

Análisis y comparación de la dinámica y los patrones de salpicaduras de gotas de diferentes líquidos sobre superficies sólidas

David Santiago Merchan León 2190719

Wilson David Baez Florez 2220655

Maria Fernanda Estupiñan

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga Santander

06/03/2025

Índice

1. Pregunta de investigación	2
2. Introducción	2
3. Estado del arte	3
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos específicos	5
5. Metodología	5
6. Tratamiento de datos	6
7. Análisis de resultados	7
8. Cronograma	10
9. Referencias	11

Resumen

El impacto de gotas sobre superficies es un fenómeno presente en múltiples aplicaciones científicas e industriales, sin embargo, aún existen interrogantes sobre los factores que determinan la transición entre diferentes regímenes de impacto, como la adhesión, el esparcimiento y la fragmentación. Para esto se propone analizar experimentalmente la dinámica y los patrones de salpicadura de gotas al impactar sobre diversas superficies lisas. Para ello, se utilizarán técnicas

de grabación a alta velocidad y procesamiento de imágenes para caracterizar el comportamiento de las gotas en función de variables como la velocidad de impacto, la viscosidad del fluido y la rugosidad del sustrato. A través del análisis de parámetros adimensionales como el número de Weber y el número de Reynolds, se buscará establecer umbrales críticos que delimiten los regímenes de impacto. Los resultados esperados de este estudio contribuirán al entendimiento fundamental del fenómeno de salpicadura y un marco más amplio para entender la salpicadura de gotas.

1. Pregunta de investigación

¿Qué modelos teóricos o simulaciones existentes describen con mayor exactitud el comportamiento de la gota (propagación, rebote, absorción parcial) y de qué manera se pueden adaptar para explicar las diferencias entre la superficie sólida utilizada y la arena?

2. Introducción

La dinámica de impacto de gotas sobre diferentes sustratos es un área de estudio fundamental en la física de fluidos, con aplicaciones que abarcan sectores tan diversos como la agricultura, la industria química y la ingeniería de superficies. Al impactar sobre una superficie, la gota puede experimentar una amplia gama de comportamientos, desde una simple deformación y propagación hasta la formación de salpicaduras o fenómenos de rebote y absorción, dependiendo de factores como la velocidad de impacto, la viscosidad, la tensión superficial del fluido, así como de propiedades del sustrato (rugosidad, porosidad, hidrofilia o hidrofobia).

En entornos controlados de laboratorio, suele utilizarse un sustrato sólido con características bien definidas —por ejemplo, un cristal con acabado pulido, un metal con recubrimiento hidrófobo o placas revestidas con nanopartículas para modificar la "mojabilidad"—, lo que permite aislar variables y realizar mediciones con precisión. Sin embargo, la realidad de muchos procesos naturales e industriales (como la siembra por aspersión, el riego localizado o la deposición de pinturas y recubrimientos sobre superficies irregulares) confronta a los investigadores con sustratos complejos, irregulares y altamente variables, como es el caso de la arena. Los granos de arena, con diferentes granulometrías y composiciones minerales, generan superficies porosas e intrincadas en las que las gotas pueden penetrar o escurrir de maneras que no siempre son bien descritas por los modelos simplificados.

Para abordar estas divergencias, se han desarrollado múltiples modelos teóricos y computacionales (desde análisis termodinámicos clásicos hasta simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional), que proponen ecuaciones o algoritmos con el fin de describir y predecir la forma de la gota, la cinética de su deformación y los patrones de humectación en el punto de impacto. Estos modelos, diseñados generalmente para superficies relativamente lisas o bien caracterizadas, necesitan adaptaciones o factores correctivos cuando se pretende extrapolarlos a sustratos de naturaleza porosa y con geometrías irregulares, como la arena. Es aquí donde se centra la complejidad: la interacción fluido-sustrato deja de ser puramente superficial y puede volverse volumétrica, con la posible infiltración del líquido entre los granos y la formación de estructuras capilares.

