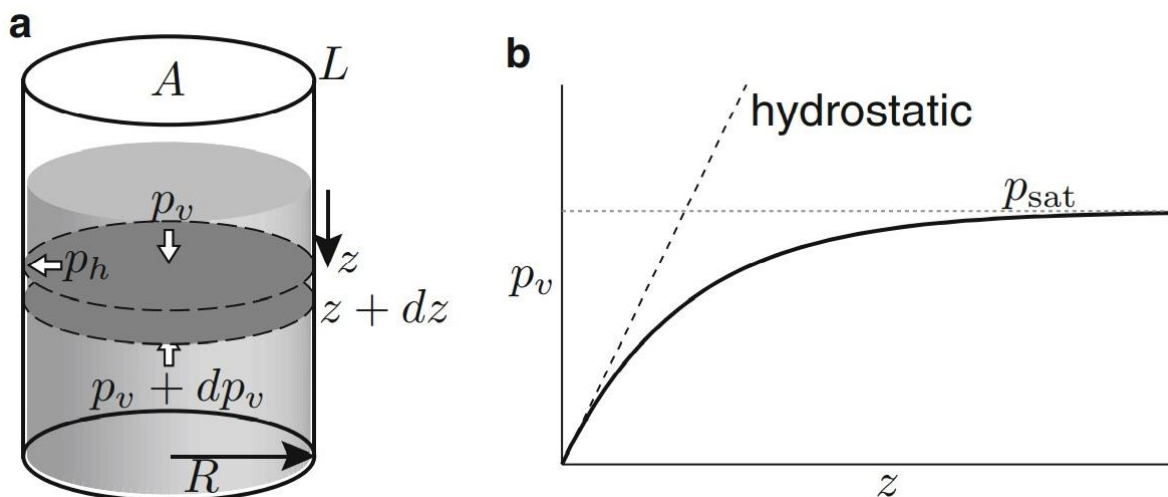
Integrando la **ecuación (2-7)** y usando la condición de contorno  $p_v(z = 0) = 0$ , finalmente obtenemos:

$$p_v = \frac{\rho g R}{2\mu_w \kappa} \left[ 1 - e^{\left(-\frac{2\mu_w \kappa}{R} z\right)} \right] \quad (2-8)$$

Aquí, la relación  $\frac{A}{L} = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2}$  ( $R$  es el radio del contenedor) es utilizada. Para la región de valores de  $z$  pequeños ( $\ll R/2\mu_w \kappa$ ), una relación simple hidrostática,  $p_v = \rho g z$ , es obtenida a través de la expansión de Taylor de la **ecuación (2-8)**. Sin embargo,  $p_v$  está saturada en la región interna hacia un valor asintótico:

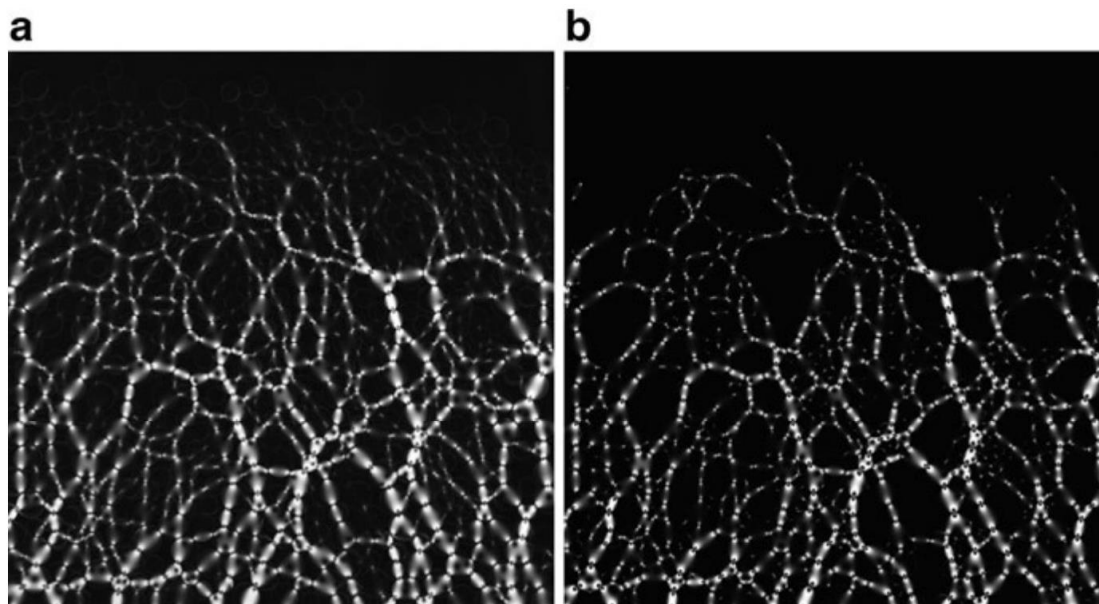
$$p_{sat} = \frac{\rho g R}{2\mu_w \kappa} \quad (2-9)$$

En definitiva,  $p_v$  se satura hacia valores de  $p_{sat} \approx 2\rho g R$  en su profundidad característica  $z \approx 2R$  porque  $\mu_w$  y  $\kappa$  suelen estar próximos a  $1/2$ . La forma específica funcional de  $p_v(z)$  está reflejada en la **Ilustración 9 (b)**.



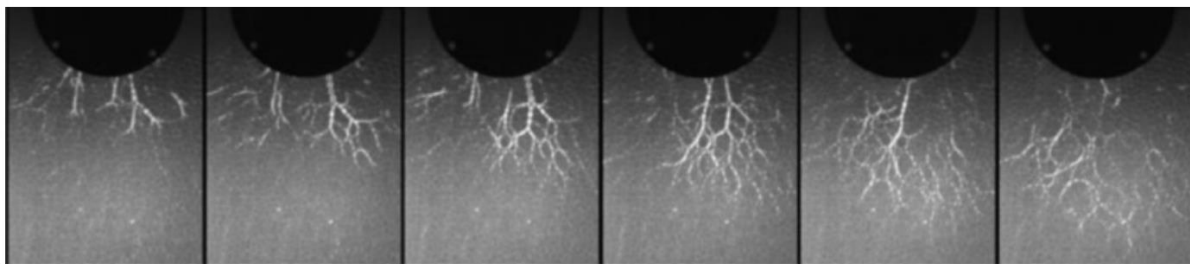
**Ilustración 9**

El modelo de Janssen de la presión granular medida en la pared del contenedor. (a) Imagen esquemática de la columna granular en un contenedor cilíndrico. (b) Una forma cualitativa de  $p_v(z)$  obtenido por una relación constitutiva de tipo Janssen,  $p_h = \kappa p_v$  (H. Katsuragi, 2016).



**Ilustración 10**

Ejemplo de fuerzas de contacto dadas en un medio granular dado. Cada imagen corresponde (a) al resultado experimental y (b) al resultado obtenido tras una simulación informática (H. Katsuragi, 2016).



**Ilustración 11**

*Propagación de los impulsos de la cadena de fuerzas originados como consecuencia directa del impacto del intruso en un medio granular dado (H. Katsuragi, 2016).*



## CAPÍTULO 3. Análisis de datos

En este punto se reflejará el proceso mediante el cual nos basaremos posteriormente a la hora de desarrollar los códigos adjuntos en el **Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB)**. Dicho modelo permite resolver numéricamente la ecuación diferencial que define el movimiento de un proyectil en un medio granular, de tal manera que lo validaremos con los datos facilitados de antemano.

### 3.1 Desarrollo del código

El script que se desea elaborar permitirá calcular la velocidad del intruso resolviendo su ecuación diferencial dada. Para calcular la velocidad del intruso, tenemos que resolver la **ecuación diferencial (2-3)**.

$$m_i \frac{dv}{dt} = mg - \gamma v_i^2 - \kappa \lambda (1 - e^{-z/\lambda})$$

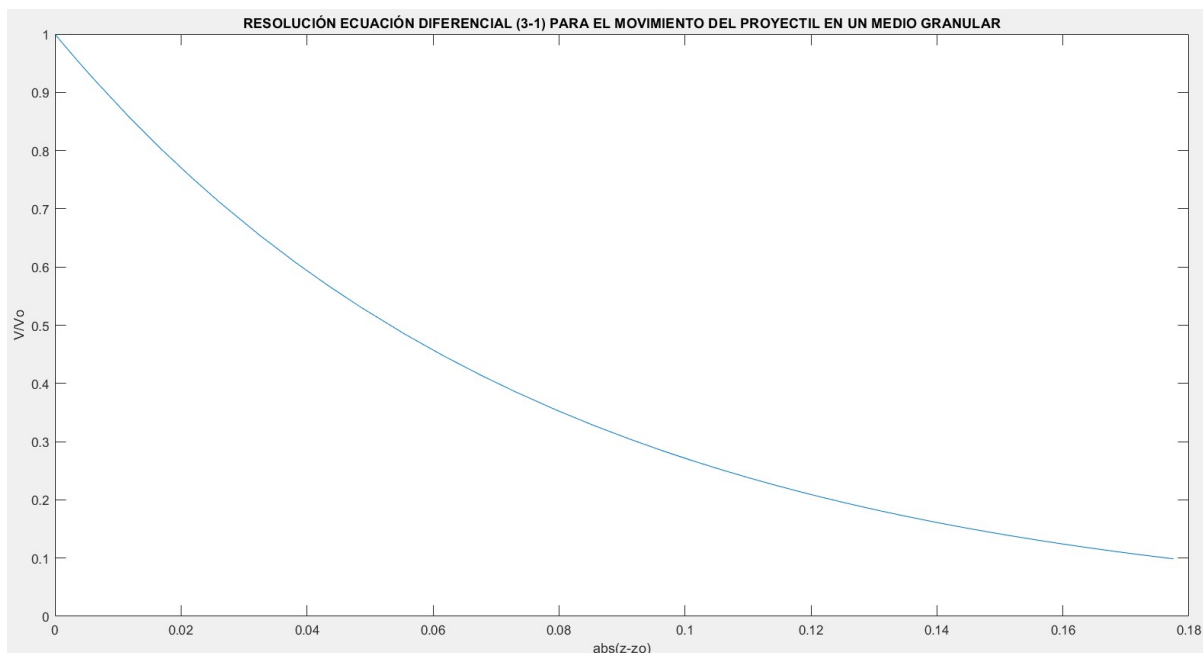
Cuando la gravedad es cero nos queda:

$$m \frac{dv}{dt} = -\gamma v^2 \quad (3-1)$$

El término  $-\kappa \lambda (1 - e^{-z/\lambda})$  se anula con gravedad cero porque esta relacionado con el peso de las partículas del medio granular (véase **2.4.3 Efecto Janssen**); si no existe gravedad no tenemos peso de cada una de las partículas.

Si queremos resolver la **ecuación (3-1)** escribimos en MATLAB los códigos que tenemos adjuntos en el **Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB)**. En dicho código, dejaremos constante el valor de la masa e iremos modificando el valor de  $\gamma$  de acorde a las diferentes velocidades iniciales con el que es lanzado el proyectil al medio granular.

Al ejecutar el código, obtenemos como resultado lo reflejado en la **Ilustración 12**. Este resultado es interesante de analizar dado su **comportamiento o tendencia exponencial**, el cual tendrá diferentes pendientes en función de la velocidad inicial con la que es lanzado el proyectil al medio granular dado.



### Ilustración 12

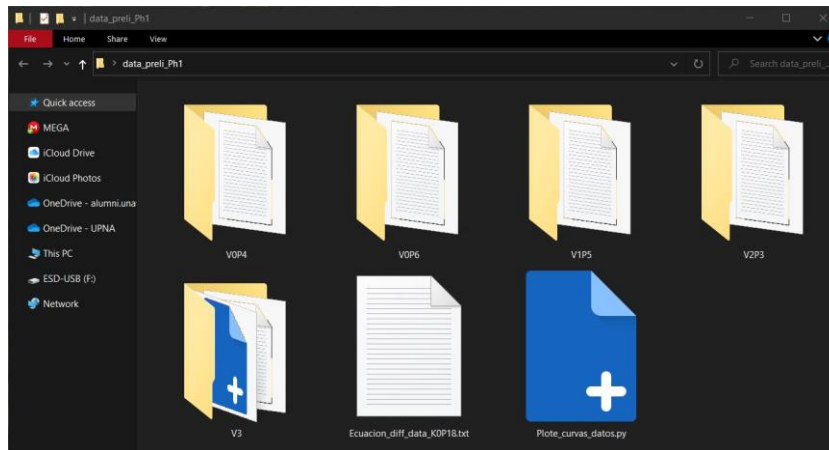
*Output del código que resuelve la ecuación diferencial del movimiento del proyectil para gravedad nula. La tendencia exponencial que vemos varía en función del valor que asignemos en el código a  $\gamma$ . En esta simulación se ha tomado un valor aleatorio de  $\gamma = 0.3$ .*

En definitiva, lo que hemos hecho hasta el momento se puede resumir en los siguientes pasos:

- i. Tomar la data inicial proporcionada obtenidos mediante simulación, de acorde al artículo (Huang et al., 2020).
- ii. Escalar el eje vertical para la velocidad  $V$  con la velocidad inicial  $V_0$  con cada caso, es decir,  $V/V_0$ .
- iii. Escalar el eje horizontal para la posición  $z$  del proyectil con su posición inicial  $z_0$  de la forma  $abs(z - z_0)$ .
- iv. Identificar donde se ubica la superficie del medio granular, es decir, cuando  $z = 0$  metros.
- v. Hacer curvas para cada caso agrupado según los diferentes archivos que disponíamos y con **gravedad = 0 m/s<sup>2</sup>**.
- vi. Resolver la ecuación diferencial del movimiento del proyectil para **gravedad = 0 m/s<sup>2</sup>** y plotear el resultado en una gráfica con los ejes escalados de igual forma que lo comentado anteriormente, mediante el código adjunto en el **Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB)**.
- vii. Plotear las curvas de los datos obtenidos junto con la curva de la **ecuación diferencial (3-1)** haciendo uso del código escrito en PYTHON según el **Anexo 6: Código ploteo curvas datos experimentales y simulados (PYTHON)** (véase la **Ilustración 15** y la



**Ilustración 16).** Ahora hay que encontrar el mejor *fit* de la curva de la ecuación del movimiento y, para ello, vamos modificando manualmente en nuestro código el valor de  $\gamma$ . Aquí es crucial disponer del directorio tal y como se refleja en la **Ilustración 13**. Por otro lado, para entender qué estamos planteando con respecto a los datos facilitados basta con analizar la **Ilustración 14**, en donde podemos ver la estructura para un conjunto de datos de un proyectil con velocidad inicial 0.4 m/s. La columna 5 hace referencia a los valores de posición del proyectil, mientras que la columna 8 hace referencia a los valores de velocidad de este. Por lo tanto, esto será lo que usaremos todo el rato en nuestra simulación.



