

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	4
4.1. Objetivo General	4
4.2. Objetivos específicos	5
5. Metodología	5
5.1. Preparación del experimento	5
5.2. Liberación de la gota	5
5.3. Procesamiento de las imágenes obtenidas	6
6. Referencias	6

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 7: “¿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

- Analizar 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 y simulaciones 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.
- Evaluar la idoneidad de modelos teóricos y simulaciones de dinámica de fluidos aplicados a superficies sólidas e identificar qué ajustes o extensiones son necesarios para describir el comportamiento de las gotas en sustratos arenosos.

5. Metodología

5.1. Preparación del experimento

Se empleará una lámina de vidrio sólido como superficie de impacto. Para garantizar un entorno controlado, se limpiará meticulosamente la lámina antes de cada ensayo, a fin de eliminar cualquier contaminante que pueda alterar la interacción con la gota.

Asimismo, es esencial fijar la superficie sobre una plataforma estable para evitar movimientos o vibraciones indeseadas durante el impacto. También se debe verificar que la lámina se encuentre perfectamente nivelada, evitando cualquier desbalance con respecto a la base de apoyo y asegurando así la precisión en los resultados.

Inicialmente, se utilizará agua destilada como líquido de referencia debido a su mayor pureza. Sin embargo, se emplearán varios líquidos o soluciones cuyas propiedades (densidad, viscosidad y tensión superficial) difieran de las del agua destilada (Agua no destilada, aceite, etanol y glicerina). El líquido seleccionado debe contener un colorante u otra sustancia que facilite la observación de su dispersión tras el impacto; no obstante, es importante tener en cuenta que la adición de dicha sustancia puede modificar sus propiedades físico-químicas. Por ello, antes de realizar el experimento, se dispondrá de información completa sobre el fluido en uso. En caso de no conocer la tensión superficial, puede determinarse mediante el método de la gota colgante y la ecuación de Young-Laplace.

5.2. Liberación de la gota

Para llevar a cabo el experimento, se generará una gota de agua —con un radio aún por determinar— que se liberará desde una aguja de punta plana colocada a una altura específica sobre la superficie de impacto. La formación de la gota se controla mediante un caudal externo de líquido que permite su crecimiento progresivo en el extremo de la aguja. La liberación se produce en el instante en que la fuerza gravitacional supera la fuerza de tensión superficial que mantiene la gota unida a la aguja.

El impacto de la gota sobre la superficie se registra mediante una cámara de alta velocidad equipada con un objetivo macro, brindando la capacidad de capturar en detalle la evolución de la dispersión y la dinámica de la interacción entre el fluido y la superficie sólida. La cámara se ubica en un ángulo oblicuo respecto al plano de impacto, lo que facilita la observación de la deformación de la gota desde el momento del primer contacto hasta las etapas posteriores de expansión y posible retracción del líquido. Para mejorar la visibilidad del fenómeno, se utiliza una fuente de luz LED como iluminación de fondo, asegurando un contraste adecuado para la identificación de los contornos de la gota en cada fotograma.

5.3. Procesamiento de las imágenes obtenidas

Uno de los parámetros clave para el análisis es la velocidad de la gota justo antes de la colisión. Este valor se estima mediante una interpolación lineal de la posición de la gota en dos fotogramas consecutivos captados inmediatamente antes del impacto. A su vez, el instante preciso de contacto con la superficie se determina extrapolando linealmente las dos últimas posiciones previas al contacto, permitiendo así una estimación más rigurosa del momento en que la gota hace contacto.

Cabe señalar que la identificación exacta del instante de impacto constituye una de las principales fuentes de incertidumbre en este experimento. Dado lo rápido que evoluciona el fenómeno y las limitaciones en la resolución temporal de las imágenes capturadas, cualquier error en la estimación de este parámetro podría influir significativamente en los cálculos posteriores. Por ello, es fundamental llevar a cabo un análisis detallado de la incertidumbre asociada al tiempo de impacto, contemplando tanto los errores sistemáticos como los aleatorios que afecten la precisión de las mediciones.

Este montaje experimental permitirá caracterizar con fidelidad el comportamiento de la gota durante las primeras etapas del impacto, contrastando los resultados obtenidos con estudios previos y modelos teóricos relacionados con la dispersión y la absorción de energía en superficies sólidas.

6. 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.