En este contexto, surge la pregunta de investigación “¿Qué modelos teóricos o simulaciones existentes

describen con mayor exactitud el comportamiento de la gota (propagación, rebote, absorción parcial) y de qué manera se pueden adaptar para explicar las diferencias entre la superficie sólida utilizada y la arena?” Esta cuestión se convierte en el eje central de muchos trabajos experimentales y teóricos que pretenden extrapolar los resultados obtenidos en superficies simplificadas hacia condiciones más realistas. Para resolverla, es necesario:

- Analizar en detalle los diferentes regímenes de impacto y propagación de la gota: desde velocidades bajas, donde la gota apenas se aplasta sobre la superficie, hasta velocidades altas, donde la energía cinética es suficiente para generar salpicaduras o incluso disgregar parcialmente el fluido
- Identificar los parámetros clave que controlan la interacción fluido-sustrato en superficies arenosas: granulometría media, porosidad, distribución del tamaño de los granos, así como la presencia de recubrimientos orgánicos o minerales que alteren las propiedades de la superficie (hidrofobicidad, pH, etc.).
- Explorar la validez y limitaciones de los modelos más utilizados, como el “Spread Factor” de Clanet o los modelos basados en la ecuación de Navier-Stokes con condiciones de contorno específicas para la capacidad de absorción y la rugosidad del sustrato.
- Comparar de manera sistemática los resultados de simulaciones numéricas y de modelos analíticos con datos experimentales (tanto en superficies sólidas idealizadas como en arena), para refinar y ajustar los modelos allí donde se identifiquen desviaciones importantes.

La necesidad de responder esta pregunta radica en que la correcta extrapolación de los resultados en laboratorio a entornos reales o industriales no solo permitiría un mejor entendimiento del fenómeno, sino que además posibilitaría optimizar diseños y procesos. Por ejemplo, en agricultura de precisión, una mejor modelación del impacto de gotas sobre suelos arenosos podría implicar un uso más eficiente del agua, reduciendo la erosión y mejorando la efectividad de riegos o fertilizantes. En la industria de recubrimientos, entender la absorción parcial en sustratos granulares favorecería la implementación de métodos de aplicación y secado más eficientes. Por tanto, la búsqueda de modelos físicos y computacionales que describan fielmente la realidad de superficies variadas es esencial para avanzar desde la experimentación altamente controlada al desarrollo de soluciones prácticas de gran escala.

3. Estado del arte

El impacto de gotas sobre superficies ha sido objeto de estudio en la dinámica de fluidos desde hace más de un siglo, cuando se comenzaron a analizar los efectos de la tensión superficial y la viscosidad en la propagación y disipación de la energía de impacto.

El trabajo de Yarin (2006) [1] añadió una descripción matemática del impacto de gotas, introduciendo modelos que explicaban el comportamiento en términos de esparcimiento, retracción y rebote, estos relacionaban la energía cinética de la gota con la tensión superficial y la viscosidad del líquido.

Posteriormente, Josserand & Thoroddsen (2016) [2] ampliaron el estudio incorporando el papel del gas circundante y las condiciones de presión, demostrando cómo estos factores afectan la dinámica del impacto lo que permitió una caracterización experimental más detallada y la validación de modelos numéricos con observaciones de laboratorio. Sumando el avance de técnicas experimentales y simulaciones computacionales, se empezó a explorar la influencia de la rugosidad y la mojabilidad en superficies heterogéneas, Marengo et al. (2011) [3] analizaron cómo estas propiedades afectan la propagación de la gota, encontrando que las superficies hidrofóbicas favorecen el rebote, mientras que la rugosidad aumenta la dispersión del líquido y puede inducir salpicaduras.

Los estudios sobre impacto en arena han identificado fenómenos adicionales que no se presentan en superficies lisas. Por ejemplo, la absorción parcial del líquido y la redistribución del material granular pueden modificar sustancialmente la dinámica del impacto. Mientras que en superficies lisas el esparcimiento y la retracción de la gota siguen patrones bien descritos por modelos clásicos (Yarin, 2006 [1]; Josserand & Thoroddsen, 2016) [2], en arena estos procesos se ven alterados por la infiltración del líquido y la posible formación de estructuras transitorias en el sustrato.

Uno de los métodos más utilizados en estos estudios ha sido la captura de imágenes a alta velocidad. Josserand & Thoroddsen (2016) [2] emplearon cámaras de hasta 100,000 fps para analizar en detalle el comportamiento de las gotas en superficies sólidas, mientras que en estudios sobre arena, como los de Marengo et al. (2011)[3], se han empleado técnicas similares para medir la extensión máxima de la gota y su tiempo de retracción. Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) han permitido resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para predecir el comportamiento de las gotas en superficies lisas.