**Ilustración 13**

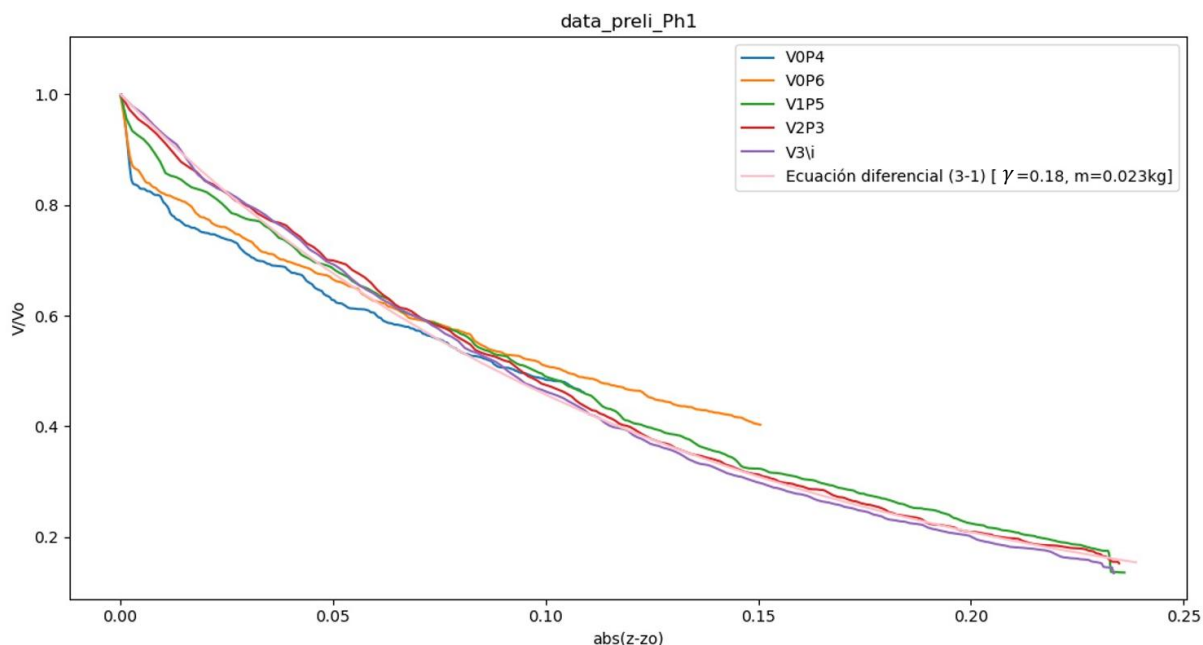
Configuración del directorio para ejecutar el script "Ploteo\_curvas\_datos.py". Podemos ver en este caso cómo el archivo de texto "Ecuación\_diff\_KOP18.txt", obtenido en MATLAB tras la resolución de la ecuación diferencial (3-1) del intruso ( $\gamma = 0.18$ ), está en el mismo directorio con el fin de poder comparar dichos datos obtenidos con la simulación con los datos experimentales. Los datos experimentales se agrupan en diversas carpetas con la siguiente nomenclatura <<VaPb>>, donde "a" y "b" hacen referencia a unos valores numéricos separados por "P" para designar el punto que separará la unidad de la décima (por ejemplo, VOP4 será un proyectil que tenga una velocidad inicial de 0.4 m/s).



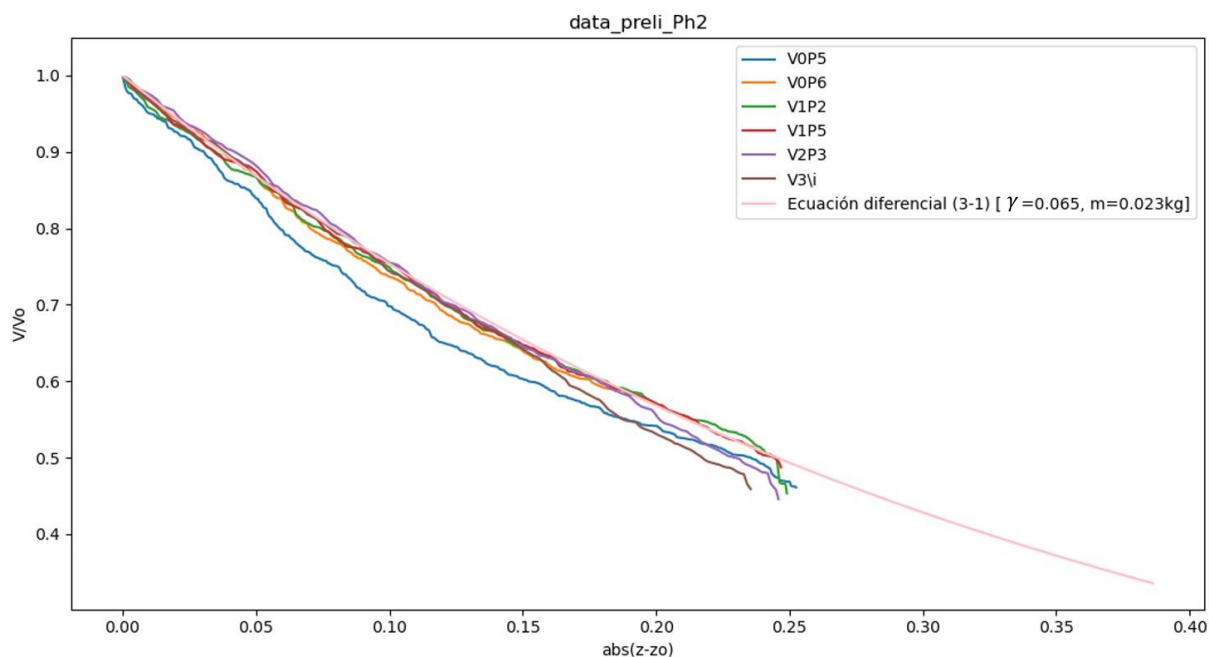
**Ilustración 14**

Estructura de los datos para el caso de un proyectil con velocidad inicial 0.4 m/s. Se hará uso solamente de la columna 5 (valores de posición del proyectil) y de la columna 8 (valores de velocidad del proyectil). Todos los datos están dados en el Sistema Internacional.

En la **Ilustración 15** podemos observar cómo a velocidades bajas del proyectil nuestro modelo no funciona tan bien; se puede ver claramente esto con las curvas que representan velocidades de 0.4 m/s y 0.6 m/s. Por otro lado, analizando la **Ilustración 16**, podemos ver fácilmente que sucede lo mismo con la curva de 0.5 m/s puesto que está bastante alejado de nuestro modelo y de las otras curvas.



**Ilustración 15**  
 Ploteo del conjunto de datos “data\_preli\_Ph1”. Hemos encontrado que el mejor ajuste de la ecuación diferencial, considerando una masa del intruso de 0.023 Kg, es para una  $\gamma = 0.18$ .



**Ilustración 16**  
 Ploteo del conjunto de datos “data\_preli\_Ph2”. Hemos encontrado que el mejor ajuste de la ecuación diferencial, considerando una masa del intruso de 0.023 Kg, es para una  $\gamma = 0.065$ .

### 3.2 Interpretación del resultado del código

La **ecuación (3-1)** se puede reescribir en término de “z” (profundidad del proyectil en el medio granular):

$$\frac{m}{\gamma} \frac{dv}{v} = -\frac{dz}{dt} dt \rightarrow \frac{m}{\gamma} \frac{dv}{v} = -dz \rightarrow \frac{dv}{v} = -\frac{\gamma}{m} dz$$

La solución de esta última ecuación es del siguiente modo:

$$v = v_0 e^{-\frac{\gamma}{m}z} = v_0 e^{-\alpha z} \quad (3-2)$$

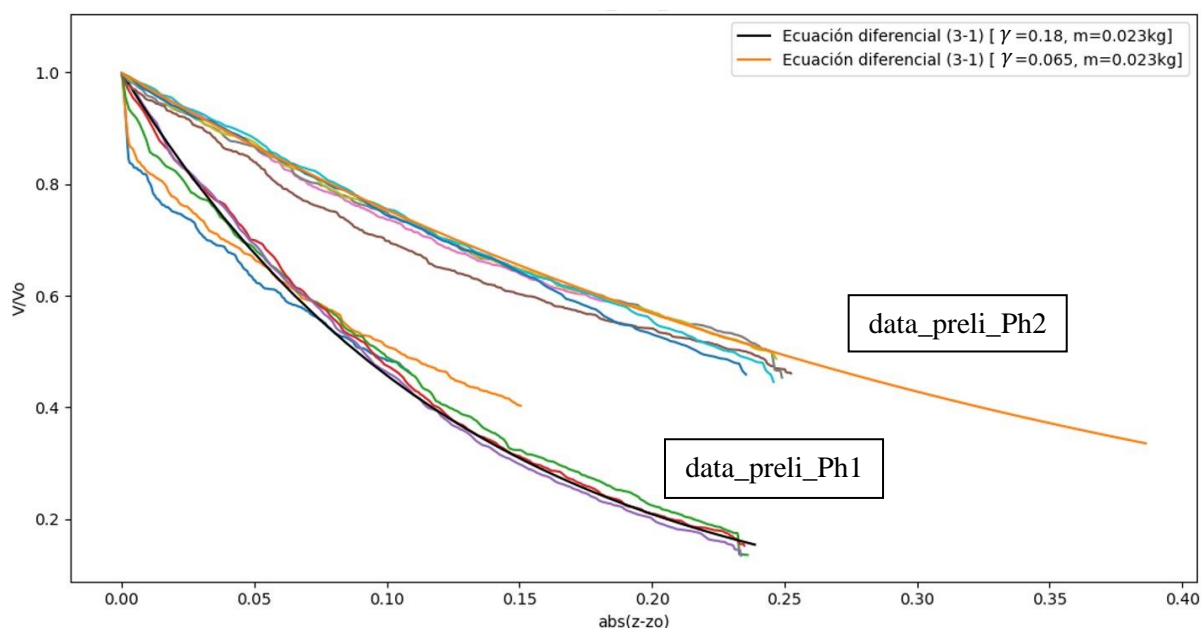
La **ecuación (3-2)** es la que describe la tendencia exponencial de la curva obtenida con MATLAB, de acorde a la **Ilustración 12**. Además, esto nos sirve para validar exitosamente dicho código por comparación con los datos de (Huang et al., 2020), tal y como podemos apreciar en la **Ilustración 15** y la **Ilustración 16**, ya que podemos ver cómo se ajusta bastante bien la curva de nuestro modelo con las de los datos proporcionados de (Huang et al., 2020). En ambas ilustraciones podemos ver cómo los datos numéricos del proyectil para unas velocidades iniciales diferentes siguen una tendencia exponencial.

### 3.3 Análisis de la curva exponencial

Este punto tiene por objeto analizar la tendencia exponencial de la curva consecuente del movimiento del proyectil a lo largo del medio granular, tal y como veíamos anteriormente. La principal motivación de este apartado reside en el hecho de que esto mismo sería uno de los pilares del Proyecto del Grupo 4 propuesto aquí y en donde los alumnos tendrían que ser capaces también reproducirlo para llegar a las conclusiones pertinentes.

Tal y como hemos obtenido con anterioridad, los dos conjuntos de datos que teníamos que analizar tienen distintas tendencias, tal y como podemos ver en la **Ilustración 17**. La tendencia para el conjunto de datos “data\_preli\_Ph1” está relacionada con el valor  $\gamma = 0.18$ ) y para el otro conjunto “data\_preli\_Ph2” es  $\gamma = 0.065$ , considerando una masa del proyectil de 0.023 kilogramos, valor tomado de (Huang et al., 2020). Además, podemos observar unas curvas por encima y otras por debajo de la curva obtenida con el código, lo cual es debido a la velocidad inicial del proyectil. El valor de  $\gamma$  varía en función de las velocidades iniciales de tal manera que disminuye a medida que aumenta la velocidad hasta tal punto que se satura cuando el valor de la misma es muy alto (Huang et al., 2020). En realidad, dicho valor  $\gamma$  está relacionado con la fuerza de arrastre que experimenta el proyectil dentro del medio granular.

Al mismo tiempo, el motivo por lo que tienen diferentes pendientes es porque los datos “data\_preli\_Ph1” tienen un factor de empaquetamiento y los de la “data\_preli\_Ph2” tienen otro factor de empaquetamiento (véase **2.4.2 Medidas directas de aceleración**). En el caso de la “data\_preli\_Ph2” hemos obtenido una curva que tiene una pendiente menor que “data\_preli\_Ph1”; esto es sinónimo de que el factor de empaquetamiento es menor o las partículas del medio granular están más *sueeltas*. Con el caso de la “data\_preli\_Ph1” vemos que tiene una pendiente mayor; es decir, el factor de empaquetamiento es mayor ya que las partículas del medio granular están más comprimidas.



**Ilustración 17**

Comparación de las diferentes pendientes de cada exponencial resultante para cada conjunto de datos “data\_preli\_Ph1” y “data\_preli\_Ph2”.

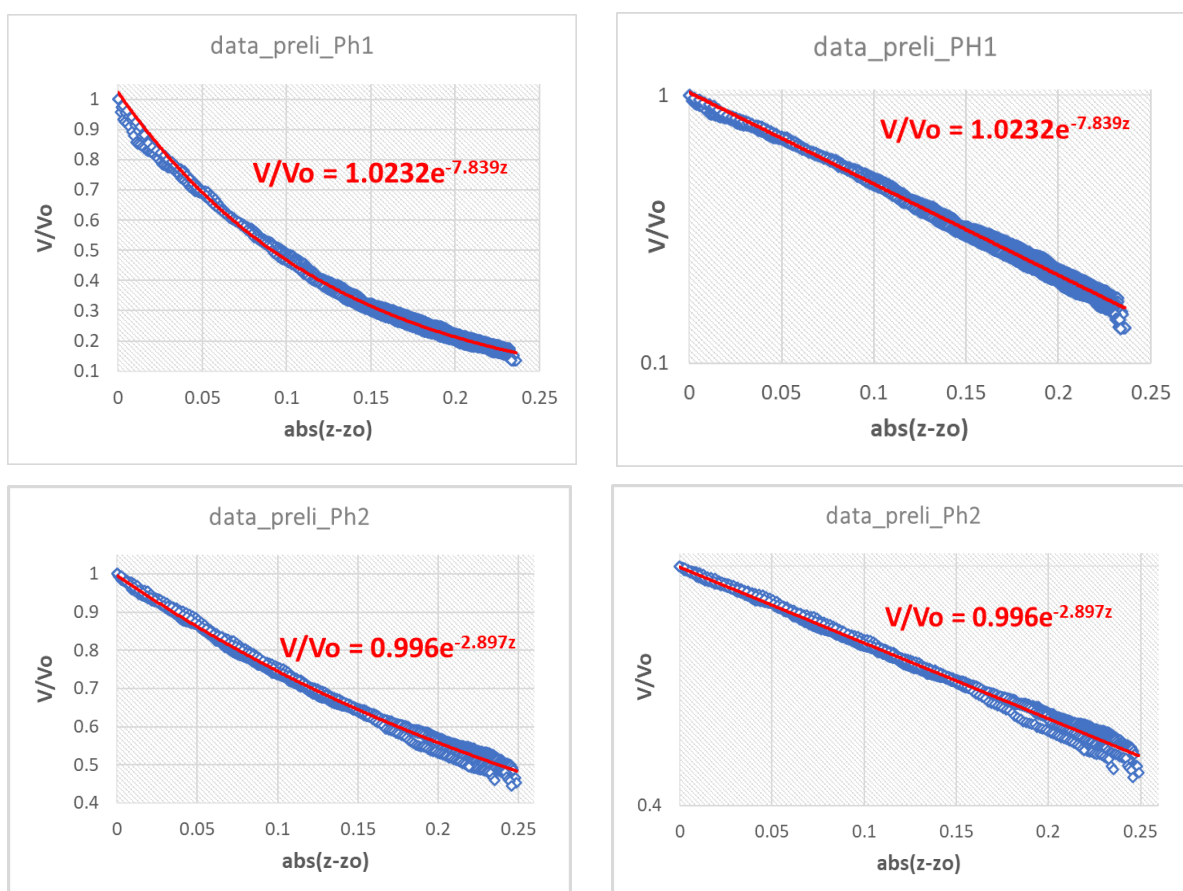
El punto de partida aquí es saber que el valor de  $\gamma$  varía en función de las velocidades iniciales del proyectil de tal manera que disminuye a medida que aumenta la velocidad del proyectil (Huang et al., 2020); esto se puede comprobar fácilmente, por ejemplo, en la **Ilustración 15** ya que vemos cómo la curva de velocidad inicial del proyectil de 0.4 m/s está por debajo de la de 3 m/s. También debemos tener presente en todo momento la **ecuación (3-1)** y como hemos obtenido la **ecuación (3-2)**. Por lo tanto, es importante recordar que la tendencia exponencial de la curva que describe el movimiento del proyectil era del siguiente modo:

$$v = v_0 e^{-\frac{\gamma}{m}z} = v_0 e^{-\alpha z}$$



Donde la pendiente de dicha exponencial es  $\alpha = \frac{\gamma}{m}$ . Para determinar dicha pendiente, la cual sirve para determinar el valor de  $\gamma$  conociendo la masa  $m$  del proyectil, bastaría con transformar la escala lineal del eje vertical  $V/V_0$  a escala logarítmica de base 10 del gráfico  $V/V_0$  VS  $\text{abs}(z-z_0)$ , tal y como podemos apreciar en la **Ilustración 18**. Ahora es más fácil determinar la pendiente cogiendo dos puntos cualesquiera del gráfico semi-logarítmico. Para hallar dicha pendiente de forma manual, es suficiente con escoger dos puntos cualesquiera  $A(a_1, b_1)$  y  $B(a_2, b_2)$  a lo largo de la curva tendencia dada. Por lo tanto, la pendiente sería:

$$\text{pendiente} = \alpha = \frac{\ln b_2 - \ln b_1}{a_2 - a_1}$$



**Ilustración 18**

Los gráficos de la izquierda son los ploteos hechos en Excel de los conjuntos de datos “data\_preli\_Ph1” y “data\_preli\_Ph2”; tal y como habíamos deducido anteriormente, para la “data\_preli\_Ph1” no se considera las velocidades 0.4 m/s y 0.6 m/s y para la “data\_preli\_Ph2” dejamos de lado la velocidad de 0.5 m/s porque se alejan mucho de nuestro modelo. En color rojo se puede observar la curva tendencia que mejor se ajusta a los valores de todas las velocidades para cada conjunto de datos. Los gráficos de la derecha representan los mismos datos, pero con la escala logarítmica (base 10) para el eje vertical  $V/V_0$ .

Recordando la **ecuación (3-2)**, podemos determinar la pendiente para los conjuntos de datos estudiados hasta el momento. Viendo la **Ilustración 18**, vemos que en el caso de “data\_preli\_Ph1” obtenemos una  $\alpha = 7.839$ , por lo que  $\gamma = \alpha \cdot m = 7.839 \cdot 0.023 \approx 0.180$ ; por otro lado, para el caso de “data\_preli\_Ph1” se tiene una  $\alpha = 2.897$ , por lo que  $\gamma = \alpha \cdot m = 2.897 \cdot 0.023 \approx 0.066$ . Vemos cómo estos valores nos coinciden prácticamente con los obtenidos en la simulación (véase **Ilustración 17**).

### **3.4 Utilidad didáctica del código**

Nuestro script o código podrá ser utilizado para generar datos válidos que simulen el comportamiento de un proyectil en un medio granular para el caso de gravedad cero.

La idea es que el estudiante use el código como herramienta adicional a su proyecto de investigación para generar curvas que mejor describan unos datos dados de antemano y pueda llegar a unas conclusiones pertinentes durante el análisis de las curvas exponenciales que obtenga (debería ser capaz de ejecutar un proceso similar al reflejado en el punto **3.3 Análisis de la curva exponencial**). Además, el alumno desarrollará un experimento casero de impactos meteoríticos que le sirva como apoyo a la hora de plasmar sus conclusiones del proyecto. No obstante, esto queda claramente definido en el punto **4.11.1 Física**.

## CAPÍTULO 4. Propuesta didáctica de una actividad experimental en un contexto IB

### 4.1 Introducción

Los apartados que conforman este capítulo se elaboran en base a documentos oficiales del IB:

- “Guía de Física”, Primera evaluación: 2016; Organización del Bachillerato Internacional (2014).
- “El Programa del Diploma: de los principios a la práctica (Para ser utilizado a partir de agosto de 2015)”; Organización del Bachillerato Internacional (2015).

Esto es así porque es la que está directamente relacionada con la temática de este trabajo final de máster y, al mismo tiempo, los datos extraídos y analizados del experimento dado guardan relación con la asignatura de física.

### 4.2 ¿Qué es el Bachillerato Internacional?

La misión del Bachillerato Internacional (en adelante, IB) es fomentar el **entendimiento** y el **respeto intercultural** como aspectos esenciales para la vida contemporánea. Esto es importante con el fin último de obtener un mundo más pacífico y mejor. Al mismo tiempo, el IB tiene fuertes colaboraciones con organizaciones internacionales, establecimientos escolares y gobiernos para desarrollar y crear programas internacionales de educación de alto nivel junto con metodologías de evaluación altamente competentes. En definitiva, el mundo IB permite a los estudiantes adoptar una **actitud activa** de aprendizaje, el cual les servirá para el resto de sus vidas.

Desde su fundación en 1968 en Suiza (Ginebra) y a lo largo de su evolución hasta el presente (véase **Ilustración 19**), la declaración de principios del IB ha fundamentado toda su actividad en torno a la idea de creación de un mundo mejor a través de la educación. Por lo tanto, durante más de 50 años todos los programas han enseñado a más de 1.4 millones de alumnos distribuidos a lo largo de unos 5300 colegios de 158 países.



**Ilustración 19**

*Evolución del Bachillerato Internacional desde su fundación en Ginebra en 1968 (Fuente: <https://ibo.org/es/50years/#1968>).*

**4.3 Organización del IB**

El IB otorga una educación internacional para un perfil de alumnado entre los **3 y 19 años**. Para poder lograr esto el Bachillerato Internacional se divide en **cuatro programas** (véase **Ilustración 20**) que pretenden desarrollar un **pensamiento crítico e independiente** y, al mismo tiempo, fomentar los atributos relacionados con la **indagación, lógica y solidaridad**. Al mismo tiempo, la educación IB da igual importancia tanto al hecho de hacer las preguntas correctas como encontrar las respuestas adecuadas para que así el alumno se desenvuelva en el mundo físico de una manera más eficiente.





#### Ilustración 20

*Programas del Bachillerato Internacional (IB) para alumnos de 3 a 19 años (Fuente: <https://www.ibo.org/es/programmes/>).*

#### 4.4 El modelo del Programa Diploma en el IB

El **Programa del Diploma** (en adelante, PD) es un curso que tiene una duración de dos años en donde el nivel exigido es de preuniversitario (jóvenes entre 16 y 19 años). El currículo aquí abarcado es amplio en donde se forma a estudiantes con espíritu **indagador e informados** y, al mismo tiempo, **sensibles y solidarios** a las necesidades de las personas de su entorno. Este programa pone especial interés en desarrollar una **mentalidad abierta**, el **entendimiento intercultural** y aquellas actitudes que permitan tener una **flexibilidad** en cuanto a la variedad de puntos de vista existentes.

El programa se divide en **seis áreas académicas** de tal manera que engloban a un núcleo (véase **Ilustración 21**). Esta estructura permite que el alumno tenga una visión y, por tanto, una acción basada en lo interdisciplinar. Cada alumno deberá escoger dos lenguas modernas (o una clásica y una moderna), una asignatura del ámbito social o de humanidades, una científica, matemáticas y, finalmente, artes. Lo interesante en todo esto es que el alumno puede enfocar sus estudios superiores de universidad en esta etapa porque le permite elegir las asignaturas que mayor interés despierten en el mismo. Al mismo tiempo, esta estructura es de esta manera porque el perfil de la comunidad de aprendizaje del IB y todos los componentes troncales se localizan en el centro del modelo que lo representa, es decir, se está dando prioridad a la

competencia afectiva y al desarrollo cognitivo, y lo que se está formando son ciudadanos competentes, activos y con conocimientos especializados. Los componentes troncales o elementos del núcleo son:

- **Teoría del Conocimiento (TdC).** Las guías de cada asignatura son unos recursos muy útiles para el profesor a la hora de establecer conexiones entre disciplinas significativas y elementos del núcleo; por lo tanto, los profesores deberán ser capaces de otorgar oportunidades de exploración de estos vínculos. El curso de TdC se centra exclusivamente en la indagación y el pensamiento crítico sobre el proceso de aprendizaje y no tanto en la adquisición de conocimientos específicos. De hecho, examina la naturaleza propia del conocimiento y la forma en la que conocemos lo que afirmamos saber. Para lograr esto, se anima al alumnado a analizar las afirmaciones de conocimiento y, al mismo tiempo, a llevar a cabo una exploración de preguntas sobre la construcción de conocimiento. Dicho de otra manera, TdC se encargará de establecer los vínculos entre las diversas áreas de conocimiento compartido y relacionarlas con el conocimiento personal, y así poder lograr que el alumno sea más consciente de sus perspectivas y de cómo éstas pudieran llegar a interferir con la de otras personas.
- **Monografía.** Esto es una oportunidad que permite a cada alumno investigar sobre un tema que les llame la atención. Para ello, elaboran un trabajo de investigación independiente y con una extensión aproximada de 4000 palabras. Investigarán aquellos temas que estén relacionados con alguna de las asignaturas del PD que estén cursando, mientras que la monografía interdisciplinaria de Estudios del Mundo Contemporáneo deberá elaborarse en relación con dos asignaturas. La monografía permite al alumno familiarizarse con la investigación independiente junto con el tipo de redacción formal propia de la misma y que deberán interiorizar para su labor académica futura en la universidad. El resultado de esto será un trabajo escrito y estructurado según ciertas pautas relacionadas con la investigación en sí. Por lo tanto, la idea aquí es fomentar el desarrollo de habilidades de redacción e investigaciones avanzadas, creatividad y descubrimiento intelectual.
- **Creatividad, Actividad y Servicio (CAS).** El programa CAS centra toda su actividad en desarrollar la identidad del alumno, en base a los principios éticos formulados en la declaración de principios y el perfil de la comunidad de aprendizaje del IB. Este programa ofrece oportunidades de participación a los alumnos en una gran variedad de actividades simultáneas con su actividad de estudio formal en las disciplinas

académicas del PD. El programa CAS cumple con el principio del IB sobre la creación de un mundo mejor y más pacífico, dentro del marco del respeto intercultural y el entendimiento mutuo. Las áreas que lo conforman son tres:

- **Creatividad.** Es la ampliación de ideas a través de la exploración para así dar lugar a un producto (representación original o interpretativa).
- **Actividad.** Esfuerzo físico que permite tener un estilo de vida sano.
- **Servicio.** Se basa en un compromiso colaborativo y recíproco con la comunidad en la que se desenvuelve el estudiante con el fin último de dar una respuesta real a una necesidad auténtica.

Dichos componentes troncales permiten ampliar la experiencia educativa a contextos de la vida real puesto que los alumnos podrán aplicar sus conocimientos y su comprensión en contextos reales de su experiencia de vida. Por lo tanto, contribuyen a una comprensión más profunda de los contenidos que se enseñan en el PD.



#### Ilustración 21

*Modelo del programa del diploma (Bachillerato Internacional) (Fuente: "Guía de Física", Primera evaluación: 2016)*

Para una combinación adecuada, los alumnos deberán de elegir una única asignatura de cada una de las seis áreas académicas o, si lo prefieren, pueden dejar de lado la asignatura de Artes y escoger dos asignaturas de otra área. Esto supone cursar dos lenguas y una asignatura de cada grupo relacionado con Individuos y Sociedades, Ciencias, y Matemáticas. Además, se suele recomendar cursar tres asignaturas (incluso cuatro) en el Nivel Superior (en adelante, NS) y el resto en el Nivel Medio (en adelante, NM), es decir, en el NM se cursan dos asignaturas si en el NS se cursan 4 o, por otro lado, se cursan 3 en NM y 3 en NS; y dedicando en torno a 150 horas a las asignaturas de NM y 240 horas a las de NS. Esto último es obvio porque el NS tiene un alcance más superior y profundo de los contenidos teóricos estudiados.

Tanto en NM como en NS se desarrollan habilidades, sobre todo las de análisis y pensamiento crítico; en donde dichas habilidades se evaluarán de manera externa al finalizar el curso académico.

La educación preuniversitaria debe otorgar a los alumnos de aquellas habilidades y conocimientos necesarios para tener un nivel adecuado y necesario para sus futuros estudios universitarios y vida profesional. El PD fomenta de manera efectiva esta especialización debido a la existencia de los niveles NM y NS, junto con la estructura y evaluación que los conforman.

#### *4.4.1 Perfil de la comunidad de aprendizaje del IB*

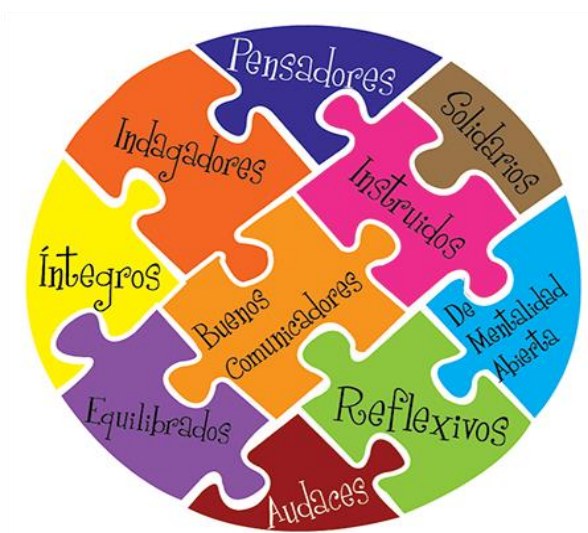
Todos los programas del IB tienen el objetivo principal de formar personas con una **mentalidad internacional** que les permitan crear un mundo más pacífico y mejor. Esto se consigue si, al mismo tiempo, se fomenta una mayor concienciación de la condición de unidad existente entre todos los seres humanos, es decir, que la idea del individualismo no es más que una invención de una mente confusa.

