



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Cráteres tipo doblete en Medios Granulares

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Miriam Jiménez Valdez

Asesorada por

Dr. Felipe Pacheco Vázquez

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Puebla Pue.
Abril de 2022.



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Cráteres tipo doblete en Medios Granulares

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Miriam Jiménez Valdez

Asesorada por

Dr. Felipe Pacheco Vázquez

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Puebla Pue.
Abril de 2022.

Título: Cráteres tipo doblete en Medios Granulares

Estudiante: MIRIAM JIMÉNEZ VALDEZ

COMITÉ

Dr. Mario Iván Martínez
Hernández
Presidente

Dr. Arturo Fernández
Téllez
Secretario

Dr. Enrique Varela Carlos
Vocal

Dr. Severino Muñoz
Aguirre
Suplente

Dr. Guillermo Tejeda
Muñoz
Co-asesor

Dr. Felipe Pacheco Vázquez
Asesor

Agradecimientos

Quiero agradecer mi asesor Felipe Pacheco por recibirme en su laboratorio, por el entusiasmo, paciencia y enseñanza transmitida en todo el proceso de la realización de la tesis. A mis compañeros de Grainslab por el acompañamiento y retroalimentación.

Agradezco a mis profesores de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas por contribuir a mi formación académica; al igual que a mis profesores y compañeros de la Universidade Estadual Paulista (UNESP) por recibirme, apoyarme y guiarme en todo momento durante mi estancia en esa universidad.

Quiero agradecer a mis papás por su apoyo incondicional y por creer en mí en todo momento. A mis amigos de la universidad por el entusiasmo, apoyo y amistad brindados durante este proceso que hizo mucho mejor mi experiencia como estudiante.

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	VII
Introducción	X
1. Cráteres	1
1.1. Historia de los cráteres generados por impacto	1
1.2. Morfología de los cráteres generados por impacto	7
1.2.1. Cráteres simples	7
1.2.2. Cráteres complejos	7
1.2.3. Cráteres secundarios	8
1.2.4. Cráteres tipo doblete	9
2. Materia granular para el estudio de procesos de formación de cráteres a escala de laboratorio	11
2.1. Materia Granular	11
2.1.1. Factor de Empaquetamiento	11
2.1.2. Ángulo de reposo	12
2.2. Análisis dimensional	12
2.3. Experimentos con Materia Granular para el estudio de morfologías planetarias . .	13
2.3.1. Estudio de cráteres simples y complejos	13
2.3.2. Sistemas de Rayos	16
2.3.3. Cráteres tipo doblete	18
3. Estudio experimental de cráteres tipo doblete	21
3.1. Objetivo General	21
3.2. Objetivos Particulares	21
3.3. Diseño experimental	21
3.4. Resultados experimentales y análisis	25
3.4.1. Diámetro de un cráter $D_c^{(1)}$ en función de la energía de impacto	25
3.4.2. Diámetros de los cráteres doblete	25
3.5. Modelo de colisión entre cortinas de eyección	28
3.5.1. Velocidad de crecimiento de la corona de eyección	29
Conclusiones	32
Bibliografía	35

Resumen

El mecanismo de formación de cráteres observados en superficies planetarias fue debatido durante siglos, prevaleciendo la teoría de que estos tenían un origen volcánico principalmente; sin embargo, fue hasta el siglo XX que la teoría de que las morfologías circulares vistas en la superficie lunar fueron generadas por impacto de meteoritos fue aceptada. En el presente trabajo se estudia experimentalmente la formación de cráteres tipo doblete, generados por impacto binario, caracterizados por poseer una línea recta central entre las dos depresiones de cráteres que se traslapan entre sí. Este tipo de estructuras se pueden observar en las superficies de Venus, Marte y la Luna. Aquí, estudiamos su proceso de formación a escala de laboratorio.

Para su estudio se diseñó un experimento que reproduce la morfología de cráteres tipo doblete, a velocidades bajas, que consiste en impactar simultáneamente dos proyectiles esféricos y sólidos contra una cama granular, variando las energías de impacto y separación entre proyectiles. Asimismo, se analiza la distribución y comportamiento del material granular eyectado después de la colisión. Se observa que un desfase temporal entre el impacto de los proyectiles en la cama granular ocasiona que la cresta central entre ellos se curve, por lo que se desarrolla un modelo geométrico que describe la ecuación de la curva que ajusta a la cresta central. Además, se hace un estudio análogo para cráteres generados por proyectiles individuales, con las mismas energías de impacto que los dobles, con el fin de realizar una comparativa. Comprender el mecanismo de formación a escala de laboratorio puede proporcionar información de lo que ocurre a escalas mayores.

Introducción

En 1609, Galileo observó por primera vez unas depresiones circulares en la superficie de la Luna a través de un telescopio que el mismo construyó. Tiempo después, se intentó dar una explicación para tales irregularidades de la superficie, una de las explicaciones más intuitivas fue que se trataba de cráteres generados por colisiones, aunque fue descartada al no dar explicación de qué tipo de objetos podrían impactar esas superficies, pues se sabía que el espacio interplanetario estaba totalmente vacío.

Aunque otras teorías, como la de origen volcánico, también fueron bastante defendidas durante siglos, no fue hasta la primera mitad del siglo XX que la hipótesis que postula que los cráteres lunares en su mayoría son generados por impactos, cobró importancia. Además, sabemos que impactos de meteoritos son el mecanismo dominante que originó cráteres en la superficies de la Luna y de otros cuerpos celestes, por lo que se considera el principal mecanismo de modificación geológica de los cuerpos sólidos del sistema solar [3].

Con el inicio de las primeras exploraciones en la década de los 60's, se obtuvieron imágenes que muestran mejor la morfología de las superficies planetarias, por lo que gracias al avance de la exploración espacial y al desarrollo de tecnologías de observación se puede tener un registro más nítido de la Luna y otras superficies planetarias, permitiendo observar una gran cantidad de estructuras cuyo mecanismo de formación aún no está entendido por completo.

Una forma de poder explicar dichas estructuras es tratar de reproducirlas mediante experimentos a escala de laboratorio usando materia granular, puesto que las superficies de varios cuerpos celestes en el sistema solar están cubiertos básicamente por arena y rocas.

En el presente trabajo, nos enfocamos en estudiar los cráteres tipo doblete, estos presentan dos depresiones centrales, como un traslape entre dos cráteres individuales y poseen un "yet" o cresta central como una línea de separación entre ellos, se forman a partir de la colisión simultánea de asteroides o bien pueden ser eventos temporalmente separados. La motivación de estudiarlos, es entender el mecanismo que los origina, porque si bien, es conocido el mecanismo de formación para cráteres generados por impacto individual, que son los que se encuentran con mayor frecuencia en las superficies planetarias, poco se ha estudiado experimentalmente el caso de impactos binarios. Para el caso de los cráteres tipo doblete, se sabe que por lo menos el 10 % de cráteres de impacto en la Tierra mayores a 20km de diámetro son dobletes, en Venus el 14% de sus cráteres también lo son, mientras que en Marte solo el 2% de sus cráteres son de este tipo.

En esta tesis se desarrolla un experimento para estudiar impactos simultáneos de proyectiles a bajas velocidades (es decir, velocidad de impacto menor que la velocidad del sonido en una cama granular $v < c$. $c \approx 100m/s$), dadas las condiciones del espacio, viabilidad y medios disponibles, este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de materia granular "GrainsLab", perteneciente al Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas", en el Ecocampus de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). También se desarrolla un modelo geométrico que permite conocer la posición en que los rayos de las cortinas de eyección colisionan entre sí y de esta manera nos permite establecer una relación entre el lugar geométrico del yet respecto al desfase en el tiempo entre el impacto de ambos proyectiles en la cama granular.

La estructura del trabajo está descrita de la siguiente forma: en el Capítulo 1, se realiza una revisión sobre la historia de los cráteres generados por impacto, también se revisa su clasificación

morfológica. En el Capítulo 2 se introduce la materia granular y se presentan algunas de sus características; también se discuten brevemente algunos experimentos que se encuentran en la literatura sobre el uso de la materia granular para estudiar las estructuras planetarias, como formación de cráteres simples, sistemas de rayos, así como formación de cráteres tipo doblete a altas velocidades.

En el Capítulo 3, se presenta el diseño experimental, se describen las componentes y metodología usada durante los experimentos, posteriormente se muestran los resultados obtenidos y su análisis; primero, los medibles experimentalmente como el diámetro de los cráteres, la altura y profundidad final alcanzada por los proyectiles; después, se hace un modelo geométrico que nos permite saber la posición y tiempo en que las cortinas de eyección se encuentran y chocan entre ellas, por último se presentan las conclusiones.

Capítulo 1

Cráteres

La observación del cielo nocturno ha llevado a un sinfín de descubrimientos, así como han surgido muchas dudas acerca de lo que se observa; un ejemplo de ello son los cráteres; desde la primera vez que fueron observados en la superficie de la Luna hasta 3 siglos después, se han postulado y debatido distintas hipótesis acerca de su formación; sin embargo, hasta hace poco menos de un siglo con el desarrollo de instrumentos de observación y el inicio de las exploraciones espaciales se ha podido esclarecer el mecanismo que origina los cráteres.

El impacto de meteoritos y la posterior formación de cráteres se conoce como uno de los principales procesos geológicos de modificación de las superficies sólidas de los cuerpos del sistema solar. [13]. Si bien, son conocidos diversos mecanismos que generan cráteres: explosiones [10], colapsos de cavidades subterráneas [11], y erupciones volcánicas [12], aquí nos enfocaremos en entender el mecanismo de cráteres generados por impacto. Una revisión muy completa sobre las primeras explicaciones sobre el origen de los cráteres lunares se encuentra en [3]. En esta sección, revisaremos dicha historia.

1.1. Historia de los cráteres generados por impacto

En 1609, Galileo Galilei observa la superficie de la Luna por primera vez a través de un telescopio fabricado por él mismo, observa que la superficie lunar no es totalmente lisa (presenta irregularidades), reconoce unas depresiones circulares con picos centrales. Observa en la Luna partes brillantes, que consideraba picos de montañas, mientras las partes oscuras se referían a los valles. Sin embargo, no estaba claro cómo es que se formaban.

Se hicieron mapas Lunares, clasificando algunas de las morfologías vistas, como valles, montañas, depresiones, etc., análogos a la superficie terrestre, como el mapa de Michel Florent van Langren en 1645; mientras que en 1647 Hevelius publica “Selenographia” donde se introduce la nomenclatura Lunar. El mapa lunar de Riccioli (véase Fig. 1.1), publicado en 1651, es de gran importancia porque postula la base del sistema de nomenclatura lunar para designar nombres de cráteres, regiones lunares que es usado hasta hoy en día [5].

En 1665 Robert Hooke, publica su trabajo titulado “Micrographia”, en donde tras hacer observaciones a la Luna, describe que hay hoyos circulares en la superficie similares a los cráteres que se observan en la cima de las montañas en la Tierra, además, realiza algunos experimentos para explicar y recrear lo que observó en la región lunar *Mons Olympus*, estos consistían en dejar caer objetos sólidos en arcilla húmeda que como resultado se formaban estructuras que asemejaban a los cráteres observados en la Luna (Fig. 1.2); sin embargo, rechazó la idea de que los cráteres se formaran así, debido a que no se explicaba de donde podrían provenir los objetos que chocaran con la superficie lunar, recordemos que en su época se creía que el espacio interplanetario estaba vacío. Realizó otro experimento que consistía en hervir alabastro y notó que se formaban unas burbujas

CAPÍTULO 1. CRÁTERES

1.1. HISTORIA DE LOS CRÁTERES GENERADOS POR IMPACTO

que al explotar dejaban un hueco central, por lo que esto explicaría mejor los cráteres puesto que la morfología era similar a los cráteres lunares, lo cual sugería que en la Luna había un mecanismo de formación de cráteres análogo a la formación de volcanes en la Tierra.



Figura 1.1: Mapa de la superficie Lunar de Riccioli (1651). Figura tomada de [3].

En 1791, el astrónomo Johann Hieronymus Schröter fue el primero en usar la palabra “cráter” para nombrar a las depresiones observadas en la Luna [9], publica su trabajo "Selenotopographische Fragmente", donde describe con mayor detalle las regiones lunares y su relieve. Realizó mediciones topográficas y usando estos datos, construyó modelos de cráteres con arena, señalando que el volumen del borde del cráter era igual al volumen de la depresión del cráter, que interpretó como evidencia de que el borde del cráter fue formado con la ceniza de erupciones volcánicas. Desafortunadamente, también postuló haber observado campos verdes en la Luna y otras inconsistencias [3, 5].

La hipótesis que explicaba que los cráteres lunares tenían un origen volcánico, fue sostenida por astrónomos durante muchos siglos, puesto que el surgimiento de volcanes en la Tierra era un mecanismo conocido y se creía que podía ocurrir de manera análoga en la Luna.

A pesar de que Hooke ya había propuesto la formación de cráteres por impacto, no cobró gran importancia, hasta que con el descubrimiento de asteroides y meteoritos se retoman investigaciones respecto a cómo afecta la caída de meteoritos al relieve.