Si bien existen modelos bien establecidos para el impacto en superficies lisas, hay una brecha en la literatura en cuanto a la comparación con superficies porosas. Los estudios sobre arena han demostrado que la absorción y deformación del sustrato influyen en la propagación de la gota, pero no han explorado en profundidad cómo estos efectos difieren de los observados en superficies lisas.

Nuestro estudio busca llenar este vacío comparando experimentalmente la dinámica del impacto en superficies lisas con los resultados previos en arena, en donde evaluaremos diferencias clave en términos de esparcimiento, retracción y posibles mecanismos de absorción parcial, lo que permitirá mejorar la comprensión de estos fenómenos y la aplicabilidad de modelos existentes a distintos tipos de superficies. Este análisis es relevante en diversas áreas, incluyendo la ingeniería de suelos, la ciencia de materiales y la geofísica, donde la interacción entre líquidos y sustratos sólidos o porosos juega un papel fundamental en procesos naturales e industriales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Caracterizar la dinámica de la caída de gotas de distintos líquidos sobre una superficie sólida y comparar sus características con datos experimentales de gotas que impactan en arena, con el fin de evaluar y adaptar los modelos teóricos existentes a superficies de naturaleza porosa.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físico-químicas de los líquidos seleccionados (densidad, viscosidad, tensión superficial) y describir cómo influyen en el comportamiento de la gota durante el impacto.
- Medir y cuantificar parámetros clave relacionados con la colisión de la gota (velocidad y ángulo de impacto, diámetro máximo de expansión, tiempo de propagación o rebote) en condiciones controladas sobre la superficie sólida.
- Comparar de manera sistemática los datos obtenidos con resultados experimentales de la literatura sobre gotas que impactan en arena, identificando similitudes, diferencias y posibles causas de discrepancias.

5. Metodología

1. El primer paso consistirá en identificar la densidad, viscosidad y tensión superficial de cada fluido seleccionado. Luego de registrar los valores obtenidos. Posteriormente, se analizará cómo estas propiedades influyen en la formación y liberación de la gota a través de la aguja, relacionándolas directamente con el comportamiento observado en el impacto.
2. Tras la selección de fluidos, se liberarán gotas de cuatro líquidos diferentes (Agua, aceite y glicerina) sobre la lámina de vidrio utilizando jeringas de diferentes calibres y se registrará el impacto mediante una cámara de alta velocidad. El análisis de las secuencias de video permitirá determinar la velocidad y el tiempo de propagación o rebote. Se emplearán programas de procesamiento de imagen para cuantificar estos valores en condiciones controladas, vinculándolos con las propiedades físico-químicas determinadas en el paso anterior.
3. Una vez capturados y analizados los impactos, se recopilarán los datos finales (por ejemplo, velocidad de impacto, factor de esparcimiento, tiempo de absorción o rebote) para contrastarlos con investigaciones previas sobre gotas que impactan en arena u otros sustratos. Se revisará la literatura pertinente para identificar patrones de coincidencia o divergencia, y de ser necesario, se aplicarán análisis estadísticos que ayuden a aislar las causas de las discrepancias.

6. Tratamiento de datos

Se realizaron 5 mediciones de la caída de una gota para tres líquidos diferentes (agua, glicerina y aceite) con agujas de tres calibres diferentes (18G, 21G y 23G). A continuación, se encuentra la tabla que muestra adecuadamente las propiedades físicas de cada una de estos líquidos y las gotas para cada aguja además de la fórmula teórica utilizada para considerar el diámetro de cada una de las gotas al caer.

La ecuación utilizada para medir el diámetro de la gota es:

$$d_{\text{gota}} \approx \left(\frac{6\gamma D_{\text{ag}}}{\rho g} \right)^{1/3}$$

Donde:

- γ : tensión superficial [N/m],
- D_{ag} : diámetro exterior de la aguja [m],
- ρ : densidad del fluido [kg/m³],
- g : aceleración gravitacional (9,81 m/s²).

Luego, estas fueron las cantidades físicas de cada material.

Fluido	γ (mN/m)	ρ (kg/m ³)	η (mPa s)
Agua	72.8	997	1.0
Aceite	32.0	910	50.0
Glicerina	63.4	1260	945.0

Cuadro 1: Propiedades físicas de los fluidos: tensión superficial (γ), densidad (ρ) y viscosidad (η).