En general, la comunidad de aprendizaje del IB se esfuerza por trabajar y conseguir los diez atributos considerados por los Colegios del Mundo del IB. Esto es así porque el IB considera dichos atributos (véase **Ilustración 22**), entre otros similares, son clave para poder ayudar a las personas y grupos a ser miembros que actúen desde la responsabilidad en aquellas comunidades locales, nacionales y mundiales. Los atributos son:

- **Indagadores.** Se desarrollan las habilidades de investigación e indagación, sin dejar de lado la curiosidad innata del ser humano. Para ello, se fomenta el aprendizaje del alumnado de forma independiente y junto con el resto de sus compañeros. Como resultado, aprender desde el entusiasmo es una consecuencia natural y, al mismo tiempo, genera ansias de aprender durante toda una vida.
- **Informados e instruidos.** La comprensión conceptual se ve desarrollada aquí a través de la exploración del conocimiento en un amplio rango de disciplinas. Es por esto mismo por lo que hay un compromiso con cuestiones e ideas de importancia tanto local como global.
- **Pensadores.** La resolución de problemas complejas que pudieran darse se procede a su resolución mediante el uso de habilidades de pensamiento creativo y crítico. Como resultado, se actúa desde la propia iniciativa durante la toma de decisiones éticas y razonadas.

- **Buenos comunicadores.** Aquí es fundamental poder expresarse con creatividad y confianza en múltiples lenguas, lenguajes y maneras. Esto es fundamental para poder entablar una comunicación fluida con otras personas y grupos a través de la escucha activa. De hecho, la comunicación es fundamental en todo ser humano para que pueda expresar todo lo que piensa y siente en el mundo en el que se desenvuelve.
- **Íntegros.** Se fomenta un actuar basado en la honradez e integridad, en donde se tiene una base sólida del sentido de justicia, equidad y respeto por los derechos y la dignidad de las personas que habitan este planeta. Por lo tanto, se asume la responsabilidad del individuo a la hora del actuar que lleva a cabo en este mundo, junto con las consecuencias que ello supondría a lo largo de su vida.
- **De mentalidad abierta.** Se desarrolla una apreciación crítica de todas las culturas y experiencias personales, junto con las tradiciones y valores del resto de las personas. Es por esto por lo que se desea buscar y considerar puntos de vista distintos y, al mismo tiempo, aprender de la experiencia de vida.
- **Solidarios.** Este punto se fomenta mediante el respeto, empatía y la sensibilidad. Por lo tanto, hay un compromiso para ayudar a los demás a través de un actuar que genere una influencia positiva en la vida de las personas y, también, en el mundo en el que habitamos.
- **Audaces.** La incertidumbre es algo natural en nuestras vidas, por lo que aquí se aborda con determinación y previsión. Consecuentemente, se fomenta un trabajo de manera colaborativa y autónoma con el fin de poder explorar estrategias e ideas innovadoras. Finalmente, cualquier cambio y desafío es llevado a cabo a través del ingenio y la resiliencia, dos aspectos de gran importancia y que tanto se trabajan aquí.
- **Equilibrados.** Un equilibrio físico, emocional y mental es primordial en todo individuo sano, de ahí que el IB lo tiene tan presente con el fin de poder lograr un bienestar propio y el de los demás. Es imposible ejecutar cualquier tarea en nuestra vida de forma eficiente y feliz si no existe un equilibrio interno. Al mismo tiempo, se reconoce una interdependencia con respecto a otras personas y, también, con el mundo que nos rodea.
- **Reflexivos.** Se evalúa con detenimiento el mundo en el que vivimos, y también las ideas propias y experiencias del individuo. Hay un esfuerzo por entender nuestras debilidades y fortalezas para poder tener un aprendizaje y desarrollo personas adecuados.





#### Ilustración 22

Atributos del IB (Fuente: <http://www.ibo.org/>).

### 4.5 Naturaleza de la ciencia

La “**Naturaleza de la ciencia**” es un tema de elevada importancia en las asignaturas de Biología, Física y Química. De hecho, la sección relacionada con este punto se incluye en las guías oficiales de Biología, Física y Química con el fin último de poder ayudar a los profesores a comprender su significado.

La sección “Naturaleza de la ciencia” supone una breve descripción para cada una de las unidades teóricas contenidas en las guías oficiales en donde se hace referencia a dicha naturaleza, es decir, son casos de comprensiones concretas. Por lo tanto, dichos enunciados, que preceden a cada subtema, servirán como manera de resumir uno o más temas de la naturaleza de la ciencia a través de la comprensión y, también, de las habilidades y aplicaciones de dicho subtema. Por ejemplo, tal y como podemos ver en la **Ilustración 23**, tenemos un caso de la sección “Naturaleza de la ciencia” en el tema 1 (Mediciones e incertidumbres) de la guía oficial de Física.

Al mismo tiempo, si vamos a las guías oficiales de cada asignatura, en el apartado específico “Naturaleza de la ciencia”, ahí encontraremos que dicha sección estará estructurada en párrafos (1.1, 1.2, etc.) para poder vincular los puntos más importantes del programa (véase **Ilustración 23**) que hacen alusión a la naturaleza de la ciencia. Estos puntos se organizan en los siguientes apartados:

1. Las ciencias y la actividad científica.
2. La comprensión de las ciencias.
3. La objetividad de las ciencias.

4. La faceta humana de la ciencia.
5. Alfabetización científica y la percepción de la ciencia por parte de la sociedad.

## Tema 1: Mediciones e incertidumbres

5 horas

**Idea fundamental:** Desde 1948, el Sistema Internacional de Unidades (SI) se ha utilizado como lenguaje preferente de las ciencias y la tecnología en todo el mundo y refleja las mejores prácticas actuales en el ámbito de las mediciones.

### 1.1 Las mediciones en la física

#### Naturaleza de la ciencia:

Terminología común: desde el siglo XVIII, los científicos han tratado de establecer sistemas comunes de medidas para facilitar la colaboración internacional en las disciplinas científicas y garantizar así la posibilidad de repetición y comparación de los hallazgos experimentales. (1.6)

Avances en la instrumentación: los avances en los aparatos y la instrumentación, como el uso de la transición de los átomos de cesio-133 en relojes atómicos, han contribuido a lograr definiciones más precisas de las unidades normalizadas. (1.8)

Certidumbre: aunque se suele imaginar a los científicos buscando respuestas "exactas", siempre existe una incertidumbre inevitable en toda medida. (3.6)

#### Comprensión:

- Unidades del SI fundamentales y derivadas
- Notación científica y multiplicadores métricos
- Cifras significativas

#### Mentalidad internacional:

- La colaboración científica puede ser auténticamente global sin las restricciones de las fronteras nacionales o de idioma gracias a las normas acordadas para la representación de datos.

### Ilustración 23

*Sección "Naturaleza de la ciencia" en el tema 1 (Mediciones e incertidumbres) de la guía oficial de Física. Esta sección aparece en cada uno de los temas teóricos que hay a lo largo de toda la guía.*

## 4.6 Naturaleza de la física

Dado que este Trabajo Final de Máster está enfocado hacia la rama de la disciplina de la física, esto es la razón primordial de la descripción de este punto.

La física siempre está intentando dar una explicación sobre el comportamiento del universo desde las partículas más pequeñas que lo conforman a las grandes distancias intergalácticas.

La mecánica newtoniana, la termodinámica y el electromagnetismo fueron las bases sobre la que se fundó la física clásica en donde, gracias a la cual, se pudo adquirir un conocimiento más profundo del universo a gran escala.

Con el paso de los siglos, surgió la mecánica cuántica y la relatividad general como necesidad a la hora de intentar describir el universo a pequeña escala (comportamiento de los átomos).

A pesar de toda la historia que ha habido detrás de la física, todavía hay ciertos aspectos que permanecen invariables. Las **observaciones** siguen siendo imprescindibles para la física ya que exigen un ejercicio de imaginación para poder decidir qué buscar. Los modelos se crean como intento de poder entender dichas observaciones, y si funcionan se convertirán en teorías. A modo de símil, este proceso es similar al que se lleva a cabo en literatura, arte y música, aunque difiere en un aspecto: las predicciones establecidas por las ideas o teorías deberán ser

comprobadas a través de una experimentación cuidadosa. Es decir, sin comprobaciones no es posible valorar una teoría.

Todos los procesos científicos que se han llevado a cabo en el pasado son idénticos a los que los físicos actuales están llevando actualmente y, de hecho, también están al alcance de los alumnos en los colegios. Al principio, los físicos eran teóricos – experimentales, y esto ha ido creciendo en complejidad hasta tal punto que ser un experto en el campo resulta muy complicado ya que requiere de una gran dedicación y esfuerzo personal. Es por esto mismo por lo que los alumnos deberán ser conscientes de todo ello, aunque también deberán tener en cuenta que es un intercambio rápido y libre entre ideas teóricas y resultados experimentales publicados en la literatura científica, donde dicho intercambio mantendrá los vínculos importantes entre dichos ámbitos.

Consecuentemente, en los centros educativos es primordial que el alumnado aborde tanto el aspecto experimental como el teórico, puesto que esto es lo normal en la comunidad científica. Por lo tanto, la disciplina de la Física del Programa del Diploma permitirá a los alumnos desarrollar técnicas prácticas tradicionales y habilidades y profundizar su propia capacidad en el uso de las matemáticas, el cual es el lenguaje de la física. Además, esto permite fomentar las habilidades de comunicación digital e interpersonal en los alumnos; dichas habilidades serán imprescindibles en el desarrollo científico moderno.

Por último, el curso de Física contiene los principios básicos de dicha asignatura, pero también, a través de la elección de una opción, otorga al profesorado cierta flexibilidad para poder adaptar el curso a las necesidades propias de los alumnos. El curso está disponible tanto en el nivel medio (NM) como en el nivel superior (NS) de tal manera que esto permitirá una mejor adaptación del alumnado que desee estudiar física como disciplina principal en la educación superior y aquellos alumnos que no lo deseen.

#### **4.6.1 Enfoques de enseñanza**

La enseñanza llevada a cabo en física se puede ejecutar desde múltiples maneras. Dada su naturaleza, la física se basa en la aplicación de un método experimental, con lo que se espera su ejecución y puesta en práctica a lo largo del curso. El orden en el que se muestran los temas de estudio en la guía oficial no es algo indicativo a la hora de impartirlo en el mismo orden; es



el profesor quien elige el orden en base a sus propias circunstancias y a las del alumnado que tiene.

#### 4.6.2 *Las ciencias y la dimensión internacional*

Podemos ver fácilmente cómo la ciencia es una actividad que se ejecuta a nivel internacional en colaboración con distintos países dependiendo de la naturaleza de la misma. De hecho, este intercambio de ideas e información ha sido y siempre será clave para su progreso. Esto puede verse con gran facilidad con el desarrollo actual de vacunas y su implementación en la sociedad a nivel global debido a la pandemia mundial del coronavirus. Por esto mismo, el programa de estudios de las guías del Grupo 4 contienen vínculos que aportan información útil a la hora de ilustrar los aspectos internacionales de la ciencia.

Existen cientos de organismos internacionales que favorecen la investigación científica. Por ejemplo, las Naciones Unidas cuentan con diversos organismos conocidos como el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Educativa, Científica y Cultural de las Naciones Unidas (UNESCO, en inglés *The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), en donde el papel de la ciencia es primordial. Es aquí donde se anima al profesorado y al alumnado del Grupo 4 que hagan uso de los sitios web y bases de datos de estos organismos científicos internacionales para tener un mayor contacto con la dimensión internacional.

Cada vez hay una mayor consciencia de que numerosos problemas científicos son de naturaleza internacional; por lo tanto, se ha adoptado una perspectiva global en diversos ámbitos de investigación. Por ejemplo, el problema actual del cambio climático es un problema global que concierne a todos y cada uno de nosotros puesto que nos afectará de un modo u otro a corto y/o largo plazo. Por lo tanto, en el terreno práctico, el **proyecto del Grupo 4** tiene una gran semejanza con el trabajo realizado por científicos profesionales ya que se fomenta la colaboración entre centros educativos de diferentes regiones nacionales y/o internacionales.

El conocimiento científico tiene un gran poder de transformación de las sociedades. Si se usa adecuadamente puede proporcionar grandes ventajas a la humanidad, pero si hace un uso inadecuado del mismo, podría provocar más daños de los esperados a la humanidad y al medio ambiente. Es por esto por lo que, en concordancia con la declaración de principios del IB, todo alumno que curse las asignaturas del Grupo 4 deberá ser consciente de la **responsabilidad moral** que deben tener los científicos a la hora de garantizar el acceso a los datos científicos y los conocimientos de igual manera a nivel internacional y, también, de que dispongan de

suficientes recursos para poder utilizar dicha información de forma adecuada a la hora de fomentar el desarrollo de sociedades sustentables.

En definitiva, el profesor deberá asegurarse de guiar la atención del alumno hacia las secciones del programa de estudios donde haya vínculos con una **mentalidad internacional**.

## **4.7 La evaluación en el Programa del Diploma**

### **4.7.1 Introducción**

Toda evaluación en el PD tiene el propósito de apoyar los objetivos recogidos en el currículo y, con ello, fomentar un óptimo aprendizaje de todo el alumnado. Por lo tanto, es una parte esencial del aprendizaje y de la enseñanza. En el PD existen dos evaluaciones: una interna y otra externa. Por un lado, los trabajos que se vayan a preparar para una evaluación externa son corregidos por examinadores que forman parte de la comunidad IB; por otro lado, aquellos trabajos que se vayan a presentar para la evaluación interna serán corregidos por profesores y moderados externamente por el IB.

Así mismo, en el IB se reconocen dos tipos de evaluación.

- **Evaluación formativa:** Orienta el aprendizaje y la enseñanza. Engloba aquellas actividades elaboradas por el profesorado o su alumnado para así ofrecer valiosa información que podrá ser usada para modificar estas actividades de aprendizaje y enseñanza en las que se ven involucrados. Es decir, proporciona un *feedback* tanto a alumnos como profesores sobre el progreso que están llevando a cabo en lo referente al tipo de aprendizaje (puntos débiles y fuertes de los alumnos, lo cual es la base para el profesor a la hora de implementar cualquier cambio o mejora mediante el desarrollo de la comprensión y aptitudes). Por lo tanto, la evaluación formativa tiene como fin último mejorar la calidad de la enseñanza puesto que es una herramienta muy útil para conocer si realmente existe un alcance de los objetivos generales y, también, aquellos objetivos de evaluación del curso.
- **Evaluación sumativa:** Se basa en un excelente resumen del aprendizaje en un momento puntual a lo largo del curso académico después de que los alumnos hayan trabajado una serie de conceptos teóricos, contenidos, junto con un desarrollo óptimo de habilidades. Es decir, se emplea esta evaluación para determinar los logros de los alumnos.

En el PD se hace uso de una evaluación sumativa al final del curso con el fin de identificar los logros de los alumnos.

La evaluación en el IB se lleva a cabo teniendo presente criterios establecidos; dicho en otras palabras, todo trabajo llevado a cabo por los alumnos se evalúa teniendo presente en todo momento sus niveles de logro y no en relación con el trabajo desarrollado por el resto de los alumnos.

#### 4.7.2 Evaluación externa

Para poder evaluar a los alumnos se emplean esquemas de calificación detallados, los cuáles son únicos dependiendo de si estamos en NM o NS.

La estructura de la evaluación externa tanto para NM como NS es la misma. En ambos niveles se llevan a cabo tres pruebas: Prueba 1, Prueba 2 y Prueba 3. Sin embargo, tal y como puede observarse en la **Ilustración 24** y la **Ilustración 25**, cada prueba tendrá duraciones, contenidos y puntuaciones diferentes.