Los asteroides fueron descubiertos en 1801 por el trabajo de los físicos E.F.F. Chladni y E. Biot de Francia; además, eventos subsecuentes como las lluvias de piedras que cayeron en las ciudades de L’Aigle en Francia en 1803 y en Connecticut en 1807, mostraron que se trataba de objetos provenientes del espacio y no de otro lugar de la Tierra, esto reforzó la hipótesis de que los cráteres de la Luna se formarían por impacto, así como lo hicieron en la Tierra [4, 5].

Los astrónomos Johann Heinrich Madler y Wilhelm Beer trabajaron en un observatorio privado, entre los años 1834 y 1837 publicaron mapas y atlas con información precisa sobre la superficie lunar; sin embargo, sostenían la teoría de que los cráteres tenían origen volcánico. En 1849, John Frederick Herschel, hijo de William Herschel, en su libro “Outlines of Astronomy” sostuvo que los cráteres lunares eran un claro ejemplo de cráteres volcánicos, puesto que eran similares al Volcán Vesubio en Italia.

En 1873 Richard Anthony Proctor, astrónomo, publica “La Luna: sus movimientos, aspecto,

CAPÍTULO 1. CRÁTERES

1.1. HISTORIA DE LOS CRÁTERES GENERADOS POR IMPACTO

paisaje y condición física” [7]. En él, rechazaba las analogías que hacían entre la Luna y la Tierra, fue de los primeros en defender seriamente la teoría de impacto para formación de cráteres lunares, decía que estos se formaron en etapas muy tempranas de la Luna, cuando su superficie era muy blanda y objetos impactaron contra ella. Sin embargo, no cobró tanta importancia debido que un año después Nasmuth y Carpenter publican su trabajo que fue mejor aceptado, debido a la cantidad de imágenes que presentaban.

En 1874, los astrónomos James Nasmyth y James Carpenter, publicaron “The Moon”, donde claramente la Luna tiene un tratamiento de planeta y es descrito como otro mundo, en ese trabajo se discuten las condiciones de temperatura, el relieve, la probabilidad de existencia de vida, entre otros temas conocidos hasta el momento. Nasmyth y Carpenter explicaron el surgimiento de los cráteres como si se tratara de volcanes, donde los flujos de lava intervienen en la aparición de un pico central en los cráteres, y si un cráter no tiene pico central quiere decir que este se llenó con lava. A partir de las formas observadas en la Luna a través del telescopio recrean modelos con yeso, que capturan mediante fotografías bajo iluminación lateral con la técnica fotográfica heliográfica usada en la época, tal como se muestra en la Fig. 1.3 [6]. El contenido de estas fotografías de cráteres lunares y cadenas montañosas ayudó en gran medida a crear la idea de cómo se verían los paisajes lunares, estas ilustraciones astronómicas permanecieron vigentes en la mayor parte del siglo XX ya que se utilizaban en películas de ciencia ficción.

En 1892 Grove Karl Gilbert, tras estudiar cráteres lunares, realiza experimentos de impacto de objetos sólidos contra arcilla y concluye que este es el único mecanismo que describía bien la formación de cráteres, no obstante, reconocía que el mayor desafío de la hipótesis de impacto era explicar la circularidad tan evidente que tenían, explica que para ángulos de impacto respecto a la superficie cercanos a 10° , el cráter tenía que parecer más bien elíptico y no circular. Además, señaló que si fueran cráteres generados por volcán, estos se encuentran en relieves altos debido a

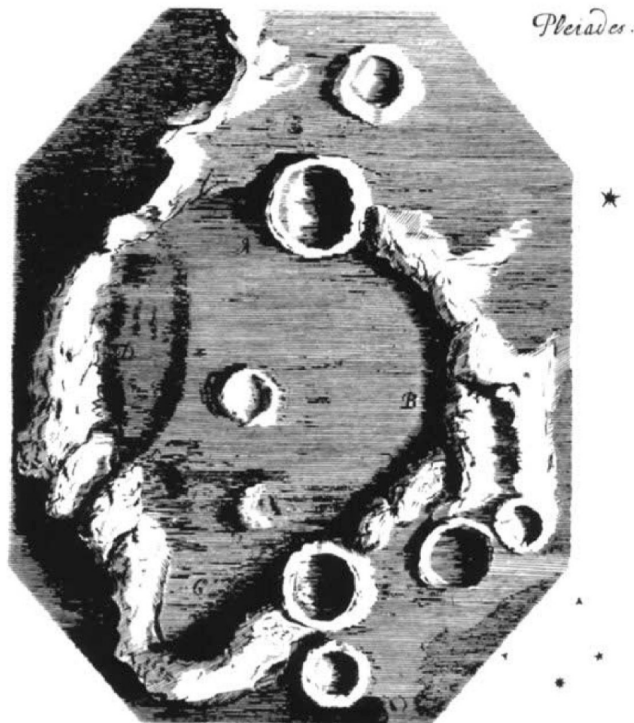


Figura 1.2: Experimentos que Hooke realiza con arcilla publicados en 1665 en "Micrographia". Figura tomada de [4].



Figura 1.3: Heliotipo, Placa no. 19 The moon Carpenter.Nasmyth muestra cráteres que se traslapan unos con otros. Figura tomada de [6].

que expulsan material y forman laderas, mientras que los generados por impacto más bien aparecen en terrenos planos. Publicó sus aportaciones en una revista poco leída, por lo que no llegó a muchos astrónomos y geólogos.

En trabajos publicados por William Henry Pickering en 1903, quien era director del observatorio del colegio de Harvard, describe que entre sus observaciones en la Luna había hielo, tormentas de nieve, vegetación, etc., también explica que los cráteres lunares son el resultado de explosiones de vapor dentro de la capa de nieve de la Luna. Lo cual rechaza la teoría propuesta por Gilbert. [3]

Vemos que la hipótesis de impacto fue propuesta esporádicamente a lo largo de los siglos, sin embargo, no lograba su aceptación porque no se conocía la física de los cráteres de impacto, y el porqué siempre se producían grandes cráteres circulares, además de la prevaleciente aceptación del vulcanismo, hasta antes del siglo XX la mayor parte de astrónomos y geólogos creían que los cráteres de la Luna eran volcanes extintos. No fue hasta comienzos del siglo XX que la teoría de impacto se mejoró y en consecuencia comenzó a ganar una mayor aprobación.

Uno de los primeros estudios en defensa de la teoría de impacto fue formulada por Ernest Öpik en 1916, quien postuló que un objeto a gran velocidad que impacta la superficie (ya sea de la Tierra o de la Luna) es comparable a una explosión, teniendo como resultado cráteres circulares. Esta investigación fue publicada en ruso en un diario de Estonia, por lo que su alcance fue muy bajo y era totalmente desconocido para los científicos occidentales.

En 1919, el físico Herbert E. Ives, tras observaciones hechas durante la primera Guerra Mundial, nota que los cráteres generados por explosiones son análogos a los cráteres lunares. Tomando en cuenta que dadas las altas velocidades de los proyectiles espaciales, la energía cinética que se libera tras una colisión provocaría una poderosa explosión de fuente puntual, que generaría un cráter circular muchas veces más grande que el proyectil [6].

En 1921, Alfred Lothar Wegener, meteorólogo y geofísico, publica un artículo en el que discute las hipótesis dominantes. Descartando por completo las que se refieren a burbujas, mareas y volca-

CAPÍTULO 1. CRÁTERES

1.1. HISTORIA DE LOS CRÁTERES GENERADOS POR IMPACTO

nes. Además, realiza experimentos que consistían en el impacto de proyectiles sólidos contra yeso en polvo, descubrió que siempre se formaba un pico central cuando el espesor de la capa de polvo era inferior al 10% del diámetro del cráter, o cuando se colocaba una capa dura, como una lámina de estaño, debajo de la capa delgada de polvo objetivo [4]. Sin embargo, sus investigaciones no fueron muy difundidas.

En 1924 y 1930, el astrónomo Algernon Charles Gifford publicó su trabajo en defensa de la teoría de impacto, la cual fue más leída que la de Öpik llamando la atención de astrónomos y físicos. Alrededor de estos años, el ingeniero minero Daniel Moreau Barringer explora el “Coon Butte” (actualmente conocido como el Cráter Barringer), localizado en Arizona con un diámetro de 1.2 km, donde fueron encontrados restos de meteorito, por esta razón se buscaban depósitos de metales debajo del suelo del cráter. Algunos geólogos como Gilbert creían que se trataba de un cráter de origen volcánico y el hecho de que hubieran fragmentos de meteorito era solo coincidencia. Sin embargo, físicos y astrónomos que conocían el trabajo de Öpik y Gifford propusieron que un cuerpo de 20 a 50 m de diámetro es suficiente para producir un cráter de más de 1 km de diámetro, lo cual explicaría la poca presencia de material de meteorito en comparación al cráter tan grande generado. El nombre de dicha estructura cambió de “Coon Butte” a “Meteor Crater” o bien Cráter de Barringer y estas investigaciones ayudaron al entendimiento de cómo se generan los cráteres por impacto ganando una mayor aprobación.



Figura 1.4: Meteor Crater o Cráter Barringer en Arizona, foto tomada del Arizona Geological Survey Photographic Atlas (1980).

En 1948, el astrofísico, Ralph Baldwin en su libro “The face of the Moon” [8], aportó en gran medida a la hipótesis de origen de los cráteres lunares por impactos, sus investigaciones fueron motivadas tras observar fotografías tomadas por el Observatorio del Monte Wilson que mostraban la región lunar de Mare Imbrium donde se visualizaban valles y líneas radiales a un cráter. Baldwin explicó que solo una explosión muy grande podría transportar montañas de roca radialmente a cientos de kilómetros de Mare Imbrium, abriendo surcos, descartando totalmente a la hipótesis del vulcanismo, puesto que la energía necesaria para excavar agujeros tan grandes y distribuir escombros a lo largo de cientos de kilómetros era imposible en cualquier erupción volcánica; por lo que solo los impactos de meteoritos gigantes podrían suministrar las energías necesarias. Asi-

CAPÍTULO 1. CRÁTERES

1.1. HISTORIA DE LOS CRÁTERES GENERADOS POR IMPACTO

mismo, comparó las cadenas montañosas arqueadas de los Apeninos, los Alpes con los Cárpatos que rodeaban el Mare Imbrium, como se muestra en la figura 1.5, concluyendo que este era el cráter de impacto más grande de la Luna, de igual manera los Mare Crisium, Nectaris, Humorum, Serenitatis y Humboldtianum eran cráteres originados por el mismo mecanismo [5].

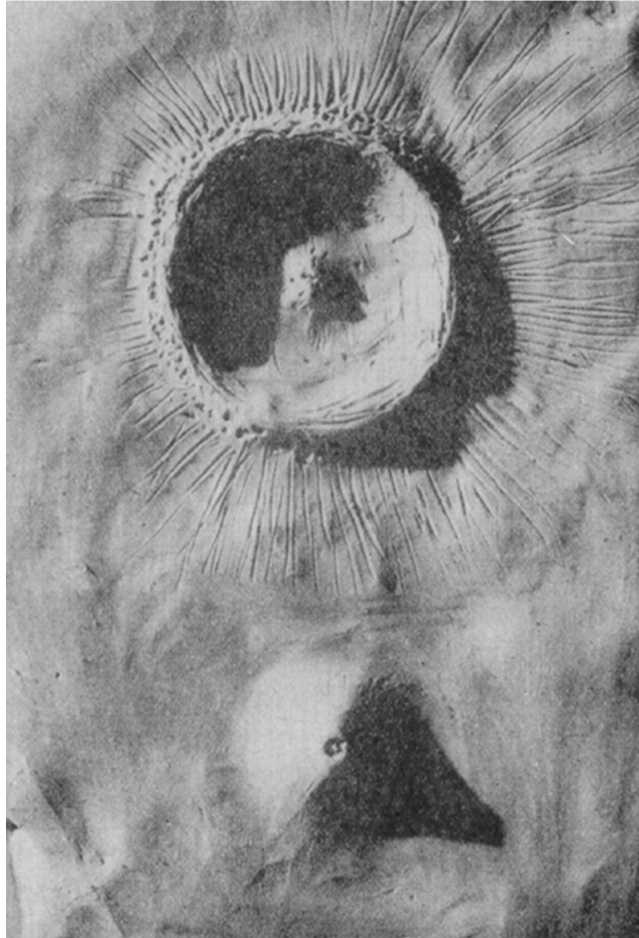


Figura 1.5: Modelo a escala de un cráter lunar y un volcán terrestre. Figura tomada de “The face of the moon” [8].

Con la Segunda Guerra Mundial las investigaciones de Baldwin sobre la Luna se vieron interrumpidas, no obstante, de los militares recibió fotos de cráteres producidos por bombas y proyectiles. Notando que los cráteres producidos por explosiones de bombas eran parecidos con los de impacto tanto lunares como terrestres. Graficó en log-log los diámetros de los cráteres respecto a la profundidad, resultando una curva continua que unía todos estos cráteres. Además, los comparó con las dimensiones de los cráteres volcánicos y descubrió que no muestran tal relación. Finalmente estos resultados convencieron de inmediato a muchos astrónomos.