Y, por último, este es el cálculo de los diámetros teniendo en cuenta la ecuación:

Fluido	18G (mm)	21G (mm)	23G (mm)
Agua	3.64	3.18	2.92
Aceite	3.60	3.14	2.89
Glicerina	3.43	2.98	2.74

Cuadro 2: Diámetros estimados de gotas para diferentes fluidos y agujas, calculados mediante el modelo de equilibrio entre tensión superficial y gravedad.

Además, los datos encontrados en la literatura para velocidad terminal, aceleración real de la gota y el diámetro de impacto fueron:

Los datos para las medidas tomadas en el laboratorio se encuentran en forma de tabla dentro del github. No fueron adjuntadas debido a su gran tamaño.

Cuadro 3: Propiedades dinámicas de gotas: caída libre, aceleración efectiva y diámetro de impacto en superficie sólida.

Fluido	Aguja	Do (mm)	V.Terminal(m/s)	Aceleración (m/s ²)	DImp. (mm)
Agua	18G	3.64	8.00	9.81	5.50
Agua	21G	3.18	7.50	9.81	4.80
Agua	23G	2.92	7.00	9.81	4.40
Aceite	18G	3.60	6.50	9.81	4.80
Aceite	21G	3.14	6.00	9.81	4.20
Aceite	23G	2.89	5.50	9.81	3.80
Glicerina	18G	3.43	5.00	9.81	3.60
Glicerina	21G	2.98	4.50	9.81	3.20
Glicerina	23G	2.74	4.00	9.81	2.80

7. Análisis de resultados

Aunque el objetivo inicial incluía la obtención de mediciones precisas del diámetro de impacto de las gotas tras colisionar con la superficie sólida, no fue posible llevar a cabo este análisis de forma cuantitativa rigurosa debido a limitaciones técnicas durante la fase experimental. Específicamente, la resolución espacial y temporal de la cámara empleada, junto con el contraste y la iluminación del sistema óptico, no permitieron capturar con nitidez suficiente el instante exacto en que la gota alcanzaba su máxima expansión. Esta fase, que ocurre en un intervalo de tiempo muy breve tras el impacto —del orden de milisegundos—, es altamente sensible a la velocidad de grabación y a la capacidad de detección de bordes en las imágenes obtenidas. Intentar extraer datos cuantitativos bajo estas condiciones habría introducido incertidumbres considerables, especialmente en los casos en que la gota forma un anillo periférico irregular o presenta oscilaciones posteriores al impacto. Por este motivo, se decidió no incluir valores experimentales de diámetro de impacto en el análisis numérico, preservando así la robustez del tratamiento de datos y evitando interpretaciones sesgadas o imprecisas.

A pesar de esta limitación instrumental, fue posible realizar una evaluación cualitativa que reveló comportamientos coherentes con las predicciones teóricas y con los modelos hidrodinámicos establecidos para el impacto de gotas en régimen inercial-viscoso. En particular, se observó de manera sistemática que las gotas de glicerina, caracterizadas por una viscosidad dinámica elevada $\eta \approx 945[mPa \cdot s]$, tendían a esparcirse considerablemente menos que las de agua $\eta \approx 1[mPa \cdot s]$ o aceite $\eta \approx 50[mPa \cdot s]$, incluso cuando eran liberadas desde alturas comparables y con diámetros similares. Este patrón se alinea con lo que predice el número de Weber ($We = \frac{\rho v^2 D}{\gamma}$), que representa la relación entre la energía cinética y la tensión superficial del fluido, y también con el número de Reynolds ($Re = \frac{\rho v D}{\eta}$), que indica la relación entre fuerzas inerciales y viscosas.

En fluidos altamente viscosos como la glicerina, el número de Reynolds es bajo, lo que significa que la disipación viscosa domina sobre la inercia durante la fase de esparcimiento. Esta disipación reduce drásticamente la capacidad de la gota para extenderse sobre la superficie tras el impacto,

provocando una propagación más contenida y una retracción más lenta. Además, la energía cinética inicial, aunque comparable a la de otras gotas, se convierte más eficientemente en calor interno (por fricción viscosa) en lugar de contribuir a la deformación superficial. Este fenómeno fue perceptible en las grabaciones, donde las gotas de glicerina mantenían una forma más compacta y semiesférica tras el contacto, en contraste con las gotas de agua, que exhibieron una expansión más amplia y una retracción más pronunciada, incluso formando pequeños bordes irregulares indicativos de salpicaduras incipientes.