#### 4.7.3 Evaluación interna

La evaluación interna es obligatoria tanto en el NM como en el NS. A través de ella, el alumno podrá demostrar el uso y aplicación de sus **habilidades** y **conocimientos** y, al mismo tiempo, enfocarse hacia lo que realmente le resulta de gran interés personal **sin tener restricciones de tiempo y de otro tipo relacionadas con los exámenes escritos**. Por esto mismo, la evaluación interna deberá integrarse fácilmente en la enseñanza normal de clase, es decir, no tendrá que ser una actividad extra fuera de los contenidos formales del curso.

Además, los requisitos de esta evaluación interna serán los mismos tanto para el NM como para el NS.

Por otro lado, los trabajos que el alumno vaya a presentar como parte de la evaluación interna deben de ser totalmente originales. No obstante, aquí es crucial que el profesor les ayude en la selección del título y del tema a desarrollar y, durante su desarrollo, que les pueda servir como guía en todo momento. Por lo tanto, el profesor desempeñará un papel importante a la hora de la planificación y elaboración del trabajo propio de la evaluación interna. Por esto mismo, es labor del docente asegurarse de que el alumno se encuentre familiarizado con los siguientes puntos:

- Criterios de evaluación. Los alumnos tienen que ser conscientes de estos criterios puesto que es lo que definirá su calificación final.
- Política del IB sobre la experimentación con animales.
- Requisitos básicos acerca del tipo de trabajo a desarrollar y que se va a evaluar internamente.

Es importante entender que el profesor tiene una función de orientador en la elaboración del trabajo por parte del alumno. Por lo tanto, es lógico que el alumno solicite un *feedback* acerca de cómo va realizando dicho informe a través de entregables o borradores. Al mismo tiempo, el docente se asegurará de que el alumno elabora un trabajo original en su totalidad evitando así problemas de plagio. En definitiva, el profesor deberá tener las siguientes funciones como orientador del alumno a la hora de elaborar cualquier trabajo personal:

- **Propuesta inicial** dada por el alumno y *feedback* del docente.
- Asegurarse de que el alumno entienda cómo se han de citar las **referencias bibliográficas citadas** en un formato convencional.
- Revisión del **borrador del trabajo escrito**.
- Asegurar un **estilo de redacción** conforme las capacidades propias del alumno demostradas con trabajos hechos previamente a lo largo de su vida académica en el centro.
- Asegurarse de que el trabajo cumple todo lo correspondiente con la temática de los **plagios**.

De hecho, no está permitido hacer un mismo trabajo tanto para la evaluación interna como para la Monografía.

Lo recomendado aquí es asignar al trabajo de evaluación interna un total de 10 horas lectivas tanto en el NM como en el NS. En dichas horas se deben de tener presente los siguientes aspectos:

- Tiempo empleado por el docente para poder explicar al alumnado todos los requisitos de la evaluación interna.
- Tiempo usado en clase por parte de los alumnos cuando trabajen en el componente de evaluación interna y, al mismo tiempo, planteen las preguntas oportunas que pudieran ir surgiendo.
- Tiempo dedicado para consultas o dudas que surjan entre el profesor y cada alumno.

- Tiempo empleado para la revisión del trabajo y evaluación del mismo para observar en todo momento como va progresando, y también asegurarse de que no hay problemas de plagio.

#### **4.7.4 Empleo del criterio de evaluación para la evaluación interna de física**

Tal y como habíamos mencionado en el punto anterior, el profesor se centra en verificar la autoría original de todo trabajo llevado a cabo por cada alumno para su debida moderación o evaluación; aquí deben asegurarse de que ninguno de dichos trabajos suponga un caso de infracción académica.

Cada investigación llevada a cabo en el IB es un trabajo individual basado en distintos datos recabados o mediciones generadas. Aquí, lo ideal sería que cada alumno pudiera trabajar en la obtención de datos de manera individual. Sin embargo, en nuestra propuesta de este trabajo final de máster, dada la poca cantidad de horas que deben de dedicar al Proyecto Grupo 4 y la gran complejidad que supondría obtenerlos, entonces el profesor facilitaría los datos oportunos y relacionados con la investigación en el momento.

Dado que es un trabajo en grupo, el profesor deberá asegurarse que la cantidad de trabajo sea equitativa y de acorde al número de horas individual correspondiente para cada alumno integrante en el equipo. Por ejemplo, si un grupo hace un trabajo de física, la toma de datos podría ser tan grande que suponga trabajo suficiente para todos los integrantes del grupo a la hora de manipularlos y estudiarlos.

Los **requisitos de evaluación interna** son idénticos para el NM y el NS y, también, para las asignaturas de Biología, Química y Física. Además, supone un 20% de la evaluación final en ambos cursos (véase **Ilustración 24** y la **Ilustración 25**). Este porcentaje deberá poder verse reflejado en el tiempo que vayan a dedicar tanto a la enseñanza de los conocimientos como las habilidades necesarias del alumnado para poder llevar a cabo el trabajo de evaluación interna, así como el tiempo total dedicado a ejecutar y elaborar el trabajo.

Por lo tanto, los **criterios de evaluación** que se deben de seguir tanto en el NM como en el NS son “Compromiso personal”, “Exploración”, “Análisis”, “Evaluación” y “Comunicación” (véase **Ilustración 26** y **Tabla 1**).

Componente	Porcentaje con respecto al total de la evaluación (%)	Porcentaje aproximado con respecto a los objetivos de evaluación		Duración (horas)
		1 + 2	3	
<b>Prueba 1</b>	20	10	10	1
<b>Prueba 2</b>	36	18	18	2¼
<b>Prueba 3</b>	24	12	12	1¼
<b>Evaluación interna</b>	20	Cubre los objetivos de evaluación 1, 2, 3 y 4		10

**Ilustración 24**

*Resumen de evaluación general (NS) (Fuente: "Guía de Física", Primera evaluación: 2016).*

Componente	Porcentaje con respecto al total de la evaluación	Porcentaje aproximado con respecto a los objetivos de evaluación		Duración (horas)
		1 + 2	3	
<b>Prueba 1</b>	20	10	10	¾
<b>Prueba 2</b>	40	20	20	1¼
<b>Prueba 3</b>	20	10	10	1
<b>Evaluación interna</b>	20	Cubre los objetivos de evaluación 1, 2, 3 y 4		10

**Ilustración 25**

*Resumen de evaluación general (NM) (Fuente: "Guía de Física", Primera evaluación: 2016).*

Compromiso personal	Exploración	Análisis	Evaluación	Comunicación	Total
2 (8%)	6 (25%)	6 (25%)	6 (25%)	4 (17%)	24 (100%)

**Ilustración 26**

*Criterios de evaluación interna (Fuente: "Guía de Física", Primera evaluación: 2016).*

Nombre	Descripción
Compromiso personal	Este criterio evalúa el compromiso individual de cada alumno en lo referente con la exploración que lleva a cabo a lo largo de la investigación científica dada. Por ejemplo, el pensamiento independiente, creatividad o iniciativa en el diseño, la presentación de la investigación o implementación son distintos atributos y habilidades que se pueden considerar en este punto.
Exploración	Aquí se evalúa hasta qué punto el alumno es capaz de establecer el contexto científico del trabajo, es decir, el planteamiento claro de la pregunta de investigación junto con un lenguaje científico de acorde a su nivel académico. Aquí también se tienen en cuenta la seguridad (ambientales y éticas).
Análisis	Este criterio evalúa hasta qué punto el informe de investigación científico del alumno aporta argumentos coherentes para defender las hipótesis consecuentes de la pregunta de investigación inicial. Por lo tanto, el análisis de los datos de proyecto, así como su registro y procesamiento, son aspectos que se consideran aquí. En otras palabras, se evalúa la manera a la que se llega a la conclusión o conclusiones del proyecto en sí.
Evaluación	Aquí evaluamos de qué manera el informe del alumno ha supuesto lo suficientemente sólido como para evaluar la investigación perseguida, junto con los resultados obtenidos de acorde a la pregunta de investigación inicialmente planteada.
Comunicación	Aquí se evalúa la presentación de la investigación y su informe en el sentido de la eficacia de transmisión de la información.

**Tabla 1**

*Criterios de evaluación interna (Fuente: "Guía de Física", Primera evaluación: 2016).*

En otras palabras, aquí los alumnos deben aprender que el propósito de todo esto no es obtener una calificación y ya está, sino más bien que sean conscientes de la reflexión y acción que llevan a cabo a lo largo de todo ello en donde su **progreso es evaluado exclusivamente en esta evaluación interna.**

#### 4.8 Metodología

Dado que estamos en una comunidad de aprendizaje del IB, esto es sinónimo de que el proceso de aprendizaje llevado a cabo supone un abanico de **responsabilidades humanas y capacidades** que logran llegar **más allá del éxito académico.**

Por lo tanto, esto consigue que los individuos implicados en esta comunidad tengan una **actitud de ayudar** a los demás miembros en términos de respeto a sí mismos, a los demás y al mundo que los rodea. Es decir, el objetivo primordial en la metodología llevada a cabo aquí es la de desarrollar una **mentalidad internacional** para fomentar mayores niveles de conciencia entre los seres humanos para crear un mundo mejor y más pacífico.

En definitiva, este Programa de Diploma (DP), al igual que los otros 3 programas que existen (Programa de Escuela Primaria o PEP, Programa de Años Intermedios o PAI, y el Programa



de Orientación Profesional o POP), se compromete con la tarea de desarrollar el perfil de la comunidad de aprendizaje del IB en los alumnos. Por lo tanto, este perfil forma alumnos que sean **indagadores, informados e instruidos, pensadores, buenos comunicadores, íntegros, de mentalidad abierta, solidarios, audaces, equilibrados y reflexivos.**

Además, la meta final de este programa PD, al igual que los otros 3, es la de ayudar a los alumnos a explorar y construir sus identidades culturales y personales.

De acorde a la “Guía de Física”, la educación IB:

- **Se centra** exclusivamente **en los alumnos**, por lo que el alumno tiene un papel activo y el profesor actúa como guía y facilitador.
- Tiene un desarrollo eficaz de los enfoques de enseñanza y aprendizaje. De hecho, la investigación que se pueda llevar a cabo a lo largo de los programas de estudio es **participativa y colaborativa.**
- Indaga sobre **contenidos significativos** de tal manera que esto incremente la comprensión disciplinaria e interdisciplinaria. Es decir, los alumnos han interiorizado de manera casi natural la forma de trabajo de distintas disciplinas con una perspectiva y visión de interconexión entre todas ellas.
- La enseñanza se lleva a cabo en **contextos globales**, de tal manera que los alumnos adquieren soltura en el manejo de varios idiomas.
- No se tiene solo en cuenta los exámenes estandarizados a la hora de evaluar a los alumnos. También se evalúa fuertemente el progreso de estos durante su aprendizaje.
- Los alumnos adquieren un rol de saber cómo resolver cualquier problema que se les plantee.

Por último, los **cinco enfoques del aprendizaje** (habilidades sociales, desarrollar habilidades de pensamiento, habilidades de autogestión, habilidades de investigación y habilidades de comunicación) fusionados con los **seis enfoques de la enseñanza** (centrada en conceptos, enseñanza basada en la indagación, colaborativa, contextualizada, guiada por la evaluación y diferenciada) suponen la base de la pedagogía del IB.



## 4.9 El esquema práctico de trabajo (PSOW)

El esquema práctico de trabajo (en inglés, *The Practical Scheme of Work* o PSOW) es parte del requerimiento del programa de estudios IB para cualquiera de las asignaturas de ciencias que abarcan el Grupo 4. Este punto de estudio experimental supone una gran responsabilidad y compromiso por parte del profesor a la hora de asegurarse de que los estudiantes estén muy bien preparados para su futura labor científico-experimental a la hora de cursar estudios superiores relacionados. Esto es una responsabilidad desde el momento en el que el 20% de toda la puntuación que obtiene el estudiante en su expediente final académico supone el nivel de eficacia con el que ha llevado a cabo la “Investigación”, junto con un proyecto personal profundo el cual supone una parte importante del esquema práctico de trabajo. De hecho, el profesor debe estar comprometido desde la etapa de diseño del plan de aprendizaje durante los dos años del curso académico ya que supone un gran consumo de tiempo (Dickinson, 2014).

### 4.9.1 Distribución temporal

Los estudiantes de NM deben completar un mínimo de 40 horas de trabajo práctico, mientras que los de NS deberán emplear en torno a 60 horas (en ambos casos, este tiempo incluye un máximo de 10 horas empleado en el Proyecto Grupo 4 pero excluye el tiempo dedicado a redactar el trabajo de laboratorio), tal y como podemos ver en la **Tabla 2** (Dickinson, 2014).

	Horas NM	Horas NS
Actividades prácticas	20	40
Investigación individual (evaluación interna)	10	10
<b>Proyecto Grupo 4</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
Esquema práctico de trabajo	40	60

**Tabla 2**

*Horas empleadas para el esquema práctico de trabajo en los niveles medio (NM) y superior (NS) (Dickinson, 2014).*

La duración del Proyecto de grupo 4 es de aproximadamente **10 horas** (véase subapartado **Distribución del tiempo**, “Guía Física”; Primera Evaluación: 2016; p. 139), en donde se recomienda en las guías oficiales de cada asignatura de distribuirlas a lo largo de varias semanas, lo cual se considera apropiado para poder desarrollar y entender el proyecto en su totalidad.

Los estudiantes de nivel medio (NM) y superior (NS) llevarán a cabo algunas de las mismas investigaciones; esto será realmente útil cuando, en centros educativos pequeños, las clases de

NM y NS están mezcladas. Solamente entre 2 y 3 horas podrán ser utilizadas del trabajo de investigación después de la fecha límite para presentar el trabajo del moderador en donde dichas horas se tendrán en cuenta en el número total de horas que supone el esquema práctico de trabajo (Dickinson, 2014).

#### *4.9.2 Alcance del programa de estudios*

A la hora de diseñar el esquema práctico de trabajo, los profesores deberán considerar tanto el alcance como la profundidad del programa de estudios. Por ejemplo, puede ser muy tentador llevar a cabo muchos experimentos en el laboratorio a la hora de impartir el tema de Mecánica (gravitación, fuerzas, etc.) y Electricidad a expensas de cubrir las secciones, por ejemplo, del tema de Física Nuclear y Cuántica. Esto hecho sucede de tal manera que existen temas teóricos de estudio en donde se puede llevar a cabo un estudio más experimental y no tan teórico como puede suceder con otros temas teóricos más abstractos; tanto en un caso como en otro, es aquí donde el profesor deberá ser capaz de llevar a cabo la mayor cantidad de experimentos e investigaciones en los temas de estudio aptos para tal fin. Sin embargo, no es obligatorio que los estudiantes realicen investigaciones de todos los temas del programa (Dickinson, 2014).

#### *4.9.3 Planificación del PSOW*

Los profesores tienen total libertad a la hora de formular sus propios esquemas prácticos de trabajo mientras escogen aquellas actividades prácticas de acorde con los requisitos establecidos. Sus elecciones deberán estar basadas en los siguientes puntos:

- Materias, niveles y opciones impartidas.
- Las necesidades de los estudiantes.
- Recursos disponibles.
- Metodologías de enseñanza utilizadas.