Sin embargo, aún algunos astrónomos continuaron aferrándose a la teoría volcánica durante algunas décadas más, hasta que gradualmente la hipótesis del impacto de los cráteres lunares se volvió más completa con el inicio de la era de exploraciones espaciales, puesto que las naves espaciales transportan instrumentos que han ampliado enormemente el conocimiento de los planetas y lunas.

Con el lanzamiento del Sputnik en 1957 comenzó oficialmente la era de las exploraciones espaciales. Tanto los soviéticos como los estadounidenses hicieron varias misiones espaciales, por un

lado los soviéticos desde 1957 hasta 1964 realizaron misiones con frecuencia; por otro lado, en 1969 el Apolo 11 aterrizó en la Luna y se concluye que de un impacto se originan casi todos los cráteres lunares. Tiempo después surgieron varias misiones espaciales más, como las Ranger, las cinco misiones Lunar Orbiters Clementine en 1994 y Lunar Reconnaissance Orbiter en 2009 que en conjunto han recolectado cientos de imágenes que muestran cráteres de todos los tamaños y otras morfologías.

Así como la historia de los cráteres se ha contado a partir de los cráteres lunares y terrestres debido a su accesibilidad, se han realizado más exploraciones espaciales en otros cuerpos celestes. En 1964, la de misión Mariner 4 reunió 22 imágenes donde se muestra la superficie de Marte erosionada y con cráteres. En exploraciones posteriores se han encontrado cráteres en casi todos los demás cuerpos celestes sólidos del Sistema Solar como en Venus, Tierra, Marte, y la Luna.

A pesar de que ya se aceptaba que los cráteres lunares eran originados por impacto, tras investigar el origen del Cráter Barringer en Arizona y los cráteres terrestres de Henbury, surgió otra teoría que cambiaría la percepción del mundo. En 1980, se publica “Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-tertiary Extinction” [13] donde se postula que la extinción de los dinosaurios fue debido a una colisión de un meteorito que impactó a la Tierra hace millones de años. Los geólogos no aceptaban la idea que objetos provinientes del espacio fueran un factor determinante en la evolucion geológica y biológica de la Tierra. La aceptación llegó una década más adelante, tras el descubrimiento del cráter de impacto “Chicxulub ” de 200 km de diámetro en México, que marcó el fin del Cretácico con la extinción de los dinosaurios y otras especies. Por lo que se concluye que la formación de cráteres de impacto es un proceso geológico fundamental en el Sistema Solar.

1.2. Morfología de los cráteres generados por impacto

La formación de cráteres de impacto aparece en casi todas las superficies de los cuerpos celestes sólidos del sistema solar y es un proceso geológico importante. Los cráteres de impacto se describen como depresiones con bordes circulares que puede presentar o no levantamientos centrales dependiendo de la energía de impacto del meteorito y la fuerza de la superficie impactada, la palabra cráter proviene del griego y esta palabra designaba un recipiente hondo. Si bien, es una descripción que se aplica a la mayoría de los cráteres, la forma del cráter está determinada por muchos factores, como la forma, velocidad y dirección del proyectil que impacta, así como la estructura de la superficie y edad del cráter. [9]

A continuación se muestra brevemente la clasificación morfológica de los cráteres.

1.2.1. Cráteres simples

Tienen forma de tazón, son comunes en la Luna en cráteres con diámetros menores a 15km, y en la Tierra en cráteres de 3km a 6km de diámetro.

El perfil de la cavidad se presenta una forma parabólica, tienen una pendiente suave. La razón que existe entre la profundidad del cráter es de alrededor de $1/5$ respecto a su diámetro; por lo que se puede decir que el diámetro del cráter es proporcional a la profundidad. Algunos ejemplos son: Meteor Crater en Arizona (Figura 1.4) o bien, el cráter Linné en la Luna.

1.2.2. Cráteres complejos

Son cráteres cuyo diámetro excede un valor crítico de 20km de diámetro en la Luna y mayores a 3km de diámetro para cráteres terrestres. La razón entre la profundidad del cráter y su diámetro D_h/D_c es de $1/8$. Es decir, el suelo de la cavidad del cráter es más plano que la de un cráter simple, también el ángulo de reposo de sus paredes es mayor. Además se caracterizan por tener paredes escalonadas, picos centrales, anillos concéntricos con picos montañosos irregulares.

1.2.3. Cráteres secundarios

Los cráteres secundarios se originan a partir de los escombros expulsados por el impacto de un cráter principal (primario), que viajan radialmente en forma de “cortina de eyección”, por lo que son impactos de velocidad relativamente baja, a pesar de que puede ocurrir alguna interacción entre los fragmentos de eyección en las partes más densas de la cortina, el movimiento general está descrito por la balística. [9]

Presentan una forma irregular, son poco profundos, pueden estar agrupados en líneas, a menudo están separados por dunas en forma de V conocidas como “patrón de espiga” y rodean a grandes cráteres principales, como en la figura 1.6 donde se muestran algunos cráteres secundarios alrededor del cráter Timocharis en la Luna, que tiene un diámetro de 30 km; también hay cráteres secundarios alrededor del cráter Tycho que además, presenta un sistema de rayos. Los cráteres secundarios pueden llegar a confundirse con pequeños cráteres simples, aunque estos últimos presentan bordes elevados uniformes, mientras que los secundarios pueden presentar un borde más alto en un lado cuya formación es a partir de impactos de bajo ángulo con las eyecciones arrojadas desde un cráter primario. [9, 23]

Los cráteres secundarios se extienden más allá de la cortina de eyección desde su cráter de origen. El tamaño máximo de estos es aproximadamente del 4% del diámetro del cráter primario, se encuentran en las superficies de la Luna, Marte y Mercurio; sin embargo, en Mercurio los cráteres secundarios son aparentemente varias veces más grandes y no se conoce con certeza cual es la causa.

Por otra parte, en los trabajos de [22, 23] describen a los cráteres secundarios como una “oleada de escombros”; además, mediante métodos fotogeológicos describen algunos de los criterios aplicados para identificar cráteres secundarios, enfocándose en el cráter Tycho y sus cráteres secundarios asociados. Entre los principales criterios, destacan que son conjuntos de cráteres con texturas superficiales nítidas y de apariencia reciente, presentan una tendencia general que el conjunto (clúster) apunta hacia Tycho, algunos cráteres tienen un montículo convexo en su suelo, alrededor de los cúmulos de cráteres pronunciados se observa un patrón con surcos y crestas en forma de V y localmente tienen textura rugosa.

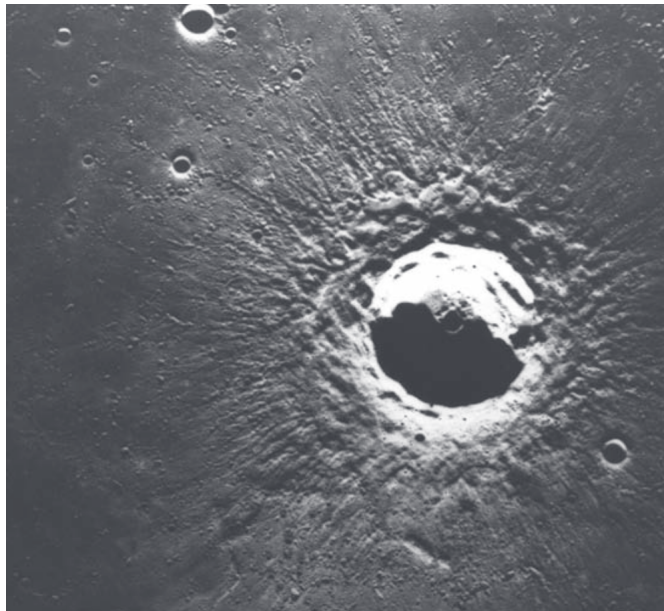


Figura 1.6: Cráter Timocharis en la Luna, cerca del borde del cráter se observan los depósitos del material eyectado en forma de dunas. Foto del Apolo 15 AS15-1005 recuperada de [9, Melosh 2011]

1.2.4. Cráteres tipo doblete

La mayoría de los cráteres observados en la Luna, Marte, y Tierra son producidos por el impacto de un solo meteorito. Sin embargo, existen cráteres producidos por impactos binarios, como el que se muestran en la figura 1.7, este tipo de cráteres se conocen como cráteres doblete que se caracterizan por poseer dos depresiones superpuestas entre sí, además presentan una línea recta central *yet* (cresta) entre las dos depresiones. Estas estructuras de impacto se encuentran en las superficies de la Tierra, Luna, Venus y Marte.

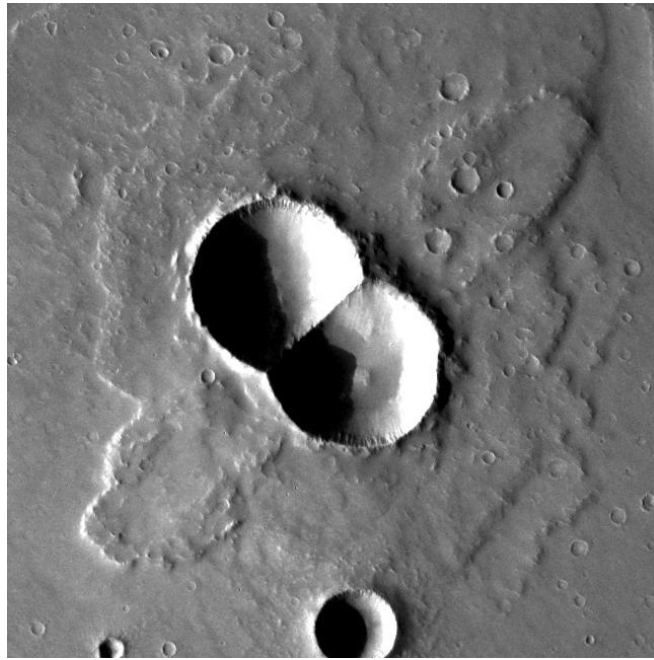


Figura 1.7: Cráter doble en Utopia Planitia, Marte. Foto tomada de NASA/JPL-Caltech/Arizona State University.

Se distribuyen de la siguiente manera, el 10% de cráteres de impacto en la Tierra mayores a 20km de diámetro son dobletes, en Venus el 14% de sus cráteres también lo son, mientras que en Marte solo el 2% de sus cráteres son de este tipo, son creados a partir de un impacto simultáneo de objetos de tamaños comparables o bien por eventos separados temporalmente. [16, 17]

Se han formulado hipótesis para explicar el impacto binario, en una de ellas se establece que esta forma de cráteres dobles se forman a partir de fragmentos de asteroides dispersados por fuerzas aerodinámicas durante el ingreso a la atmósfera [17]. Por otro lado, se cree que la forma del proyectil que impacta puede considerarse un impacto de asteroides binarios de contacto como el 4769 Castalia que se muestra en la figura 1.8) [17]. Sin embargo, los proyectiles necesitarían estar muy separados para formar cráteres dobles, por lo cual el mecanismo descrito anteriormente no resulta tan convincente.

Se ha propuesto un modelo que sugiere que el impacto binario puede generarse a partir de dos asteroides independientes que al cruzar la atmósfera de la Tierra interactúen gravitacionalmente orbitando respecto al centro de masa entre ellos, si los objetos pudieran separarse lo suficiente antes del impacto podrían producir cráteres tipo doblete. [25]

Por otro lado, se ha estudiado el efecto YORP, este puede inducir un cambio de giro en los asteroides binarios, dicho efecto surge a partir de la reflexión y absorción de la luz solar por la superficie de los asteroides. El efecto explica el aumento en la tasa de rotación de los asteroides NEA 2000PH5 y 1862Apollo12-14, aunque también depende de las propiedades térmicas del cuerpo, su

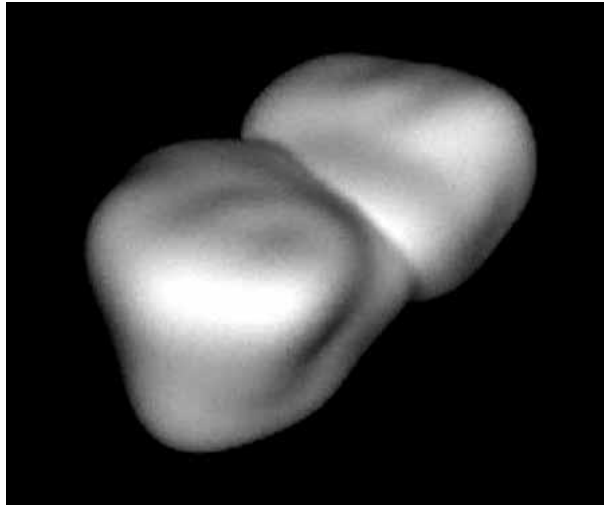


Figura 1.8: Asteroide binario 4769 Castalia. Foto de NASA/JPL.

forma y oblicuidad [18].