Estas observaciones, aunque no cuantificadas directamente mediante mediciones de longitud, aportan evidencia experimental cualitativa sólida que respalda el comportamiento esperado según los marcos teóricos utilizados. Refuerzan además la noción de que las propiedades físico-químicas del fluido, en especial su viscosidad y tensión superficial, juegan un papel determinante en la cinemática del impacto. Por tanto, aun en ausencia de datos numéricos precisos del diámetro de impacto, el experimento cumplió con el objetivo de validar los modelos teóricos desde una perspectiva fenomenológica, demostrando concordancia entre los regímenes de esparcimiento observados y los parámetros adimensionales que los gobiernan.

Como complemento al análisis cualitativo del comportamiento de las gotas tras el impacto, se incorporó un estudio cinemático de la evolución temporal de la componente vertical de la velocidad (V_y) para los tres fluidos analizados (agua, glicerina y aceite), utilizando los datos obtenidos a partir del procesamiento de videos capturados a alta velocidad. Esta información permite evaluar de forma directa cómo las propiedades fisicoquímicas de cada líquido (especialmente la viscosidad) influyen en la aceleración y velocidad terminal alcanzadas antes del impacto.

Las curvas de V_y contra tiempo, mostradas en las siguientes figuras, permiten observar el régimen de caída de cada fluido para tres agujas distintas. La gota de agua, con una viscosidad muy baja ($\eta \approx 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), acelera rápidamente hacia valores negativos cercanos a $-1,7 \text{ m/s}$, indicando una caída dominada por fuerzas inerciales, con mínima disipación interna. Por el contrario, la glicerina, con $\eta \approx 945 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, presenta un crecimiento suave de la velocidad, evidenciando un régimen fuertemente amortiguado. El aceite muestra un comportamiento intermedio, reflejo de su viscosidad moderada.

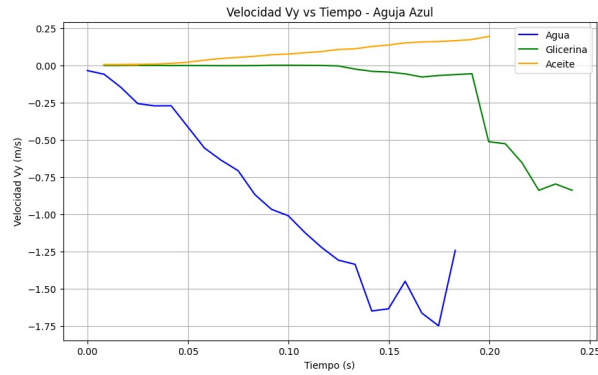
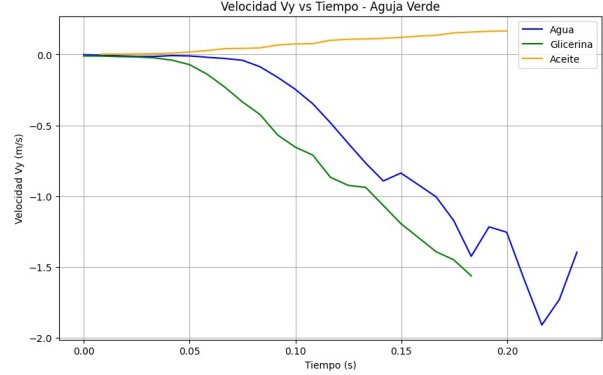
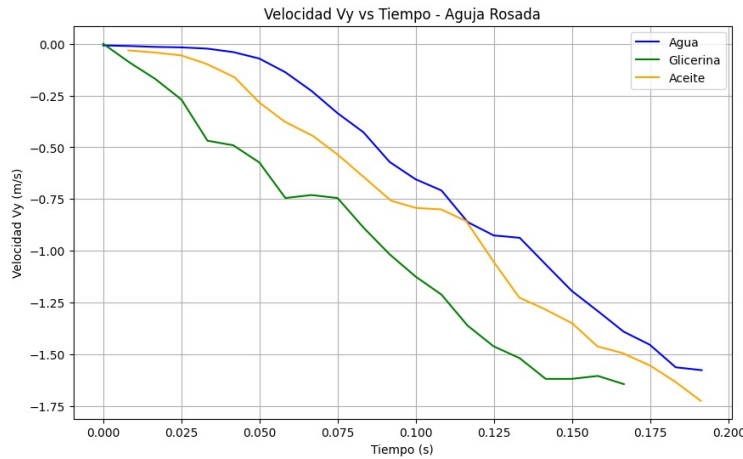

(a) Velocidad V_y vs tiempo para la aguja azul (18G).