Cada esquema debe incluir algunos experimentos complejos que supongan un reto para los estudiantes desde el punto de una gran demanda de conceptos teóricos aprendidos con anterioridad. Si solo se ejecutan experimentos de laboratorio sencillo, como pudieran ser ejercicios de rellenar tablas o marcar casillas, entonces esto no proporciona una experiencia de aprendizaje adecuada a los estudiantes (Dickinson, 2014).

Un estricto compromiso por el profesor a las directrices señaladas por la evaluación interna del IBO es vital para que cada estudiante pueda cumplir con sus obligaciones en términos de tiempo y contenidos teóricos. Dicho esto, dentro del PSOW, la Investigación permite al

estudiante demostrar la puesta en práctica de sus habilidades y conocimiento, y perseguir sus intereses personales; todo esto sin tener las limitaciones temporales y otras asociadas con los exámenes escritos, y por lo que en este sentido puede suponer un mayor disfrute del curso de Física (Dickinson, 2014).

#### 4.9.4 Tipos de experimentos

El programa práctico es lo suficientemente flexible como para cubrir un amplio rango de actividades prácticas que puedan llevarse a cabo. (Dickinson, 2014) propone los siguientes tipos:

- Experiencias de laboratorios breves y proyectos ejecutados a lo largo de varias semanas.
- Simulaciones de ordenador.
- Empleo de bases de datos para análisis y estudio de datos secundarios.
- Desarrollo y uso de modelos.
- Ejercicios de recolección de datos como, por ejemplo, cuestionarios o encuestas.
- Trabajo de campo.

Aunque los requerimientos para la Evaluación Interna están centrados en la Investigación, los diferentes tipos de actividades prácticas que puede realizar un estudiante sirven para otros fines incluyendo (Dickinson, 2014):

- Ilustración, enseñanza y refuerzo de conceptos teóricos.
- Desarrollar una apreciación de la naturaleza práctica, lo cual es esencial para la gran parte del trabajo científico
- **Desarrollar una apreciación del uso de datos secundarios provenientes de bases de datos por parte de los científicos.**
- Desarrollar una apreciación del uso de los modelos por parte de los científicos.
- Desarrollar una apreciación de las ventajas y limitaciones de la metodología científica.

#### 4.9.5 Evaluación

No todos los trabajos prácticos tienen que ser evaluados de acuerdo con los criterios de evaluación interna del IB. A menudo, los alumnos utilizan, por ejemplo, instrumentos de laboratorio para apoyar su aprendizaje y, sin embargo, el trabajo no va a ser evaluado. Las horas dedicadas a trabajos prácticos informales y no evaluados también pueden incluirse en las 40 o 60 horas. De hecho, el único trabajo del alumno que debe ser evaluado es la **Investigación**.

Sin embargo, puede ser aconsejable utilizar las rúbricas de criterios de calificación de manera formativa para algunas de las otras actividades prácticas con el fin de que los estudiantes tengan una idea de cómo van a ser evaluados antes de que se lleve a cabo la Investigación sumativa y se envíe a IBO para su moderación.

Una cantidad mínima de investigaciones no está especificada por el IBO, de tal manera que los profesores tienen bastante libertad para llevar a cabo varios pequeños experimentos o, por otro lado, una cantidad menor de los mismos, pero con un mayor alcance; esto varía en función de las necesidades y desempeño del alumnado. Lo interesante aquí puede ser hacer una combinación entre ambos para buscar un equilibrio. De hecho, aquellos experimentos que tengan un mayor alcance les brindarán una oportunidad a los estudiantes de **explorar** el tema científico con mucho más detalle, lo cual podrá ser evaluado de acuerdo con el criterio de **Exploración** (véase *criterios de evaluación interna*; **Tabla 1**).

#### 4.9.6 Proyecto Grupo 4

Durante las clases normales de estudio, los estudiantes trabajan de forma individual o en parejas. Por lo tanto, el propósito del **Proyecto del Grupo 4** es que los alumnos vayan conociendo el hecho de que la ciencia se basa en una actividad grupal llevada a cabo por diversos equipos. En lugar de grupos científicos distintos de físicos o químicos, los científicos trabajan como una mezcla de diferentes disciplinas con matemáticos, editores, *managers* y expertos financieros. Por lo tanto, esto es una oportunidad para que los estudiantes de diferentes disciplinas académicas trabajen juntos para investigar un tema científico común desde distintas perspectivas.

El **Proyecto del Grupo 4** (“Guía Física”; Primera Evaluación: 2016; p. 151) es una **actividad interdisciplinaria** en donde deben participar todos los alumnos de ciencias del PD (véase **Ilustración 27**). Con esto, el objetivo es que alumnos de diferentes asignaturas del **Grupo 4** analicen un **tema de estudio en común** y así llevar a cabo un intercambio de conceptos y percepciones de las distintas disciplinas (de acuerdo al **objetivo general 10** “*Desarrollar la comprensión de las relaciones entre las distintas disciplinas científicas y su influencia sobre otras áreas de conocimiento*”; véase apartado **Objetivos generales**, “Guía Física”; Primera Evaluación: 2016; p. 20). Las **asignaturas** que conforman el **Grupo 4** son las de **ciencias experimentales** (física; química; biología; informática; tecnología del diseño; sistemas ambientales y sociedades; y ciencias del deporte, el ejercicio y la salud).

El Proyecto debe suponer una experiencia de colaboración destacada principalmente por los **procesos** que lo conforman y no tanto los **productos** de la actividad en sí. Además, los estudiantes involucrados en este proyecto apreciarán las **implicaciones medioambientales, sociales y éticas** de la ciencia en su proceso de investigación.

Al mismo tiempo, la **experiencia colaborativa** que se consigue a **nivel de centro** y junto con **otros centros educativos** permite a los estudiantes a experimentar los problemas y condiciones de otras partes del mundo y, al mismo tiempo, ser más conscientes de que la humanidad es un gran equipo a lo largo de todo el planeta.

Por lo tanto, tendremos **4 modelos (A, B, C y D)** (véase apartado **Proyecto Grupo 4**, “Guía Física”; Primera Evaluación: 2016; p. 161), para elegir de acorde a nuestras necesidades e intereses:

- **Modelo A: grupos interdisciplinarios y un único tema.** Este modelo puede ser interesante para que todo el alumnado del centro trabaje en un único tema; para ello, habrá numerosos grupos que realizarán diferentes tareas.
- **Modelo B: grupos interdisciplinarios con más de un tema.** El centro ofertará varios temas a trabajar cuando sea un centro que disponga de un gran número de alumnos.
- **Modelo C: grupos de una sola asignatura.** Este modelo no es recomendable ponerlo en práctica porque no se fomenta la interdisciplinariedad entre diferentes asignaturas.
- **Modelo D: colaboración con otro colegio.** El IB usará el CPEL como herramienta para crear un hilo de discusión o foro donde los colegios pueden publicar sus ideas de proyectos con la idea de que otros centros puedan colaborar. Dicha colaboración puede ser de cualquier tipo, desde el hecho de compartir la evaluación de los resultados de un tema común hasta la colaboración plena en cada una de las etapas que se den en el proyecto dado.

En nuestro caso, dado que deseamos colaborar con otros centros educativos se escoge el **modelo D**. De hecho, si hay grandes diferencias horarias y no se pudieran tener sesiones en vivo con otros centros, se puede proceder al uso de páginas web comunes y editores de texto en línea para compartir el progreso mutuo.



### Ilustración 27

Mapa conceptual sobre el Proyecto Grupo 4 (Fuente: elaboración propia).

En definitiva, se espera poder desarrollar los siguientes aspectos del Proyecto Grupo 4:

- **Colaboración interdisciplinaria** (a nivel de centro educativo y junto con otros centros).
- Apreciación de las **implicaciones de la ciencia** y de las **limitaciones del estudio científico**.
- Desarrollo del **trabajo en equipo**.
- Desarrollo de la **capacidad de planificación**.
- Intercambio o **puesta en común** tanto de los datos recogidos como de las cuestiones planteadas.
- Aproximadamente **10 horas de participación**.

#### 4.9.7 Etapas del Proyecto Grupo 4

Las 10 horas que supone el Proyecto Grupo 4, dentro de las cuales forman parte del tiempo de enseñanza reservado para desarrollar el esquema de trabajo práctico (PSOW), puede ser dividido en tres etapas:

- **Planificación.** Esta etapa es importante para el desarrollo posterior de todo el ejercicio. Es recomendable que tenga una duración de **dos horas**. Aquí, una estrategia eficiente puede ser que los estudiantes definan tareas específicas por ellos mismos (individualmente o en grupo con el resto de los miembros) y puedan investigar varios aspectos de un tema escogido, según las disciplinas científicas de cada miembro del grupo. En esta etapa, si el proyecto será experimental es preciso definir la instrumentación que se va a utilizar para no generar futuros retrasos a la hora de su uso en el laboratorio. Al mismo tiempo, si se desea llevar a cabo este proyecto en

colaboración con otros centros, este momento es el idóneo para ponerse en contactos con ellos. Por lo tanto, tenemos las siguientes consideraciones:

- La etapa de planificación podría darse en una única sesión, o dos o tres sesiones más cortas.
- Esta etapa debe involucrar a todos los estudiantes del Grupo 4 para poder llevar a cabo una lluvia de ideas y discutir el tema central de investigación.
- El tema puede ser escogido por los propios estudiantes o sugerido por el profesor. En nuestro caso, en este Trabajo Final de Máster, se está haciendo un desarrollo desde la rama de Física que serviría como propuesta de investigación para aquellos estudiantes interesados en el tema.
- **Acción.** Esta etapa debe durar en torno a **seis horas** y se puede llevar a cabo a lo largo de una o dos semanas en horario normal de clase.
  - Los estudiantes deberán investigar el tema en grupos de varias disciplinas académicas o en grupos de una única disciplina académica. El hecho de ser uno u otro grupo dependerá del alcance del proyecto manifestado en la etapa de planificación.
  - Deberá existir colaboración durante esta etapa de acción; resultados de las investigaciones deberán ser compartidos con el resto de los miembros que conforman el grupo. Durante esta etapa, al igual que cualquier otra actividad basada en la practicidad, es importante poner gran atención a la seguridad, y a las consideraciones éticas y medioambientales.
- **Evaluación.** El énfasis durante esta etapa, la cual tendrá una duración aproximada de **dos horas**, es que los estudiantes compartan los resultados (tanto los que hayan supuesto éxito en la investigación, como los fracasos oportunos) obtenidos en sus investigaciones con el resto de los estudiantes del centro y/o otros centros. Esta etapa podrá llevarse a cabo como lo deseen los profesores, los alumnos o ambos:
  - Una solución atractiva puede ser usar una mañana o una tarde para un **simposio** en donde todos los estudiantes exponen sus investigaciones en presentaciones breves.
  - Como alternativa, la presentación de la investigación puede ser más informal y tomar la forma de **feria científica**.



#### 4.10 Plan de estudios en los experimentos requeridos de Física

El **plan de estudios** para los **experimentos requeridos de Física** contiene información relevante en torno a la sección del programa de estudios: Aplicaciones y habilidades (lado izquierdo del formato del programa de estudios).

La guía del curso contiene un número de **experimentos prescritos** que son genéricos y no específicos, de tal manera que la forma de implementarlos en el aula depende únicamente del profesor. Estas investigaciones corresponden a aquellos experimentos considerados a menudo como buenas prácticas que se encuentran en los **Esquemas Prácticos de Trabajo** (véase **4.9 El esquema práctico de trabajo (PSOW)**) de los últimos años de los colegios IB, donde deberían aparecer en el 4/PSOW. Se espera que los estudiantes de nivel estándar cumplan los requisitos de las investigaciones prescritas del **programa de estudios central** mientras que los estudiantes de nivel superior deberán ser capaces de cumplir lo anterior y el **programa de estudios superior** adicional.

Entre la gran variedad de experimentos sugeridos en el programa de estudio de física vamos a destacar solo aquellos relacionados con el contenido de este trabajo final de máster:

- **Programa de estudios central.**
  - *Experimentos podrían incluir (pero sin estar limitados): relación entre la energía cinética y la energía potencial gravitatorio para un cuerpo con masa en caída.* Aquí se puede adaptar a nuestro experimento de tal manera que el alumno pueda calcular la energía con la que impacta un proyectil o asteroide en una superficie en función de la relación que existe entre la energía potencial gravitatoria y la energía cinética (un cuerpo en caída va perdiendo su energía potencial y se convierte en energía cinética; la energía cinética total será la energía con la que impacte en una superficie).
  - *Experimentos podrían incluir (pero sin estar limitados): análisis de impactos o colisiones con respecto a la transferencia de energía, fomentar investigaciones para determinar velocidad, fuerza, tiempo, o masa; determinación de la cantidad de energía transformada en colisiones inelásticos.* Este punto se podría considerar en el momento previo justo al impacto de tal manera que el alumnado fuera capaz de calcular velocidades de impacto en función de las condiciones iniciales del asteroide o proyectil. También se puede investigar si existe una relación entre la energía de impacto y el tamaño del cráter.

- *Experimentos podrían incluir (pero sin estar limitados): velocidad de las ondas en diferentes medios, detección de ondas electromagnéticas desde varias fuentes; uso de métodos basados en el fenómeno del eco (o similar) para determinar la velocidad de la onda, longitud de onda, distancia, o elasticidad del medio y/o densidad.* Este último punto sería interesante tenerlo en cuenta si vemos que tenemos un elevado número de alumnos. Aquí el alumno estudiaría y analizaría la forma de detección del intruso a través de las antenas receptoras y emisoras que emiten y reciben ondas electromagnéticas, así como el hecho de que dichas ondas sean transparentes al medio granular dado (véase **2.4.2 Medidas directas de aceleración; Ilustración 7**). Por lo tanto, sería un aspecto más teórico.
- **Programa de estudios superior (adicional).**
  - *Experimentos podrían incluir (pero sin estar limitados): observando el uso de rejillas de difracción en espectroscopios; análisis de películas de jabón finas, onda sonora y análisis del patrón de interferencia del microondas.*

#### **4.11 Aplicación del Proyecto Grupo 4**

La presente propuesta está enfocada a la programación de un proyecto multidisciplinar denominado **Proyecto Grupo 4**, cuyo tema base será *La formación de cráteres y análisis de estos* donde la actividad común, y que servirá como punto de partida, será un primer contacto real con una excursión a un cráter real en Azuara (Zaragoza). La idea de esta propuesta surge como directa necesidad de que todos los estudiantes IB deben realizar el programa práctico requerido del Grupo 4 (Ciencias) del IB.

De hecho, la manera en la que vamos a aplicar este Proyecto del Grupo 4 se haría de tal manera que el alumnado puede conocer toda la información con respecto a ello de antemano y sin la necesidad aún de comprometerse ya que le entregaríamos información previa según el **Anexo 3: Propuesta experimental** y el **Anexo 4: Preguntas y respuestas sobre el Proyecto del Grupo 4** (para cualquier aclaración adicional que necesiten resolver). El **Anexo 1: Planificación Proyecto Grupo 4** y el **Anexo 2: Evaluación Proyecto Grupo 4** se les entregaría al comienzo y el final del proyecto, respectivamente.