Capítulo 2

Materia granular para el estudio de procesos de formación de cráteres a escala de laboratorio

2.1. Materia Granular

La materia granular está definida como el conjunto de granos rígidos macroscópicos cuyo tamaño es $< 100\mu m$, son un medio disipativo ya que disipan su energía principalmente en colisiones inelásticas y fricción entre sí mismos, su tamaño debe ser lo suficientemente grande para considerarse en el régimen dominante gravitatorio más que en el régimen termodinámico es decir, no experimentan movimiento Browniano y no requiere de un tratamiento estadístico [15]. Los medios granulares están en un estado metaestable y son descritos como sistemas atérmicos. [21]. La materia granular combina algunos de los aspectos complejos de los sistemas físicos conocidos. Se empaquetan como sólidos ya que son partículas sólidas, pero fluyen como líquidos, pueden tomar la forma del contenedor. [19]

La materia granular se encuentra cubriendo la superficie de la Tierra en una gran cantidad de escenarios naturales, como la arena del fondo del mar, desiertos, dunas; así como en la superficie de otros planetas, satélites naturales y asteroides. Además, es sumamente usada en la industria de la construcción (grava, arena, cemento), farmacéutica (pastillas) y alimenticia (granos de sal, azúcar, café, arroz, frijol, etc.). A continuación, se presentan algunos de sus principales parámetros medibles.

2.1.1. Factor de Empaquetamiento

El factor de empaquetamiento, es un parámetro que describe que tan compactas están las partículas dentro de un sistema, o bien describe a la fracción de un volumen que es ocupado por las partículas dentro de él, es una cantidad adimensional, descrita por la ecuación (2.3):

$$\phi = \frac{v_{granos}}{v_{total}} \quad (2.1)$$

Se ha comprobado experimentalmente la reproducibilidad de algunos factores de empaquetamiento, por ejemplo, si se vierten suavemente una gran cantidad de esferas sólidas en un recipiente, su fracción de volumen ocupado será aproximadamente $fe = 0,61$, a este empaquetamiento se le conoce como empaquetamiento suelto aleatorio (Random Loose Packing). Por otro lado, si el contenedor se agitara verticalmente de manera repetida, la densidad aumenta a $fe = 0,64$, a esto se le conoce como empaquetamiento compacto aleatorio (Random Close Packing) . [36]

2.1.2. Ángulo de reposo

El ángulo de reposo es el ángulo que forma una pila de arena respecto a la horizontal como se muestra en la figura 2.1 [15]. Debido a que la estructura de la pila granular está sustentada por la fricción μ_f entre los granos que están en contacto, el ángulo de reposo puede estimarse por la siguiente ecuación:

$$\mu_f = \tan \theta_{\text{reposo}} \quad (2.2)$$

Una pila de arena puede presentar biestabilidad, es decir, puede fluir mediante avalanchas que van ajustando el ángulo de reposo alrededor de algún valor crítico; o bien, puede mantenerse en reposo cuando la fuerza de corte no excede a la fuerza de fricción. [20, 19].

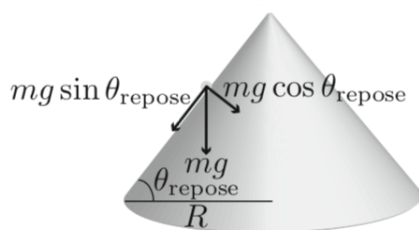


Figura 2.1: Esquema del ángulo de reposo de una pila de arena. Figura tomada del libro [15, Katsuragi 2016].

2.2. Análisis dimensional

En los experimentos de laboratorio, a pesar de que reproducen bien las morfologías observadas en superficies planetarias, no se hacen bajo las mismas condiciones que los fenómenos ocurridos en el espacio, puesto que las condiciones de presión atmosférica, gravedad y temperatura difieren y no son posibles de igualar; sin embargo, se utiliza el análisis dimensional, que es muy usado en mecánica de fluidos, que también puede ser empleado en otros sistemas físicos.

En otras palabras, el análisis dimensional es muy útil para obtener la ley de escalamiento. Una vez que esta se obtiene mediante los experimentos de laboratorio, la ley de escalamiento se puede extrapolar a escalas mayores o menores. Por lo tanto, se puede estimar el orden de varias cantidades físicas. [15]

Se usa el teorema Pi-Buckingham que consiste en caracterizar al sistema en términos de las variables involucradas, posteriormente seleccionar las variables básicas y formar parámetros adimensionales de tal forma que sean la combinación de las variables básicas. Se realiza para ambos sistemas físicos (el real y el experimental) si los parámetros adimensionales de los sistemas son iguales, puede esperarse un comportamiento similar entre el modelo y el prototipo. A continuación se muestran algunos números adimensionales usados en materia granular.

- *Factor de Empaquetamiento*: representa el porcentaje del volumen que es ocupado por los granos.

$$\phi = \frac{v_{\text{granos}}}{v_{\text{total}}} \quad (2.3)$$

- *Número de Bagnold*: Cuando los granos están dispersos en un fluido viscoso, se establece una relación entre la inercia granular y la viscosidad del fluido η . Siendo ρ_g la densidad de los granos, D_g el diámetro del grano, $\dot{\gamma}$ la tasa de deformación de corte y λ_B la concentración lineal.

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

$$B_a = \frac{\rho_g D_g^2 \lambda_B \dot{\gamma}}{\eta} \quad (2.4)$$

- *Número de Shields*: cuando la mezcla de fluidos con granos están bajo la influencia de la gravedad y la densidad de los granos ρ_g es mayor que la densidad del fluido ρ los granos quedan depositados en la parte inferior. Si el fluido se moviera con velocidad U los sedimentos de granos comenzarán a moverse después, por lo que este número sirve para determinar el movimiento de dichos granos.

$$S_h = \frac{\rho}{\rho_g - \rho} \frac{U^2}{g D_g} \quad (2.5)$$

- *Número inercial*: sirve para describir los efectos dinámicos en la materia granular entre la inercia de corte y el reordenamiento microscópico de la estructura de los granos bajo la presión de confinamiento p .

$$I = \frac{\dot{\gamma}^{-1} D_g}{\sqrt{p/\rho_g}} \quad (2.6)$$

Si los números adimensionales son similares entre un modelo y el sistema real, entonces las observaciones que se obtienen con experimentos de laboratorio pueden usarse también para describir eventos a escala planetaria.

2.3. Experimentos con Materia Granular para el estudio de morfologías planetarias

Como vimos en el capítulo 1 en las superficies planetarias existe una gran cantidad de cráteres que son el registro fósil de impacto de meteoritos; para comprender la dinámica del impacto se han realizado experimentos modelo en el laboratorio produciendo impactos de proyectiles tanto sólidos como granulares en medios granulares [33, 30, 40, 39, 31, 38] que han sido fundamentales para entender la formación de cráteres simples y complejos. Asimismo, se han estudiado otras estructuras como el sistema de rayos que se ha observado en la Luna [35, 32]. Finalmente se presentan estudios experimentales y simulaciones numéricas para los cráteres doblete [27, 26, 28, 29]. Las superficies planetarias de los cuerpos sólidos del sistema solar se encuentran cubiertas por materia granular, por lo que su uso en experimentos es conveniente ya que puede deformarse fácilmente y reproduce la morfología de los cráteres, el estudio del impacto a bajas velocidades podría revelar la dinámica de lo que ocurre a gran escala.[15].

2.3.1. Estudio de cráteres simples y complejos

En el trabajo de Walsh [33] se estudia la morfología y la razón de escalamiento en las dimensiones de los cráteres respecto a la energía de impacto. Mediante un experimento donde se deja caer un proyectil esférico de acero a cierta altura en un cama granular lisa compuesta de partículas esféricas de vidrio, se realizó para distintos tamaños de granos y alturas de impacto, siguiendo la relación de que a mayor altura se usaba un tamaño de grano menor.

En la figura 2.2 vemos que los resultados de los experimentos, estos reproducen cráteres simples y complejos similares a los cráteres planetarios y lunares. En (a) se muestra un cráter simple con un borde bien definido, se obtiene para el tamaño de granos mayor y una baja altura de impacto, en (b) observamos un cráter con pico central, que se produce a partir del yet recto vertical resultante de la eyección de material granular al momento en el que el proyectil penetra el medio; para (c) se usa el tamaño de grano más pequeño y una energía de impacto mayor a las anteriores, se visualiza un cráter complejo con el borde superior poco definido y con uno anillo concéntrico en las paredes

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

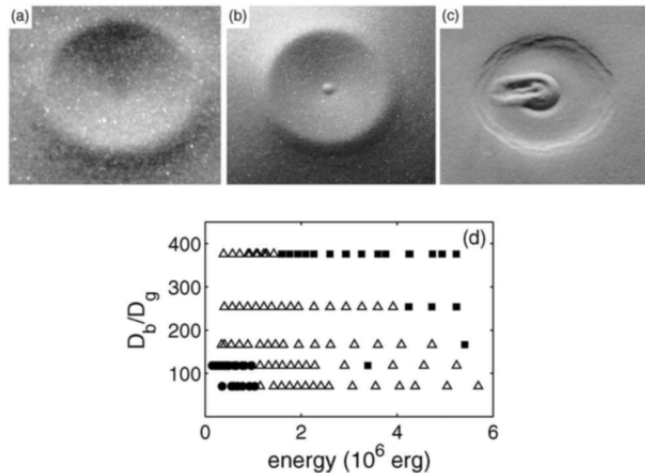


Figura 2.2: Se muestra un (a) cráter simple, en (b) una cráter con un pico central, en (c) cráter con una estructura compleja. En la gráfica (d) presenta los rangos de energía usados y su relación respecto al tamaño diámetro del proyectil dividido entre el diámetro de grano de la cama granular. Figura tomada del artículo [33].

de la depresión, esto ocurre debido a que el cráter transitorio tenía una pendiente mayor al ángulo de reposo, que provocó derrumbe de material hacia el centro del cráter. Se muestra también en (d) una gráfica que relaciona la energía de impacto en relación al diámetro del proyectil dividido entre el diámetro de grano usado.

Se estudió también la relación entre el diámetro del borde del cráter respecto la altura de impacto, en la gráfica 2.3 todos los datos caen en una misma línea de la gráfica log-log con pendiente 0,251 indica que se sigue una ley de potencias a la 1/4 que demuestra que se encuentra en un régimen mayormente gravitatorio. Además, los distintos colores representan los tamaños de grano y se muestra que no hay efecto para los 4 granos de tamaño mayor.

Finalmente, se reporta el efecto de la profundidad del cráter en relación a la energía empleada, esta relación sigue también una ley de escalamiento a la 1/4, o bien, la energía requerida para excavar un cráter es proporcional a su volumen multiplicado por su profundidad.

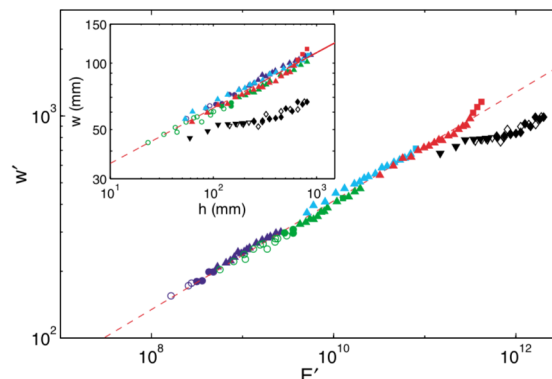


Figura 2.3: Gráfica log-log del diámetro del cráter w respecto a la altura de impacto h , los diferentes colores de los puntos corresponden a los tamaños de granos usados, siendo los puntos negros los de menor tamaño de grano $45 - 90\mu m$. Figura tomada de [33].

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

De manera análoga en [40] se realizan experimentos de impacto, a bajas velocidades, de proyectiles en camas granulares para distintos tamaños de grano, para describir cuantitativa y cualitativamente a los cráteres, al igual que en trabajos previos, se encuentra una dependencia del diámetro del cráter respecto a la energía de impacto. Los experimentos consisten en dejar caer proyectiles con diferentes rugosidades y materiales (vidrio, metal y carburo de tungsteno), con el objetivo de variar su densidad, y estudiar el efecto que tienen estas variables en la morfología final de los cráteres.

Adicionalmente, usando perfilometría láser y empleando métodos numéricos con el fin de investigar detalladamente su morfología, se digitaliza en 3D la forma del cráter resultante (Fig. 2.4A), mientras que en la figura 2.4B se muestra de manera esquemática un corte transversal del cráter al que se le ajusta una función hiperbólica que describe bien al perfil.

Entre los resultados principales, encuentran que el tamaño de granos usados en la cama granular y la rugosidad de la superficie de los proyectiles no influyen en el tamaño de los cráteres. Otra comparación realizada fue para proyectiles con diferentes densidades impactados a energías iguales, en los que se observó que los proyectiles de menores densidades (vidrio) producen un cráter más profundo que los proyectiles de densidades mayores (carburo de tungsteno), por lo que el radio y profundidad dependen de la energía de impacto.