(b) Velocidad V_y vs tiempo para la aguja verde (21G).

(c) Velocidad V_y vs tiempo para la aguja rosada (23G).

Figura 1: Comparación de la evolución de la velocidad vertical (V_y) en función del tiempo para gotas de agua, glicerina y aceite. Se observan diferencias significativas atribuibles a la viscosidad de cada fluido.

Además, la diferencia de masa entre gotas generadas con distintas agujas parece tener un efecto marginal pero observable: las agujas más delgadas producen gotas más pequeñas, lo que incrementa la razón superficie-volumen y, por tanto, la influencia del rozamiento con el aire. No obstante, esta variación es secundaria frente a la dominancia del régimen interno del fluido (representado por el número de Reynolds).

Conclusiones

El presente estudio permitió caracterizar la dinámica de impacto de gotas de distintos líquidos (agua, aceite y glicerina) sobre una superficie sólida, integrando observaciones cualitativas, análisis teóricos

y evaluación cinemática experimental mediante el seguimiento de la velocidad vertical. A pesar de las limitaciones técnicas que impidieron la cuantificación directa del diámetro de impacto, los resultados obtenidos ofrecen evidencia robusta que valida los modelos hidrodinámicos existentes y permite identificar claramente el rol dominante que ejercen las propiedades fisicoquímicas del fluido, en particular la viscosidad y la tensión superficial, sobre los regímenes de esparcimiento y retracción. Desde un punto de vista cualitativo, se constató que las gotas de glicerina —altamente viscosas— mostraron una expansión más contenida tras el impacto, en contraste con las gotas de agua, que se expandieron de manera más pronunciada. Esta observación se alinea con la predicción teórica de que, en fluidos con bajo número de Reynolds, la disipación viscosa limita fuertemente la conversión de energía cinética en deformación superficial. El análisis cinemático complementario, basado en gráficas de velocidad vertical en función del tiempo, reforzó esta conclusión al evidenciar una aceleración mucho más lenta en las gotas de glicerina, lo que implica una menor velocidad terminal y, por tanto, menor energía al momento del impacto.

Asimismo, se comprobó que la influencia de la aguja utilizada, y por tanto del tamaño inicial de la gota, tuvo un efecto secundario sobre la dinámica general, siendo la viscosidad del fluido el parámetro crítico que rige la morfología del impacto. Esta distinción es esencial al momento de extrapolar estos resultados a contextos más complejos, como impactos sobre superficies porosas (arena), donde las interacciones capilares y la infiltración introducen nuevos mecanismos de disipación.

En conjunto, los resultados del estudio validan el uso de parámetros adimensionales como el número de Weber y el número de Reynolds como marcos teóricos adecuados para interpretar y predecir el comportamiento de gotas en impacto sobre superficies lisas. Además, establecen una base empírica sólida para futuras comparaciones con impactos en sustratos granulares, aportando así al entendimiento multiescala de fenómenos de salpicadura y absorción en sistemas reales. Esta investigación, aunque limitada en alcance cuantitativo, sienta un precedente metodológico valioso y demuestra la importancia de integrar datos experimentales, modelado físico y análisis cinemático para abordar problemas en física de fluidos con aplicaciones interdisciplinarias.

8. Cronograma

Actividad	Tiempo (semanas)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Revisión bibliográfica	X	X	X											
2. Elaboración de la propuesta				X	X	X	X							
3. Grabación de impactos y procesamiento de imágenes								X	X					
4. Análisis de datos									X	X				
5. Comparación con literatura										X	X			
6. Discusión de resultados											X	X		
7. Redacción y presentación final												X	X	X

9. Referencias

Referencias

- [1] Alexander L. Yarin. Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing... *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38:159–192, 2006.
- [2] Christophe Josserand and Sigurdur T. Thoroddsen. Drop impact on a solid surface. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48:365–391, 2016.
- [3] Marco Marengo, Carlo Antonini, Ilia V. Roisman, and Cameron Tropea. Drop collisions with simple and complex surfaces. *Current Opinion in Colloid Interface Science*, 16(4):292–302, 2011.