Por otro lado, las asignaturas principales sobre las que se va a plantear este proyecto dado serán:

- **Física: Excursión al meteorito de Azuara (Zaragoza)** en colaboración con otros centros educativos IB. Se hará **un experimento en el laboratorio** de cómo se forman los cráteres mediante el cual el alumno tendrá un primer contacto real para entender el fenómeno desde la experimentación individual en un contexto colectivo o grupal. Se puede hacer de esta práctica un **proyecto sencillo de simulación de formación de cráteres** de forma totalmente libre y creativa. Después, llegará a una serie de conclusiones en base al análisis de unos datos relacionados con este contexto. Esta rama es la que se ha considerado exclusivamente en este trabajo final de máster.
- **Biología: Excursión al meteorito de Azuara (Zaragoza)** en colaboración con otros centros educativos IB. Se hará un **proyecto teórico de lo aprendido en la excursión**. Aquí podría considerarse la repercusión que tuvo el impacto de meteoritos en la extinción de los dinosaurios y cómo ha evolucionado la vida desde entonces.
- **Química: Excursión al meteorito de Azuara (Zaragoza)** en colaboración con otros centros educativos IB. Hacer un **proyecto sencillo de análisis de componentes de rocas o sedimentos** que los alumnos han podido extraer del cráter de Azuara. Otra propuesta interesante puede ser el análisis de las partículas que conforman el medio granular y su influencia en el movimiento dinámico del proyectil a lo largo del mismo; de hecho, esta propuesta puede conectar fácilmente las ramas de la Física y de la Química.

En este proyecto los estudiantes forman parte de un **equipo multidisciplinar** conformados de tal manera que hay estudiantes de las **3 asignaturas simultáneamente**. Cada grupo estará compuesto entre **4 y 6 alumnos**, dependiendo del número del alumnado y sus disciplinas científicas. Esto es importante que se cumpla para que así el resultado final tenga una perspectiva científica mucho más amplia e interesante. Por lo tanto, el proyecto final tendrá un enfoque mucho más globalizado desde las ramas de la física, la química y la biología. Además, cada alumno del grupo llevará a cabo aquellas tareas que estén más relacionadas con su disciplina; al final, todo el grupo deberá ser capaz de trabajar en equipo para saber cómo fusionar todas las aportaciones y trabajo realizados por cada miembro de dicho grupo.

#### 4.11.1 Física

Hemos visto que la temática principal sobre la que se desarrolla este Trabajo Final de Máster es el estudio dinámico de un proyectil en un medio granular. Por lo tanto, como es lógico esperar, vamos a centrarnos exclusivamente en la asignatura de Física.

Por un lado, se puede considerar la propuesta de este Trabajo Final de Máster como suficiente para ejecutar el Proyecto del Grupo 4, es decir, se puede llevar a cabo un proyecto basado exclusivamente en el estudio dinámico de proyectiles en un medio granular.

Por otro lado, dependiendo del número de alumnos disponibles y de las disciplinas escogidas, se pueden ejecutar proyectos que abarquen varias disciplinas simultáneas. De hecho, esto es mucho más interesante de llevar a cabo porque está más relacionado con la realidad en el mundo científico profesional. Por lo tanto, para las asignaturas de Biología y Química se haría un desarrollo similar por lo que necesitaríamos de la colaboración y cooperación de los profesores de las asignaturas de Química y Biología para que pudieran aportar su experiencia profesional y académica en los diversos Proyectos Grupo 4.

En nuestro caso, el punto de partida del alumno serán los códigos de programación escritos en las plataformas software MATLAB y PYTHON (véase **Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB)** y el **Anexo 6: Código ploteo curvas datos experimentales y simulados (PYTHON)**), junto con los datos inicialmente proporcionados por el *Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra*, en colaboración con la Agencia Espacial China, de acorde con el artículo (Huang et al., 2020).

La idea es que analicen estos datos haciendo uso del código como herramienta adicional, tal y como hemos reflejado en el punto **3.3 Análisis de la curva exponencial**. Este código se ha elaborado en base a la teoría descrita en el **Capítulo 2 Fundamentos teóricos** y usando los datos obtenidos de las simulaciones del artículo (Huang et al., 2020) para validarlo correctamente, tal y como hemos desarrollado en el punto **3.1 Desarrollo del código**.

También pueden hacer uso de Excel a la hora de buscar curvas de tendencia que mejor se ajusten a unos datos dados.

Lo interesante con el análisis de datos que van a llevar a cabo es que logren poder ver que el resultado de la dinámica del proyectil dentro de un medio granular siempre tiene una tendencia exponencial (véase la **Ilustración 12**, **Ilustración 15** y la **Ilustración 16**). De hecho, se les

propondría analizar este fenómeno para gravedad cero puesto que es el caso más sencillo ya que tiene una respuesta exponencial muy fácil de observar y estudiar; de hecho, los alumnos de la especialidad de física han podido estudiar curvas exponenciales como sucede en el tema 12 de la guía oficial (desintegración radioactiva). En definitiva, el alumno debería poder llegar a un resultado similar al reflejado en la **Ilustración 18**.

Al mismo tiempo, deberán ser capaces de poner en práctica lo aprendido a través de un experimento casero que simulen impactos de proyectiles en un medio granular; por ejemplo, se pueden usar bolas de acero con diferentes masas y dimensiones idénticas y, también, bolas de acero con masas idénticas, pero con distintas dimensiones. Al final, las conclusiones que han obtenido tras el análisis de los datos teóricos los expondrán delante de sus compañeros, apoyándose del experimento casero.

#### **4.11.2 Distribución del tiempo**

Lo interesante en este punto es comenzar con la **planificación** del proyecto al final del año 1 o al comienzo del año 2 porque aquí los alumnos tienen una experiencia y habilidades suficientes como para aplicarlos en este proyecto multidisciplinar. Sin embargo, en nuestra propuesta consideramos una excelente opción considerarlo al comienzo del año 2 porque ahí los alumnos han podido tener experiencia previa en el estudio de exponenciales (por ejemplo, la desintegración radiactiva tiene un comportamiento exponencial y se estudia en el tema 12 de la guía oficial de física; otro ejemplo, es la tendencia exponencial que estudian también con el tiempo de descarga de inducción en el tema 11.3).

Por lo tanto, la excursión se llevaría a cabo a comienzos del primer trimestre del año 2. Para lograr un planificación óptima y eficiente, se puede pedir al alumnado que rellenen la hoja para tal fin, de acorde al **Anexo 1: Planificación Proyecto Grupo 4**. Como dato adicional, aquellos alumnos que estuvieran cursando el año 2 del Programa Diploma mientras se está ejecutando este Proyecto Grupo 4, no habría dificultad alguna que lo hicieran con alumnos del año 1, es decir, se puede combinar alumnos principiantes del nivel superior (NS) con alumnos más experimentados del nivel medio (NM), y así conseguir que no haya una gran diferencia académica entre los mismos.

Tras la excursión, se pueden trabajar los puntos clave del proyecto junto con la estructura de este, de tal manera que esto supondrá la base para la siguiente fase: la **acción**. Cabe destacar que aquí tendrán entre **una y dos semanas** para llevar a cabo la etapa de acción, por lo que la exposición del trabajo final sería al final de la semana dos (**etapa de evaluación**). Una

estructura detallada de la programación temporal se refleja en el **Anexo 3: Propuesta experimental**.

#### 4.11.3 Evaluación Proyecto Grupo 4

Tal y como veíamos en el punto **4.9.5 Evaluación**, el Proyecto Grupo 4 no se evalúa formalmente siguiendo unas rúbricas dadas. Simplemente, las horas de dedicación se incluyen en las 40 horas (nivel NM) o las 60 horas (nivel NS), de acorde a la **Tabla 2**.

Por lo tanto, el Proyecto Grupo 4 tiene en cuenta aquellos aspectos que evalúen el **proceso** que ha llevado el alumno a lo largo del tiempo, entonces basta con reflejar una reflexión final por cada alumno de acorde al **Anexo 2: Evaluación Proyecto Grupo 4**; además del trabajo final que expondrá cada grupo delante de sus compañeros y otros centros. Podemos ver en dicho anexo cómo se tienen en cuenta las fortalezas y debilidades que el alumno ha podido ser consciente a lo largo del proceso, lo cual le será útil tenerlo en cuenta para futuros proyectos (como puede ser la **Investigación** que se evalúa siguiendo unas rúbricas según la guía oficial). Además, plasmará un resumen de las conclusiones más relevantes.

En definitiva, el alumno deberá entregar al profesor responsable de su disciplina académica un informe sobre la parte del proyecto en la que se ha involucrado. Una buena forma de hacer esto es crear una miniatura de la presentación final de PowerPoint (por ejemplo, 9 diapositivas por página). Junto con lo anterior irá adjunto también las plantillas que habrá rellenado el alumno de forma individual sobre la planificación y evaluación del proyecto. Este informe será una parte vital de su esquema de trabajo práctico de ciencias (4PSOW).

#### 4.11.4 Justificación del tema propuesto

A la hora de escoger este tema se ha tenido en mente los siguientes objetivos generales comunes a las asignaturas de física, química y biología:

- **Objetivo general 7.** “*Desarrollar las habilidades de comunicación del siglo XXI para aplicarlas al estudio de la ciencia.*” Este objetivo se puede alcanzar durante la etapa de planificación mediante el uso de medios electrónicos necesarios para tener una comunicación fluida en los centros educativos y entre los diversos centros educativos. El uso de las tecnologías puede ser de gran utilidad; por ejemplo, bases de datos, hojas de cálculos y registro de datos pueden ser herramientas de gran utilidad en el proyecto durante la fase de acción, que lleven a cabo en física durante el análisis de datos. Al mismo tiempo, durante la etapa de presentación y evaluación de los resultados, se puede



hacer uso de programas para presentaciones virtuales, uso de imágenes y vídeos digitales, sitios web, etc.

- **Objetivo general 8** (véase **4.6 Naturaleza de la física**). *“Tomar conciencia crítica, como ciudadanos del mundo, de las implicaciones éticas del uso de la ciencia y la tecnología.”*
- **Objetivo general 10** (véase **4.9.6 Proyecto Grupo 4**). *“Desarrollar la comprensión de las relaciones entre las distintas disciplinas científicas y su influencia sobre otras áreas de conocimiento.”*

Estos tres objetivos, entre otros, se consideran primordiales para que el alumnado adquiriera una mayor concienciación de cómo los científicos se comunican y trabajan entre ellos. Por lo tanto, este proyecto práctico y experimental es una gran oportunidad para poder lograrlos.

## CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado un modelo simple para el estudio dinámico de proyectiles en un medio granular con gravedad cero. Para ello, se ha creado un código programado mediante MATLAB y PYTHON basado en las leyes teóricas previamente aprendidas.

El punto de partida ha sido los datos obtenidos mediante simulación por ordenador que estudia el movimiento dinámico de un proyectil esférico en un medio granular dado y con gravedad cero; estos datos han sido facilitados por el Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra. Para poder interpretar y entender estos datos, se ha visto necesario interiorizar los conceptos técnicos que lo definían, como veíamos en el **Capítulo 2 Fundamentos teóricos**.

Tras ello, tal y como se puede ver en el **Capítulo 3 Análisis de datos**, se ha puesto en práctica todo lo aprendido y se han creado los códigos que mejor se adaptaban al estudio dinámico del proyectil teniendo presente en todo momento la ecuación de movimiento que lo definía y, para simplificar el escenario lo máximo posible, se ha considerado gravedad cero. En realidad, el tipo de escenario no es lo más importante a la hora de entender la fenomenología de cualquier suceso en la naturaleza ya que desde lo más sencillo hasta lo más complicado, las leyes de la naturaleza que mejor definen su comportamiento siguen siendo idénticas.

Posteriormente, se ha validado satisfactoriamente el código con los datos facilitados inicialmente.

Una vez logrado todo lo anterior, se ha podido usar como punto de partida para la propuesta didáctica en un contexto de Bachillerato Internacional a través del Proyecto del Grupo 4, tal y como hemos desarrollado en el **Capítulo 4 Propuesta didáctica de una actividad experimental en un contexto IB**. Este Proyecto del Grupo 4 compuesto por estudiantes de las tres disciplinas consideradas dentro de las asignaturas del Grupo 4 (Física, Química y Biología) para generar una perspectiva de trabajo y cooperación entre ellos mucho más amplia y enriquecedora. Además, en este trabajo final de máster se ha considerado la propuesta del Proyecto del Grupo 4 en la disciplina de la física únicamente puesto que es la más acertada con la temática estudiada; sin embargo, esto no supone una única solución porque también es muy interesante la propuesta del Proyecto en las ramas de la Física, Química y Biología simultáneamente ya que es lo más cercano al trabajo multidisciplinar de científicos

profesionales. Esto último necesitaría de la cooperación de docentes relacionados con esas materias científicas para poder ampliar el proyecto con líneas de investigación que abarquen todas las disciplinas al mismo tiempo.

Lo que se ha perseguido aquí es poder transmitir la manera en la que los científicos abordan un tema de estudio concreto a través del estudio y análisis de unos datos proporcionados. Esto se ha visto necesario e imprescindible como paso previo a la hora de desarrollar la propuesta didáctica puesto que uno de los objetivos principales es que los alumnos sean capaces de entender cómo llevar a cabo un proceso de análisis y estudio de datos apoyándose en leyes teóricas y, también, haciendo uso de experimentos en el laboratorio.

En general, se han cumplido los objetivos que pretendíamos desde un inicio con unos resultados y procedimientos finales satisfechos.