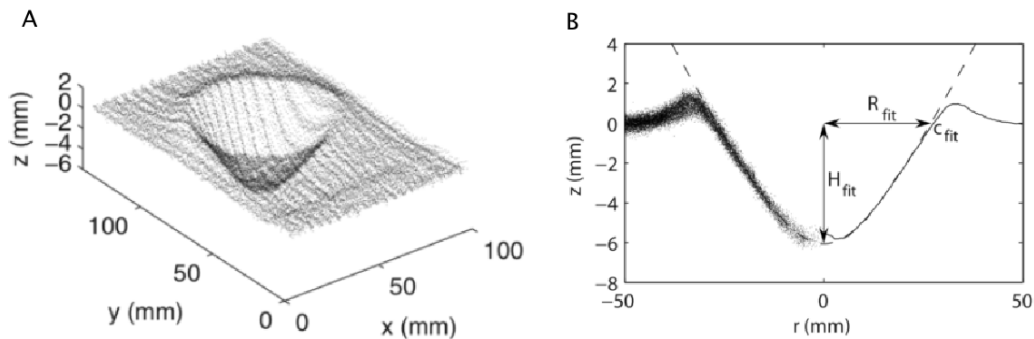


Figura 2.4: En (A) se muestra un modelo en 3D de la morfología del cráter (B) gráfica del corte transversal del cráter, con el ajuste de una función hiperbólica. Imagen tomada de [40].

Por otro lado, se ha buscado recrear mejor la mecánica de impacto como el que ocurre a escala planetaria, puesto que los asteroides que impactan las superficies presentan porosidades, por lo que en [31] se realizaron experimentos de laboratorio a bajas velocidades con proyectiles granulares que impactan medios granulares.

En estos experimentos se hacen proyectiles granulares mezclando agua con arena y dejándolos secar en un horno hasta obtener proyectiles compactos y con distintos factores de empaquetamiento, las fuerzas cohesivas de los proyectiles juegan un papel importante ya que recrean los asteroides con porosidades; además, la energía de impacto es suficiente para superar la cohesión entre los granos de los proyectiles, de tal forma que estos tras la colisión se fragmentan y se esparcen por la superficie de la cama granular.

De los experimentos se obtienen estructuras que se asemejan a cráteres simples y complejos observados en la Luna y otras superficies planetarias, como se muestra en la figura 2.5 (a) para proyectiles granulares con factor de empaquetamiento bajo se forman cráteres simples con forma de cuenco, mientras que para proyectiles con factor de empaquetamiento alto se forman cráteres con pico central como se muestra en (b), de igual forma se obtienen cráteres con pico central para un proyectil sólido como se muestra en (c). Los tres experimentos se realizan a la misma altura de impacto. Revisando la distribución de material granular los dos últimos (b) y (c), vemos que en (b) el pico central se forma a partir del material del mismo proyectil; además, se concluye que proyectiles granulares crean cráteres más grandes que los sólidos a pesar de seguir una ley de

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

escalamiento similar ($h^{1/4}$).

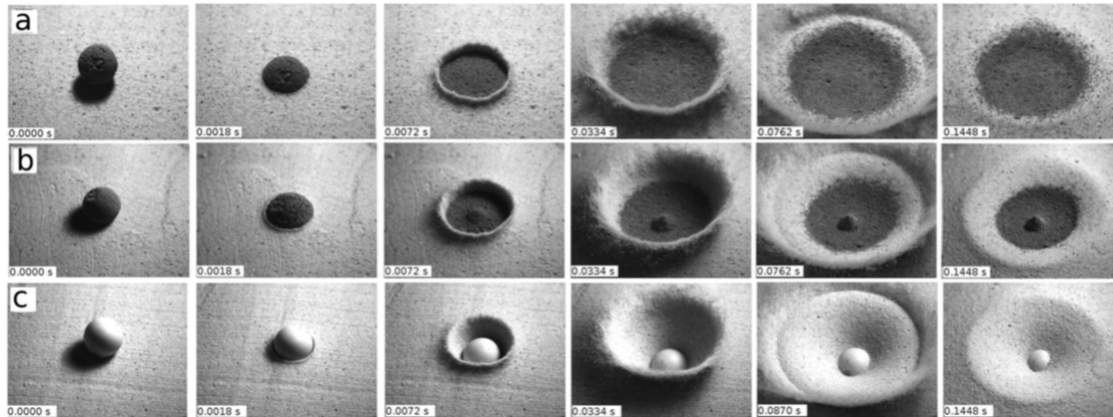


Figura 2.5: Se muestra (a) un cráter simple formado por un proyectil granular con bajo factor de empaquetamiento, (b) cráter con pico central, originado por impacto de proyectil con factor de empaquetamiento mayor, (c) cráter con pico central producido por esfera sólida. Figura tomada de [31].

2.3.2. Sistemas de Rayos

Se han estudiado otras estructuras que están presentes en las superficies planetarias, como es el caso de los sistemas de rayos lunares que son cráteres desde los que se extienden rayos de manera radial.

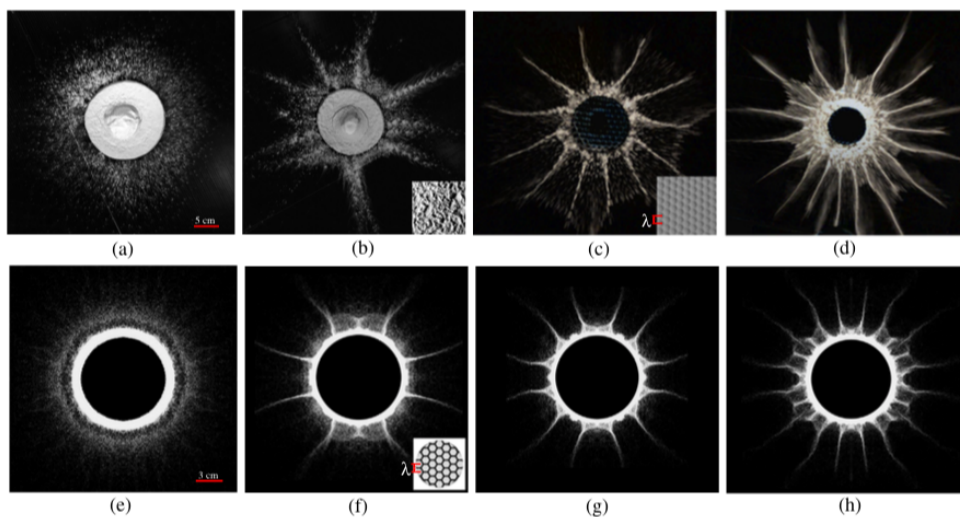


Figura 2.6: Los experimentos de (a)-(d) se hacen a bajas velocidades en (a) y (e) se usa una cama granular lisa que después de el impacto genera esparcimiento uniforme del material granular, en (b) y (c) en un lecho con ondulaciones se genera un sistema de rayos, en (d) y (h) se muestra un sistema de rayos largos y a su vez se presentan rayos secundarios. De los experimentos (e)-(f) se hacen a hipervelocidades. Figura tomada de [35].

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

En experimentos de impactos de proyectiles, generalmente la superficie de la cama granular está lisa, de modo que el material se eyecta uniformemente al rededor del cráter, por lo que en [35] realizaron experimentos dejando caer proyectiles sobre una cama granular con ondulaciones regulares hexagonales dadas por un número de onda λ de este modo el lecho granular es más parecido a las superficies planetarias, como resultado se generan sistemas de rayos como los que se muestran en la figura 2.6. En los experimentos se caracteriza al sistema según el número de rayos N que se forman y se obtiene que siguen una dependencia lineal respecto al diámetro del proyectil D y la longitud de onda, es decir $N \propto \frac{D}{\lambda}$.

La eyección en un sistema de rayos origina un anillo angosto en el centro en el lugar del impacto. En los experimentos se comienza con impacto sobre una cama lisa (ver 2.6 (a)) que genera una eyección uniforme del material, posteriormente se aumenta el número de ondulaciones. Gracias a estos resultados se pueden entender mejor el mecanismo de formación de los sistemas de rayos que rodean cráteres de impacto en la Luna y otros cuerpos planetarios.

Por su parte, [32] estudia también a los sistemas de rayos, mediante un experimento de impacto sobre una cama granular plana, donde se dejan caer proyectiles no esféricos (triangulares, circulares, forma de estrella) y proyectiles con protuberancias distribuidas uniformemente. Se establece una relación entre el número de rayos N_r respecto al número de protuberancias N_p en los proyectiles.

Las estructuras resultantes se muestran en la figura 2.7, vemos que cuando el proyectil tiene 12 protuberancias, se generan 12 rayos, mientras que cuando $N_p = 2, 4, 8$ se producen $N_r = 2, 4, 16$ rayos. A partir de esto crean un modelo que describe la dinámica de expulsión del material granular al impactar contra la cama granular, donde las protuberancias están uniformemente distribuidas y al estar juntas, dos rayos provenientes de cada protuberancia convergen generando un rayo de mayor tamaño. También se realizaron experimentos análogos para proyectiles amorfos con curvaturas cóncavas simulando meteoritos reales, de los que se obtienen sistemas de rayos, lo que sugiere que se pueden generar sistemas de rayos con meteoritos con concavidades muy pronunciadas.

Por otro lado, al realizar impactos de cuerpos con diferentes geometrías, se muestra que el tamaño del cráter sigue la misma ley de potencias con la energía de impacto encontrada para proyectiles esféricos; además, a medida que aumenta la energía de impacto el borde del cráter se vuelve circular, es decir, la forma del cráter es independientemente de la forma del proyectil que lo origina, que ayuda a comprender por qué la mayoría de los cráteres de impacto en la naturaleza son redondeados.

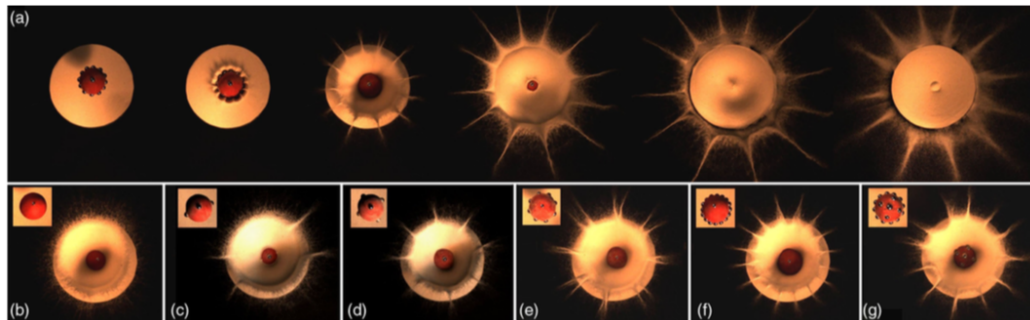


Figura 2.7: En (a) se muestra un sistema de 12 rayos a partir de un proyectil con 12 protuberancias, en (b) un proyectil sin protuberancias origina esparcimiento uniforme del material granular, de (c) a (f) para $N_p = 2, 4, 8$ se obtienen $N_r = 2, 4, 16$ y en (g) un proyectil con 22 protuberancias en total, siendo 12 las localizadas sobre la circunferencia produce 12 rayos. Figura tomada de [32].

2.3.3. Cráteres tipo doblete

El estudio de cráteres generados por impacto se ha centrado principalmente en los producidos por un solo proyectil; sin embargo, existen estructuras complejas que se originan por impactos binarios y que apenas se han investigado (sistemas binarios) como es el caso de los cráteres tipo doblete, ver figuras 1.7 y 2.8, estos se encuentran en las superficies de Venus, Marte, Mercurio y la Luna como vimos en la sección 1.2.4, no obstante, dada la densidad de cráteres en general, no resulta tan fácil determinar cuales cráteres se formaron por impacto binario y cuales solo están muy cercanos, esto sugiere que cráteres pequeños pudieron ser borrados debido a una nueva colisión.

Para determinar la densidad que hay de cráteres doblete respecto al número de cráteres total en las superficies de Tierra y Marte, [26, Miljkovic et al. 2013] han realizado simulaciones numéricas. Primero, a partir de una muestra de 130 cráteres obtenida de la base de datos seleccionan cráteres cuyos diámetros sean mayores a $4km$, después usan ciertos criterios morfológicos para proponer pares de cráteres que pudieron ser producidos debido a impacto binario. Entre estos criterios están: (a) la separación entre los cráteres debe ser menor que 120 veces el diámetro estimado del asteroide principal D_p , calculado a partir de leyes de escalamiento conocidas para el tamaño del proyectil que genera un cráter de cierto diámetro, además (b) deben coincidir las edades de los cráteres en un rango establecido de incertidumbre.

En el caso de cráteres terrestres, de una muestra de 28 candidatos, obtienen una tabla que contiene los posibles cráteres doblete, entre ellos: los lagos de Clearwater del este y oeste en Quebec, Canadá (ver figura 2.8), Kamensk y Gusev, Ries y Steinheim, estos ya se habían reportado con anterioridad, agregaron un par más a la lista: Crawford y Flaxman en Australia, y Serra da Cangalha y Riachao Ring en Brasil. De manera análoga, se hicieron estudios para los cráteres de Marte seleccionados de la base de datos THEMIS (Thermal Emission Imaging System, un instrumento a bordo de la misión espacial Odisea de Marte).

Se concluye que entre el 15 % y el 20 % de los impactos binarios en la Tierra o Marte deberían dar como resultado cráteres doblete; sin embargo, su morfología puede parecer la de una elipse de forma muy parecida a los impactos obliquos, de forma que no resulta tan claro distinguir uno de otro.

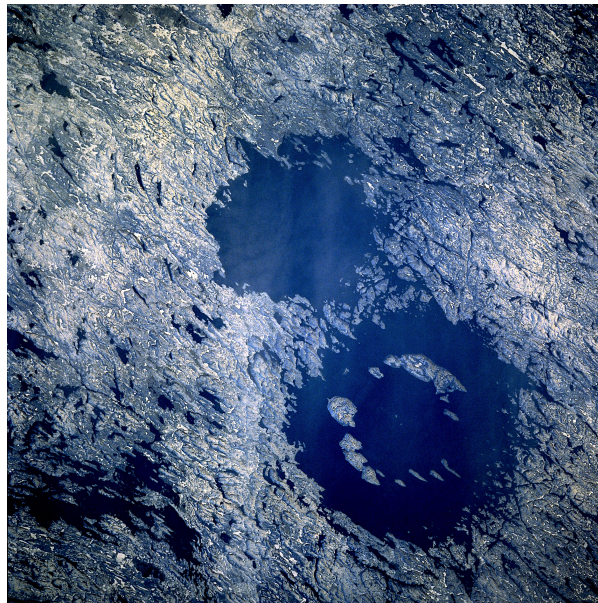


Figura 2.8: Lagos de Clearwater en Quebec, Canadá. Foto tomada por Space Shuttle STS61A-35-86 (NASA).

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

Por otro lado, se han realizado experimentos a altas velocidades para analizar y describir el yet central que se forma entre la intersección de los cráteres doblete. [27, 28, 29].

En su trabajo “On the formation of the lunar herringbone pattern” [28] realizan experimentos de impacto de proyectiles para distinto desfase temporal entre impacto de proyectiles, separación entre ellos y cambiando los ángulos de inclinación respecto la normal de la superficie de impacto, la velocidad alcanzada de los impactos es de $2,3\text{km/s}$, de esta forma estudian la dinámica del impacto involucrada en los cráteres secundarios. En la figura 2.9 se muestran resultados de los experimentos.

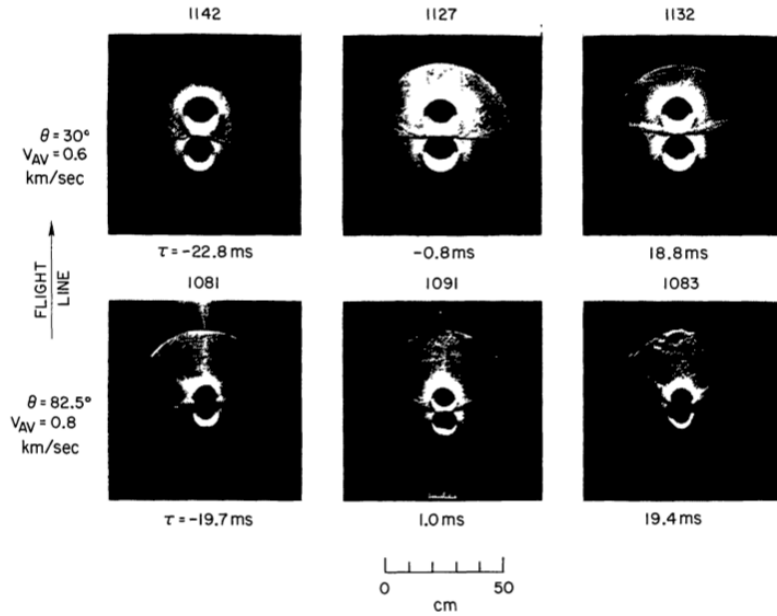


Figura 2.9: Experimentos de impacto producidos por dos proyectiles con inclinaciones respectivas de 30° y $82,5^\circ$ respecto a la normal. Figura tomada de [28].

Entre sus conclusiones, reportan que el patrón central descrito entre los cráteres secundarios es resultado de la colisión del material eyectado de fragmentos que impactan adyacentes.

De manera análoga, se estudia la forma de V que aparece entre el patrón central de los cráteres doblete, tomando como referencia los cráteres secundarios asociados al Cráter Copérnico en la Luna. Por ello, en [29] realizan experimentos de impacto simultáneo para altas velocidades de proyectiles cercanos, en donde se varían los ángulos de impacto respecto a la normal de la superficie, el tiempo relativo entre un impacto y otro, la masa de los proyectiles y el tamaño. Además, se hace para diferentes tamaños de grano.

Usando ecuaciones balísticas (2.7), que consideran gravedad y radio de la Luna g_m , R_m , respectivamente, el ángulo de eyección θ y la velocidad de eyección V del primer proyectil, R es la distancia que hay entre un cráter respecto al otro,

$$R = 2R_m \arctan\left(\frac{\sin 2\theta}{2(R_m g_m / V^2 - \sin^2 \theta)}\right) \quad (2.7)$$

En la figura 2.10 se muestran algunos de los resultados experimentales obtenidos, tras el impacto simultáneo de dos proyectiles con tamaños diferentes entre sí. Se concluye que se reproducen bien la forma de V de los cráteres doblete en el laboratorio en comparación a los cráteres observados en el cráter Copérnico, la formación de ese patrón está asociada al contacto que hay entre las cortinas de eyección de cada proyectil.

CAPÍTULO 2. MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMACIÓN DE CRÁTERES A ESCALA DE LABORATORIO
2.3. EXPERIMENTOS CON MATERIA GRANULAR PARA EL ESTUDIO DE MORFOLOGÍAS PLANETARIAS

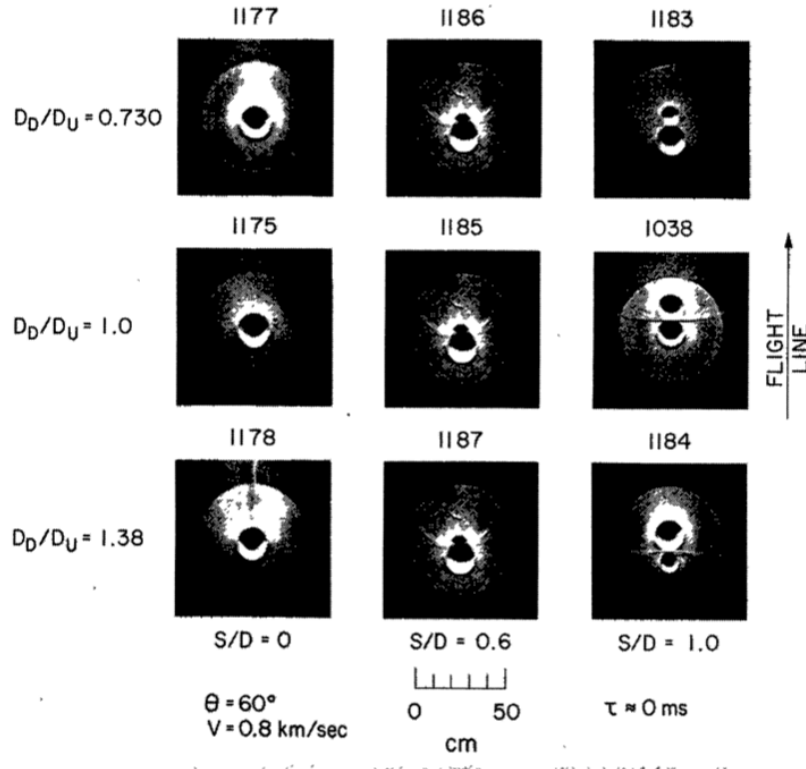


Figura 2.10: Experimentos de impacto producidos por dos proyectiles de diferentes tamaños entre sí, figura tomada de [29].

Finalmente, de los artículos anteriores revisados se muestra que hay un amplio estudio de cráteres individuales a escala de laboratorio de los que se puede obtener resultados que permiten comprender mejor la formación de los mismos. Para el caso de los cráteres doblete se estudiaron experimentalmente una vez en la década de los 70's, y desde aquel entonces, el desarrollo de la tecnología ha sido considerable de manera que actualmente se pueden obtener fotografías y videos con una resolución mejor. Por ello, decidimos realizar un estudio experimental que permitiera visualizar el proceso de formación de cráteres doblete. En el siguiente capítulo se muestran los resultados de nuestra investigación.

Capítulo 3

Estudio experimental de cráteres tipo doblete

3.1. Objetivo General

Realizar experimentos de impacto simultáneo de dos proyectiles en una cama de materia granular, con el fin de reproducir la morfología de los cráteres tipo doblete y estudiar su mecanismo de formación.

3.2. Objetivos Particulares

- Describir el mecanismo de formación de los cráteres tipo doblete a baja escala de energía usando tecnología como la cámara de alta velocidad e imágenes de alta resolución.
- Describir mediante análisis geométrico la eyección del material por los impactos y las estructuras resultantes.

3.3. Diseño experimental

Este experimento fue desarrollado en "GrainsLab", perteneciente al Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas", en el Ecocampus de la BUAP. A continuación, se presenta el arreglo experimental, se describen las componentes, procedimientos y métodos utilizados.

Se reproduce la morfología de los cráteres doblete mediante el impacto simultáneo, a bajas velocidades de dos esferas de acero sólidas e idénticas contra una cama granular con bajo factor de empaquetamiento, se filman los experimentos con cámara de alta velocidad Photron UX-100 Mini a 2000 frames por segundo. Los parámetros a considerar son:

Diámetros de los cráteres: se mide el diámetro de los cráteres desde una vista superior, se usan etiquetas (1) y (2) para indicar si se trata de cráteres individuales o dobles. En la figura 3.1 se muestran los parámetros descritos a continuación.

$D_c^{(1)}$: Diámetro de un cráter individual.

$D_c^{(2)} \parallel$: Diámetro paralelo de los cráteres dobles, es decir, va desde un extremo de un cráter hasta el extremo del otro cráter, pasando por la línea que une a ambos diámetros. Análogamente, si se tratara de una elipse, correspondería esta medida al eje mayor.

$D_c^{(2)} \perp$: Diámetro perpendicular de los cráteres dobles, es medido para ambos cráteres, es el diámetro perpendicular a la línea de $D_c^{(2)} \parallel$.

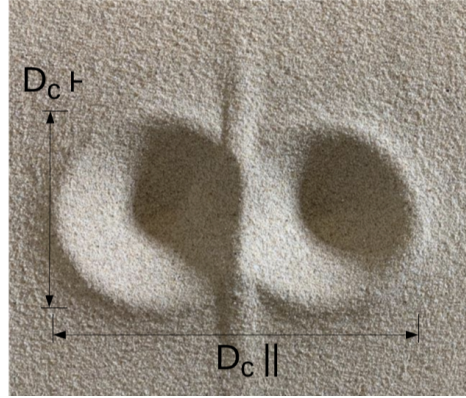


Figura 3.1: Medidas de los diámetros de los cráteres

Profundidad final de los proyectiles Una vez que el proyectil penetra el medio granular, llega a una profundidad dada por la variable Z_f .

Separación entre proyectiles Δx : corresponde a la separación horizontal inicial con la que se dejan caer los proyectiles, medida de centro a centro. Las separaciones usadas son: $\{10, 8, 6, 4, 2\}$ en centímetros.

Tamaños de los proyectiles Se usaron distintos pares de proyectiles de acero sólidos, sus masas y diámetros D_p se muestran en la tabla 3.2

Proyectil	D_p Diámetro (mm)	Masa (g)
1	2.54	66.9
2	1.9	28
3	1.43	12.1
4	1.1	5.6

Tabla 3.1: Tamaños de proyectiles

El diseño experimental se muestra de manera esquemática en la figura 3.2. El sistema consiste en una torre de lanzamiento con un electroimán (20V) inicialmente encendido, en el que se colocan dos proyectiles de acero idénticos, separados horizontalmente por una distancia ΔX , y a una altura H , respecto a la superficie de la cama granular; las alturas usadas fueron: $H = 8,45m, 2,7m, 1,7m, 1,14m, \text{ y } 0,7m$. Posteriormente, se apaga el electroimán, dejando caer a los proyectiles que a su vez penetran la cama granular, previamente preparada, mientras el impacto es filmado lateralmente con la cámara de alta velocidad. Para cada altura de lanzamiento se repite el experimento modificando el tamaño de los proyectiles y separación entre ellos.

Se estudian de igual forma impactos simultáneos (generados por dos proyectiles) e impactos individuales (generados por 1 proyectil) para las mismas energías de impacto, con el objetivo de comparar sus dimensiones.