Como línea futura de trabajo, se considera interesante ampliar el código desarrollado para gravedades distintas de cero. Por lo tanto, sería un punto de partida atrayente para aquellos alumnos que pudieran desear adentrarse en el estudio de la dinámica de un proyectil en un medio granular denso con gravedades distintas de cero; por el ejemplo, en su proyecto final del Programa Diploma relacionado con la Investigación individual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altshuler, E., Torres, H., González-Pita, A., Sánchez-Colina, G., Pérez-Penichet, C., Waitukaitis, S., & Hidalgo, R. C. (2014). Settling into dry granular media in different gravities. *Geophysical Research Letters*, *41*(9), 3032-3037. <https://doi.org/10.1002/2014GL059229>
- Aranson, I. S., & Tsimring, L. S. (2006). Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts. *Reviews of Modern Physics*, *78*(2), 641-692. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.641>
- Ciamarra, M. P., Lara, A. H., Lee, A. T., Goldman, D. I., Vishik, I., & Swinney, H. L. (2004). Dynamics of drag and force distributions for projectile impact in a granular medium. *Physical Review Letters*, *92*(19), 2-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.194301>
- De Bruyn, J. R., & Walsh, A. M. (2004). Penetration of spheres into loose granular media. *Canadian Journal of Physics*, *82*(6), 439-446. <https://doi.org/10.1139/p04-025>
- Dickinson, M. J. (2014). *Physics Practical Scheme of Work. For use with the IB Diploma Programme. First Assessment 2016* (Second Edition).
- Goldman, D. I., & Umbanhowar, P. (2008). Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *77*(2), 1-14. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.021308>
- González-Gutiérrez, J., Carrillo-Estrada, J. L., & Ruiz-Suárez, J. C. (2014). Penetration of granular projectiles into a water target. *Scientific Reports*, *4*, 1-5. <https://doi.org/10.1038/srep06762>
- Guía de Música (primeros exámenes: 2011)*. Recuperado el 1 de febrero de 2021 de [https://resources.ibo.org/data/OCC\\_d\\_6\\_music\\_gui\\_0902\\_2\\_s.pdf](https://resources.ibo.org/data/OCC_d_6_music_gui_0902_2_s.pdf)
- Guía de Física (primera evaluación: 2016)*. Recuperado el 1 de febrero de 2021 de [https://resources.ibo.org/data/d\\_4\\_physi\\_gui\\_1402\\_5\\_s.pdf](https://resources.ibo.org/data/d_4_physi_gui_1402_5_s.pdf)
- Hamper, C., y Mitchell E. (27 de abril de 2021). *Group 4 Project*. InThinking. Recuperado el 27 de abril de 2021 de <https://www.thinkib.net/physics/page/1556/group-4-project>
- Huang, K., Hernández-Delfin, D., Rech, F., Dichtl, V., & Hidalgo, R. C. (2020). The role of initial speed in projectile impacts into light granular media. *Scientific reports*, *10*(1), 3207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59950-z>
- Joubaud, S., Homan, T., Gasteuil, Y., Lohse, D., & Van Der Meer, D. (2014). Forces encountered by a sphere during impact into sand. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, *90*(6), 1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.060201>
- Katsuragi, H. (2016). *Physics of Soft Impact and Cratering* (pp. 1-11). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55648-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55648-0_6)

- Katsuragi, H., & Durian, D. J. (2007). Unified force law for granular impact cratering. *Nature Physics*, 3(6), 420-423. <https://doi.org/10.1038/nphys583>
- Organización del Bachillerato Internacional (2015). El Programa del Diploma: de los principios a la práctica. *IB Publishing Ltd, Churchillplein 6, 2517 JW La Haya (Países Bajos)*
- Pacheco-Vázquez, F., Caballero-Robledo, G. A., Solano-Altamirano, J. M., Altshuler, E., Batista-Leyva, A. J., & Ruiz-Suárez, J. C. (2011). Infinite penetration of a projectile into a granular medium. *Physical Review Letters*, 106(21), 1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.218001>
- Seguin, A., & Gondret, P. (2017). Drag force in a cold or hot granular medium. *Physical Review E*, 96(3), 1-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.032905>
- Shoib, N. (2017). General Introduction. *PoliTO Springer Series*, 1-21. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44772-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44772-8_1)
- Takehara, Y., & Okumura, K. (2014). High-velocity drag friction in granular media near the jamming point. *Physical Review Letters*, 112(14), 1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.148001>
- Thoroddsen, S. T., & Shen, A. Q. (2001). Granular jets. *Physics of Fluids*, 13(1), 4-6. <https://doi.org/10.1063/1.1328359>
- Umbanhowar, P., & Goldman, D. I. (2010). Granular impact and the critical packing state. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 82(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.010301>
- Van Der Meer, D. (2017). Impact on Granular Beds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 49, 463-484. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010816-060213>
- Xu, Y., Padding, J. T., & Kuipers, J. A. M. (2014). Numerical investigation of the vertical plunging force of a spherical intruder into a prefluidized granular bed. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 90(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.062203>

## ANEXOS

### Anexo 1: Planificación Proyecto Grupo 4

# Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Planificación

Nombre: ..... Nombre del profesor: .....

#### Título provisional del proyecto

.....  
.....  
.....

#### Resumen del proyecto

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

#### Lista del equipo de laboratorio empleado

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

#### Miembros del grupo y disciplinas científicas

Física: .....  
Biología: .....  
Química: .....





## Anexo 2: Evaluación Proyecto Grupo 4

# Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Evaluación

Nombre: ..... Nombre del profesor: .....

### Título final del proyecto

.....  
.....  
.....

### Miembros del grupo y disciplinas científicas

Física: .....

Biología: .....

Química: .....

### Evaluación

Fortalezas:.....

.....  
.....  
.....

Debilidades:.....

.....  
.....  
.....

### Resumen de las conclusiones

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



## Anexo 3: Propuesta experimental

# Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Introducción

### Directrices

El Proyecto del Grupo 4 permite a los estudiantes tomar una mayor concienciación de las implicaciones que tiene la ciencia en lo ambiental, social y ético. También les permite entender las limitaciones del estudio científico. Se da suma importancia a la cooperación interdisciplinaria donde los conceptos y las percepciones de las diversas disciplinas científicas son compartidas. La intención es que los estudiantes puedan analizar un tema concreto o un problema existente, de tal manera que puede ser investigado en cada una de las áreas científicas.

El proyecto tendrá una duración estimada de 10 – 12 horas, y pueden ser divididas entre las siguientes etapas:

<b>Planificación</b>	Propuesta de investigación por parte del docente hacia aquellos alumnos que desean llevar a cabo el desarrollo del proyecto en el tema del estudio de impactos meteoríticos y análisis de la dinámica de un proyectil en un medio granular.
<b>Definición de las actividades</b>	Es importante decidir en las fases tempranas qué actividades va a ejecutar cada miembro del grupo. Para esto se deberá rellenar la plantilla de planificación <i>Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Planificación</i> . En esta plantilla anotarán también el utensilio de laboratorio que necesitarán para llevar a cabo su experimento casero sobre impactos de meteoritos.
<b>Acción</b>	Esta etapa es la relacionada con todo lo que se debe hacer tanto en la investigación y análisis de datos como en la parte práctica (experimento casero de laboratorio), ambas partes necesarias para lograr el éxito en el proyecto.
<b>Evaluación</b>	Discusión entre los miembros del grupo sobre las fortalezas y debilidades que han podido surgir durante el desarrollo del proyecto. Para esto es importante rellenar la plantilla de evaluación <i>Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Evaluación</i> . Presentación final delante de otros alumnos, profesores y centros IB.

### Programación temporal (primer trimestre – Año 2)

Semana 1	Día 1	Excursión al meteorito de Azuara (Zaragoza) por todos los alumnos que cursen asignaturas del Grupo 4.
	Día 2	Planificación y definición de las etapas necesarias para las actividades del proyecto. Las directrices de este Proyecto del Grupo 4, relacionado con los impactos meteoríticos y análisis de datos sobre la dinámica de un proyectil en un medio granular, se distribuirán a aquellos estudiantes interesados, de tal manera que conocerán el alcance de este y qué tienen que hacer para realizarlo exitosamente. También será una sesión inicial de <i>lluvia de ideas</i> para plantear como abordar esta investigación y como desarrollar y ejecutar el experimento casero sobre impacto meteorítico. El grupo interesado deberá proporcionar un título provisional y un esquema – resumen. En definitiva, cada alumno deberá rellenar individualmente la plantilla <b>Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Planificación</b> facilitada por el docente. Aquí plasmarán las ideas surgidas de la <i>lluvia de ideas</i> y también el material de laboratorio necesario para llevar a cabo su experimento casero.
	Día 3	Recogida de la plantilla rellena <b>Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Planificación</b> por el/los grupo(s) interesado(s). Etapas de acción. Investigación y análisis inicial de los datos que describen la dinámica de un proyectil en un medio granular. El docente facilitará estos datos y un código software escrito en las plataformas MATLAB y PYTHON. No son necesarios conocimientos de programación. Los datos han sido obtenidos por el <i>Departamento de Física y Matemática Aplicada de la Universidad de Navarra</i> en colaboración con la Agencia Espacial China.
	Día 4	Etapas de acción. Investigación y análisis inicial de los datos. Preparación y simulación del experimento casero de impactos de meteoritos.
Semana 2	Día 5	Etapas de acción. Análisis de los datos y justificación de las conclusiones a las que se va llegando. Preparación y simulación del experimento casero de impactos de meteoritos.
	Día 6	Presentación del proyecto. Todos los alumnos tienen la obligación de preparar una presentación PowerPoint de sus investigaciones. Es interesante tener presente que dicha presentación se transmitirá en directo y de manera virtual con otros centros IB, por lo que es preciso tener en cuenta este detalle a la hora de organizar dicha presentación. Estas presentaciones se enviarán por email al docente responsable hasta las 23:59 del día anterior a la presentación final. <b>Ninguna presentación será aceptada durante el día de la presentación final.</b>  Dicha presentación tendrá como apoyo el experimento casero sobre el estudio de impactos meteoríticos. Por lo tanto, es crucial asegurarse de que se dispone de una cámara web para transmitirlo también virtualmente.

## Anexo 4: Preguntas y respuestas sobre el Proyecto del Grupo 4

### 1. *¿Qué es el Proyecto del Grupo 4?*

Es una investigación que tiene una duración aproximada de 10 – 12 horas en un área escogida por los alumnos y aprobada por el profesor responsable o, por otro lado, un área de estudio facilitada por el propio docente a los alumnos, tal y como sucede en esta propuesta.

### 2. *Si estoy cursando dos asignaturas del Grupo 4 ¿tengo que hacer dos lotes de 10 horas?*

No, pero debes llevar a cabo un proyecto de esta área de investigación desde la perspectiva de ambas disciplinas científicas.

### 3. *¿Cómo se crean los grupos?*

Los grupos están compuestos entre **4 y 6 estudiantes** donde forman parte de un **equipo multidisciplinar** conformados de tal manera que hay estudiantes de las **3 asignaturas simultáneamente** (Biología, Química y Física) o solamente de Física, dependiendo del alumnado que hay en clase.

### 4. *¿Cuándo tiene lugar?*

A lo largo de dos semanas durante el primer trimestre del año 2. El día 1 de la semana 1 todos los alumnos del Grupo 4 tendrán una excursión al meteorito de Azuara (Zaragoza). Esto será el punto de partida del proyecto y el estímulo necesario para poner al estudiante en contexto.

Durante la reunión inicial (día 2 de la semana 1), los grupos deberán llevar a cabo una *lluvia de ideas* sobre cómo abordar la investigación y desarrollar y ejecutar el experimento casero sobre impacto meteorítico. Esta sesión inicial les servirá también para asignar las tareas a cada miembro del grupo que abarquen una duración aproximada de 10 horas. Esta planificación deberá elaborarse con la plantilla **Proyecto Grupo 4 (Ciencias IB) – Planificación** suministrada por el docente responsable, y será entregada el día 3 de la semana 1.

Durante los días 4 (semana 1) y 5 (semana 2) tendrá lugar la etapa de acción, en donde los alumnos abordarán la investigación mediante el análisis de unos datos sobre distintos impactos de proyectiles en un medio granular. Al mismo tiempo, durante el día 5 (semana 2) cada grupo deberá reflexionar cómo desarrollar y ejecutar el experimento casero sobre impacto meteorítico.

#### **5. *¿Qué pasa una vez se ha terminado el proyecto?***

Una vez que cada miembro del equipo ha hecho todas sus tareas correspondientes en el proyecto, el equipo se reunirá para debatir sobre cómo organizar su presentación delante de sus compañeros y otros centros IB (este último de manera virtual).

#### **6. *¿Qué formato es el adecuado para la presentación final?***

Cada equipo deberá preparar una presentación **PowerPoint**, la cual será el único registro permanente de tu investigación. Este contendrá imágenes, gráficos y otros datos que se consideren necesarios. Cada miembro del grupo deberá involucrarse en el día de la presentación final. Además, habrá posibles preguntas de la audiencia (alumnos, profesores y otros centros IB).

#### **7. *¿Qué tendré que entregar para la evaluación?***

Tienes que entregar un informe sobre tu parte del proyecto **para cada disciplina científica estudiada** al docente que imparte esa disciplina. Una buena forma de hacer esto es crear una miniatura de tu presentación PowerPoint (por ejemplo, 9 diapositivas por página). Recuerda incluir también las plantillas que has tenido que rellenar previamente sobre la planificación y evaluación del proyecto. Este informe será una parte vital de su esquema de trabajo práctico de ciencias (4PSOW), por lo que **no pierdas absolutamente nada**.

#### **8. *¿Qué habilidades se evaluarán?***

El Proyecto del Grupo 4 siempre pone toda su atención en el proceso llevado a cabo por el alumno y no tanto en el resultado final. Por lo tanto, no está formalmente evaluado.

#### **9. *¿Cuál es el tema de la investigación?***

Movimiento de un intruso o proyectil dentro de un medio granular dado.



***10. Estoy cursando Sistemas y Sociedades Medioambientales para mi asignatura del Grupo 3. ¿Tengo que participar en el Proyecto del Grupo 4?***

No, todos los estudiantes que estén cursando Sistemas y Sociedades Medioambientales están exentos de participar en el Proyecto del Grupo 4.





## Anexo 5: Código resolución ecuación diferencial (MATLAB)

### ecuación\_diferencial.m

```
function zdot = func(t,z)
global  $\gamma$ ;
global m;
zdot(1) = z(2);
zdot(2) = [- $\gamma$  * [z(2)]^2]/m;
zdot=zdot'; % convertimos en un vector columna
end
```

### global\_var.m

```
clear all; close all;
global  $\gamma$ ;
 $\gamma$  = 0.15; % Este valor varía en función de la tendencia de la curva exponencial deseada según el "fit" óptimo
con los datos de simulación facilitados.
global m; % masa de la esfera = 0.023 kilogramos.
m = 0.023;
[t,z] = ode45('Ecuacion_diferencial',[0 5], [0 0.14]); % Dominio temporal desde 0 a 0.14 segundos. Es un
valor orientativo para la ejecución de la función ode45 puesto que luego la propia función adaptará el rango
por sí solo.
Velocidad = z(:,2);
Velocidad = Velocidad/Velocidad(1);
Posicion = z(:,1);
plot(Posicion,Velocidad);
T = table(Posicion, Velocidad);
writetable(T, 'Ecuacion_diff_data.txt'); % Guardamos los datos en un archivo de texto para posición y
velocidad del proyectil.
```



## Anexo 6: Código ploteo curvas datos experimentales y simulados (PYTHON)

### Ploteo\_curvas\_datos.py

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import glob

'''
Leemos cada uno de los datos de los proyectiles que hay en cada carpeta según las diferentes velocidades
iniciales
'''

lista_archivos = glob.glob('V*/*.txt*') # Directorio para localizar los archivos de textos con los datos
obtenidos de la simulación en el artículo (Huang et al., 2020).
for archivo in lista_archivos:
    data = np.loadtxt(archivo)
    pos_z = data[:,4] # La columna 5 de los archivos de texto corresponde con los valores de posición del
proyectil.
    vel_z = data[:,7] # La columna 8 de los archivos de texto corresponde con los valores de velocidad del
proyectil.

    V = vel_z/vel_z[1] # Escalamos el eje correspondiente con la velocidad del proyectil.
    z = abs(pos_z-pos_z[1]) # Escalamos el eje correspondiente con la posición del proyectil.
    plt.plot(z, V, label = archivo[0:4])
    plt.title('data_preli_Ph2')
    plt.xlabel('abs(z-zo)')
    plt.ylabel('V/Vo')
    plt.legend()

data_eq_diff = np.loadtxt('Ecuacion_diff_data_0K18.txt') # Cargamos un archivo distinto en función del
valor de k2 propio de la ecuación diferencial (3-1) que mejor se ajuste a los datos.
posi_z = data_eq_diff[:,0]
velo_z = data_eq_diff[:,1]
plt.plot(posi_z,velo_z, label = 'Ecuación diferencial (3-1) [γ =0.18, m=0.023kg]', color='pink')
plt.legend()
plt.show()
```