Después de cada impacto, se registran las medidas de los diámetros de los cráteres resultantes $D_c^{(2)} \parallel$, $D_{c1}^{(2)} \perp$ y $D_{c2}^{(2)} \perp$, así como su altura h , medida respecto a la superficie de la cama granular hasta la parte más baja del cráter; además, se mide la profundidad final de cada proyectil z_{f1} y z_{f2} , retirando cuidadosamente el material granular del cráter hasta encontrar a los proyectiles. A medida que se acertaba la separación ΔX entre proyectiles, los cráteres resultantes pasaban de ser dos cráteres totalmente separados a traslaparse entre ellos.

La cama granular está compuesta por partículas de sílica de 300 micras de tamaño medio, la preparación de esta es importante ya que dada la cantidad de experimentos hechos, se busca que el sistema se encuentre en las mismas condiciones de empaquetamiento experimento tras experimento

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

y que no hayan variaciones significativas que afecten las mediciones. Para su preparación, se vierte el material granular en un recipiente llenándolo hasta el borde; posteriormente, con una barra recta y sólida se barre horizontalmente el material de un extremo del recipiente a otro, sin empaquetarlo, de tal forma que el material quede distribuido uniformemente en el recipiente y forme una superficie plana. Este tipo de empaquetamiento se le conoce como empaquetamiento suelto aleatorio (random loose packing) cuyo valor es de 0,61. [36] .

Otra alternativa de preparación consiste en que una vez realizadas las mediciones de un experimento, se retiran los proyectiles, se revuelve la arena con las manos y con una varilla se raya el material dentro del recipiente hasta el fondo; después, el material que sobresale de la cama se barre de un extremo de la cama granular al otro con una barra para obtener una superficie plana nuevamente.

La preparación de la cama granular es importante, puesto que debido a la naturaleza atómica del medio granular, provoca que las configuraciones granulares no pueden relajarse espontáneamente en ausencia de perturbaciones externas, a esto se le conoce como histéresis, por lo que el sistema tiende a estar en estados metaestables, ya que la cama de arena lleva consigo un recuerdo de sus condiciones finales [19]. Con el objetivo de borrar el historial del experimento y hacer reproducible el sistema se prepara la cama antes de cada impacto.

Otro factor a considerar, fue el desfase en el tiempo de caída de los proyectiles dado por Δt , a pesar de tratarse de proyectiles idénticos, no siempre caían sincronizados, debido a que cuando estaban en el electroimán estos se magnetizaban; luego, al retirar el campo magnético,

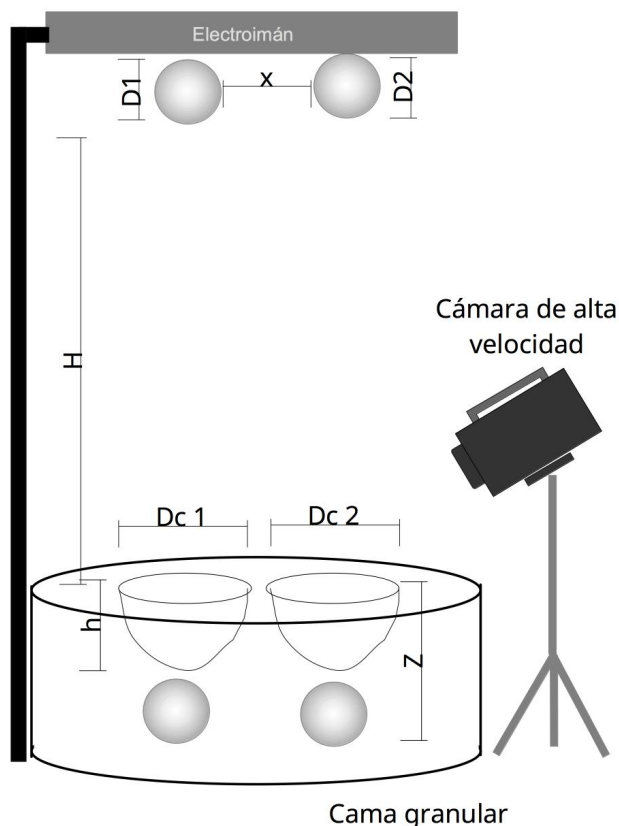


Figura 3.2: Esquema del sistema experimental

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

estos permanecían con una magnetización remanente que producía variaciones de milisegundos en el tiempo de caída entre proyectiles. Se observó que esta variable modificaba la distribución del material granular eyectado, para contrarrestar ese desfase, se introducen hojas de papel de grosor despreciable, entre el electroimán y los proyectiles, obteniendo impactos sincronizados. Sin embargo, en otros ensayos se modifica el Δt con el mismo mecanismo de introducir hojas de papel en uno de los proyectiles. Este desfase se mide directamente en los videos alcanzando un rango entre $6ms \leq \Delta t \leq 38ms$.

Para visualizar claramente la distribución del material eyectado, se eligió una separación fija entre los proyectiles para la cual sus cráteres se traslapaban, se usó un $\Delta x = 6cm$ para el caso del proyectil 2; después, se colocó un fondo negro en la superficie de la cama granular dejando una abertura con forma del contorno descrito por un impacto doble de proyectiles, de manera que los proyectiles pudieran impactar el medio sin la interferencia del fondo negro, y este a su vez permitiera crear un contraste entre el material que era eyectado tras la colisión respecto al fondo.

En la figura 3.3 se muestra una foto del sistema experimental montado en el Ecocampus, este arreglo era usado para lanzamientos desde una altura de $H = 8,45m$ que es equivalente a la altura desde la terraza del edificio. En repetidas ocasiones se tenían que considerar más aspectos que no eran controlables, como las corrientes de aire que afectaban considerablemente la caída libre de los proyectiles, las lluvias que mojarían la arena y a todo el equipo usado y la hora del día, ya que debíamos esperar a que el edificio proyectara sombra sobre el lugar donde trabajábamos, además se agregaban componentes extra al sistema experimental como extensiones y un pequeño elevador rústico para devolver a los proyectiles arriba después de cada colisión.

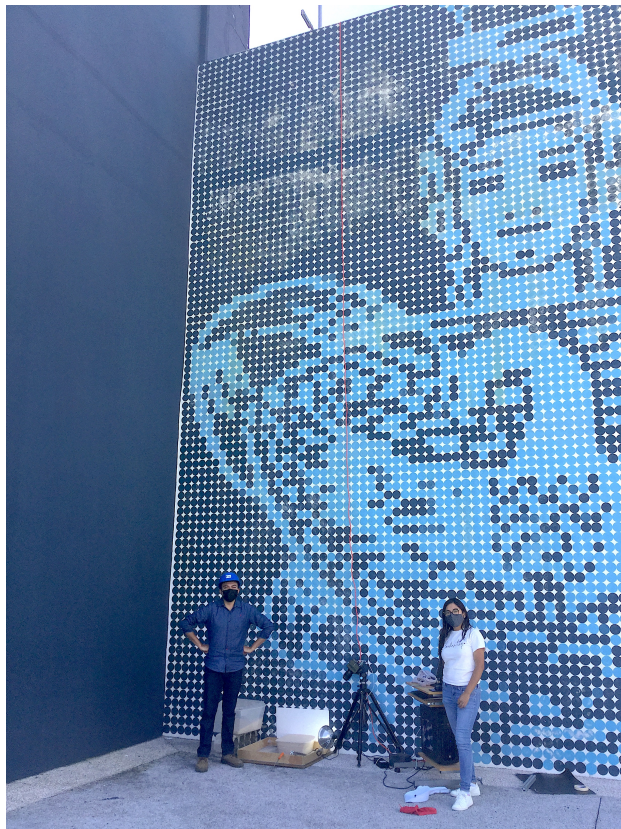


Figura 3.3: Sistema experimental montado en el Ecocampus de la BUAP en Valsequillo. En la foto aparece a la izquierda Edgar Efrén y a la derecha Miriam.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

Para todos los ensayos se toman fotografías de los cráteres resultantes desde una vista superior e iluminación lateral, junto con su escala; de la misma forma las mediciones y videos se registran en una base de datos para su futuro análisis. Como se muestra en la siguiente sección.

3.4. Resultados experimentales y análisis

3.4.1. Diámetro de un cráter $D_c^{(1)}$ en función de la energía de impacto

De los impactos individuales para el proyectil 2 ($D_p = 1,9cm$ y $m = 28g$), a diferentes alturas H , se establece el tamaño del diámetro del cráter $D_c^{(1)}$ en función de la energía de impacto $E = mgH$ del proyectil que genera el cráter dado por la ecuación 3.1.

$$D_c^{(1)} = 9,235E^{1/4} \quad (3.1)$$

Encontramos que el diámetro del cráter escala a $1/4$ de la energía, ie. $D_c^{(1)} \propto E^{1/4}$, tal como se ha encontrado en trabajos previos [32].

En la figura 3.4 se muestra la gráfica del tamaño del cráter $D_c^{(1)}$ en función de la altura H desde la que cae el proyectil, asimismo se incluye la gráfica en la forma log-log que muestra el diámetro $D_c^{(1)}$ respecto a la energía potencial, de la cual se determina la pendiente para establecer la potencia a la que escala la energía, que corresponde a $1/4$.

De la ecuación 3.1 realizamos el cálculo del tamaño del cráter para una altura $H = 270cm$:

$$E = mgh = (28g(\frac{1kg}{1000g}))(9,8m/s^2)(2,7m) = 0,74088J$$

$$D_c^{(1)} = 9,235(0,74088J)^{1/4} \approx 8,5$$

encontramos que para esa altura se obtiene un cráter con diámetro $D_c^{(1)} \approx 8,5cm$, lo que sugiere que se necesita una separación entre proyectiles mayor a 8.5 para tener cráteres bien separados entre sí, mientras que para separaciones $\Delta x < 8,5cm$ los cráteres resultantes se comienzan a traslapar.

3.4.2. Diámetros de los cráteres doblete

De los videos obtenemos imágenes que muestran los instantes de la formación de los cráteres doblete, note que el tiempo aproximado de formación desde la penetración de la cama granular, el crecimiento de las coronas del material eyectado, hasta la formación del cráter final es de aproximadamente de $0,3$ segundos. En la figura 3.5 se presenta la evolución en el tiempo del impacto para las distintas separaciones, desde dos cráteres totalmente separados (Fig 3.5 A), cráteres que comienzan a interactuar entre sí (Fig 3.5 B), cráteres que se traslapan el uno con el otro (Fig 3.5 C,D), mientras que para $\Delta x = 0$ se forma un cráter individual.

Para la figura 3.5-E vemos que se forma un cráter simple, cuyo diámetro es de $\approx 10,2cm$ de acuerdo a la ecuación 3.1 que es mayor a lo que se esperaría de una superposición geométrica de un cráter individual, puesto que la energía de impacto corresponde a $E = M^*gH$ con $M^* = 2m$.

$$E = mgh = (2(28g)(\frac{1kg}{1000g}))(9,8m/s^2)(2,7m) = 1,48176J$$

$$D_c^{(1)} = 9,235(1,48176J)^{1/4} \approx 10,2cm$$

Por lo que, para separaciones $\Delta X/D_p = 1$ se considera como un proyectil individual el que origina dicho cráter simple, que tiene la forma del asteroide Castalia 4769 de la figura 1.8; además, va acorde a lo que propone [32] que se forman cráteres circulares independientemente de la forma que tenga el proyectil que los origina.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

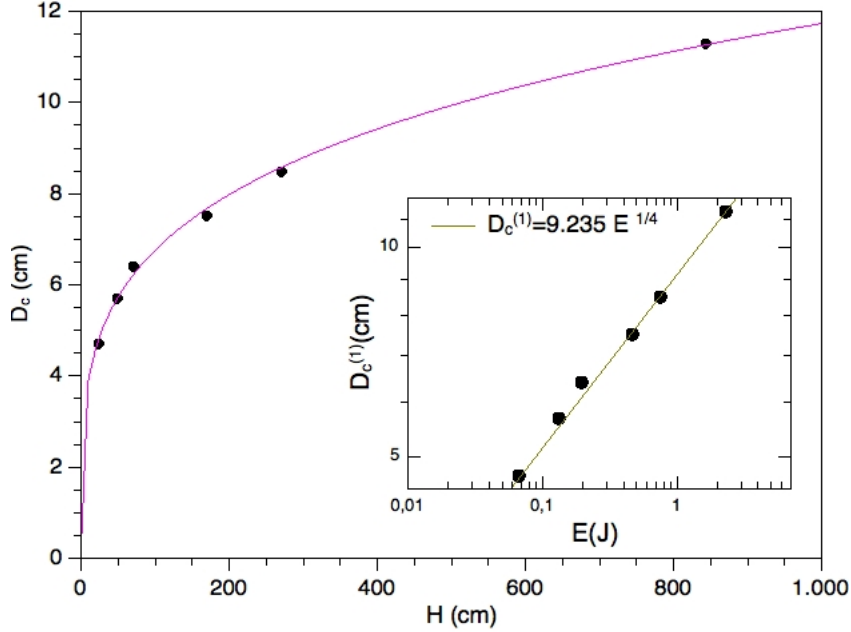


Figura 3.4: Diámetro del cráter $D_c^{(1)}$ en función de la energía de impacto $E = mgH$, se encuentra una dependencia de ley de potencia de la energía proporcional a $E^{1/4}$ para el proyectil 2 ($m=28g$, $D_p=1.9cm$)

Δx (cm)	prom $D_c^{(2)} \parallel$ (cm)	error $D_c^{(2)} \parallel$	prom $D_c^{(2)} \perp$ (cm)	error $D_c^{(2)} \perp$
10	18.075	0.736	8.39	0.16
8	15.95	0.264	8.33	0.11
6	13.675	0.55	8.275	0.15
4	11.98	1	8.4	0.33
2	11	0.529	10.4	0.98

Tabla 3.2: Tamaños de proyectiles

En la tabla 3.2 se muestra el promedio de los diámetros perpendiculares $D_c^{(2)} \perp$ y paralelos $D_c^{(2)} \parallel$ medidos para las distintas separaciones entre proyectiles Δx y su desviación estándar.

En la figura 3.6 se muestra la gráfica del tamaño de los cráteres, normalizando los diámetros de los cráteres doblete respecto al tamaño de uno individual (ie. $D_c^{(2)}/D_c^{(1)}$), en función de $\Delta X/D_p$, separación entre los proyectiles, dividido entre el diámetro de un proyectil.

La gráfica presenta dos curvas, por un lado, $D_c^{(2)} \perp$ (curva rosa) que corresponde a los diámetros perpendiculares, vemos que para $\Delta X/D_p > 2$, entonces $D_c^{(2)}/D_c^{(1)}$ se mantiene constante en 1, es decir, el diámetro de ambos cráteres con separaciones iniciales correspondientes a $\Delta X = 10, 8, 6, 4cm$ se mantiene constante e igual al diámetro de un cráter simple, o bien, el diámetro de un cráter no se ve afectado con la presencia de otro cráter igual. Sin embargo, cuando $\Delta X/D_p < 2$ vemos que $D_c^{(2)}/D_c^{(1)} > 1$, además es igual al $D_c^{(2)} \parallel$, que sugiere que se trata de un solo cráter circular.

Por otro lado, el diámetro paralelo $D_c^{(2)} \parallel$ que es medido de un extremo del cráter 1 al extremo del cráter 2 pasando por el centro de ambos. Vemos que para $\Delta X/D_p = 5$ el diámetro normalizado es mayor que 2, significa que para separación de $\Delta = 10cm$ tenemos dos cráteres totalmente separados, y esa separación es mayor a la suma de dos diámetros de cráteres individuales. Para

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

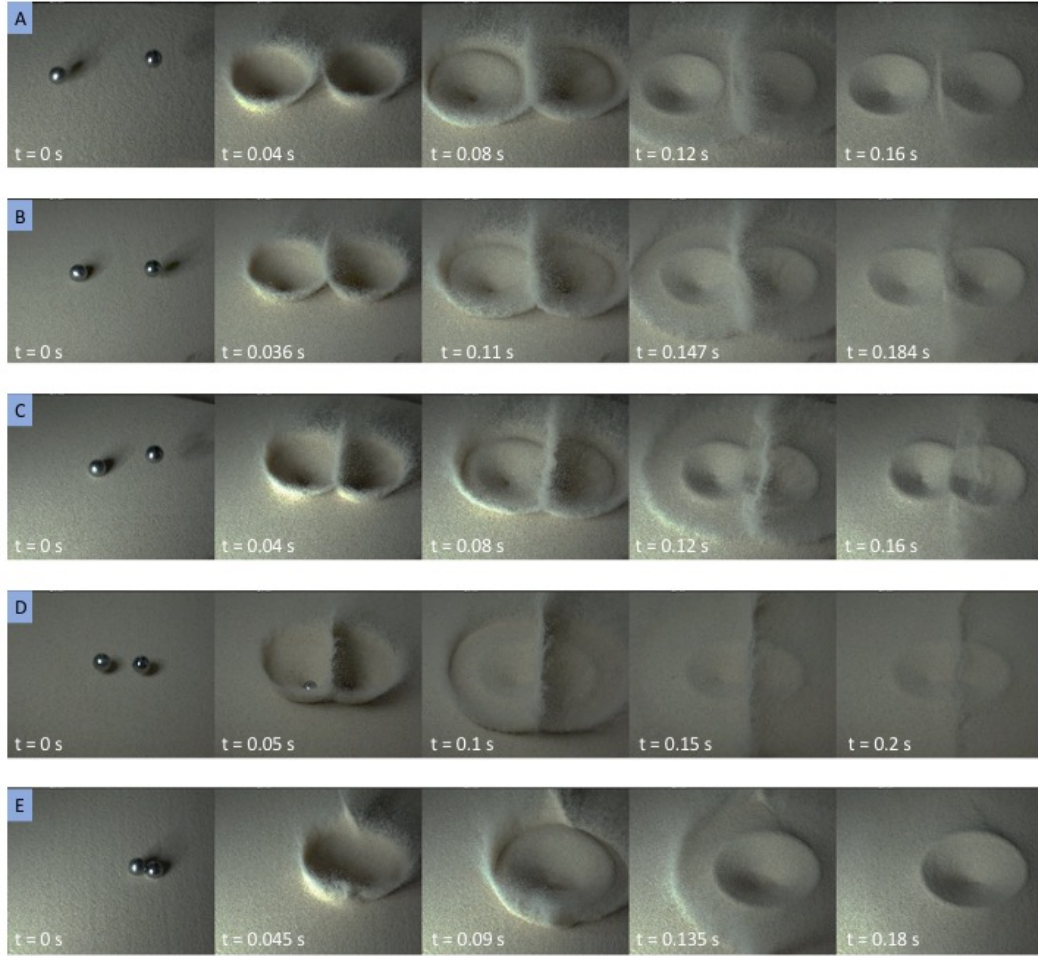


Figura 3.5: Formación de cráteres para las distintas Δx , originados por proyectil 1 ($D_p = 1,9cm$ y $m = 28g$). En A se distinguen dos cráteres totalmente separados con una línea en medio, para B el dorso de los cráteres comienza a interactuar entre sí, en C y D se traslapan, mientras que en E el proyectil tiene la forma del asteroide Castalia 4769 siendo el cráter resultante un cráter simple.

$2 \leq \Delta X/D_p \leq 4$ tenemos dos cráteres que se traslapan entre sí, por lo que su diámetro está entre $1 < D_c^{(2)}/D_c^{(1)} < 2$, cuando la separación es de un diámetro de proyectil, es decir, cuando los proyectiles están en contacto, el cráter que se forma es totalmente circular porque el diámetro perpendicular y el paralelo son el mismo.

Se considera además, el caso en que el comportamiento del diámetro paralelo se trata únicamente de una superposición geométrica, dado por la curva verde λ , es decir, si tomamos en cuenta el diámetro de un cráter y sumamos la distancia de separación con entre ellos Δx normalizado al tamaño de dos cráteres individuales iguales, obtenemos:

$$\lambda = \frac{D_c^{(1)} + \Delta x}{D_c^{(1)}} \quad (3.2)$$

De esta ecuación obtenemos la ecuación de una recta para esa gráfica, considerando los puntos

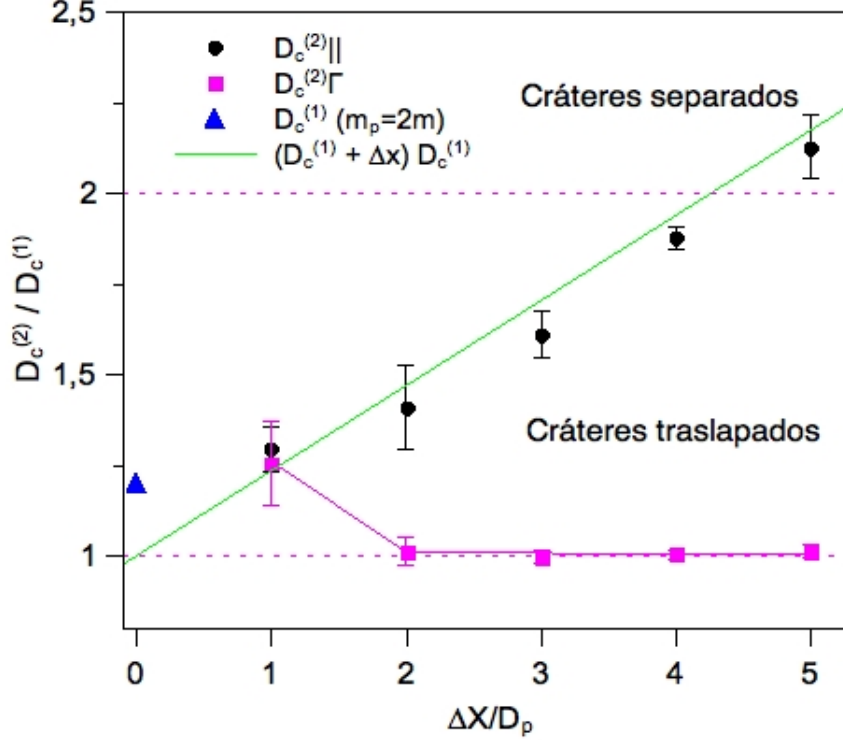


Figura 3.6: Tamaños de los cráteres dobles normalizados entre el tamaño de un cráter simple, como función de la separación entre proyectiles.

correspondientes a que no exista separación entre los centros de los proyectiles, punto (0,1), y que los proyectiles estén separados $6D_p$. $\frac{(8,5 + 12)cm}{(8,5)cm} = 2,411$, punto (6,2.411). Que resulta en:

$$\lambda = 0,235 \frac{\Delta x}{D_p} \quad (3.3)$$

Vemos que los puntos referentes a las mediciones siguen este comportamiento descrito por la ecuación de la recta (3.3), excepto cuando $\Delta x = 0$ (Punto azul) ahí, resultado de la superposición geométrica usando la ecuación 3.2, obtenemos: $\frac{(8,5 + 0 + 8,5)cm}{(8,5 + 8,5)cm} = 1$, es decir, el diámetro resultante debería ser igual al diámetro resultante de un impacto de proyectil individual; sin embargo, experimentalmente no obtenemos ese valor. En realidad el caso de $\Delta X = 0$ significa que un proyectil está contenido dentro del otro, que implica tener un solo proyectil con el doble de masa $M^* = 2m$ (punto azul), que contrario a una superposición geométrica, donde no se considera esta diferencia de la masa del proyectil.

3.5. Modelo de colisión entre cortinas de eyección

A partir de los videos e imagenes, notamos que no en todos los experimentos los proyectiles caían simultáneos, presentaban un desfase temporal en milisegundos Δt , a pesar de tratarse de proyectiles idénticos, esta pequeña diferencia, repercutía en la sincronía del crecimiento de la cortina de eyección, dando como resultado un yet central curvo entre ambos cráteres que se forma a partir del choque del material eyectado por ambas cortinas que se se acumula entre los dos diámetros,

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.5. MODELO DE COLISIÓN ENTRE CORTINAS DE EYECCIÓN

como se muestra en la figura 3.7 C, vemos que está asimetría del yet va directamente relacionada con el desfase inicial con que los proyectiles impactan la cama granular. Puesto que se forma un yet totalmente recto para impactos donde $\Delta t = 0$.

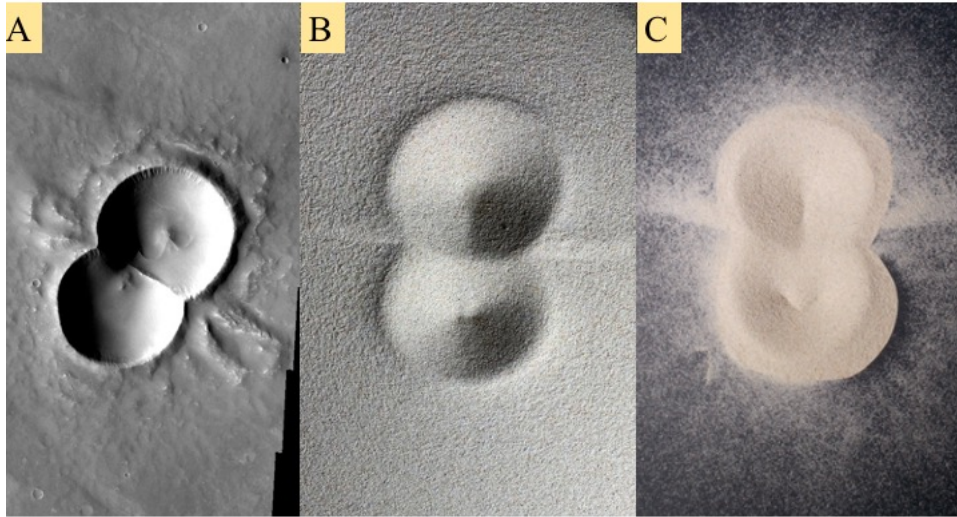


Figura 3.7: (A) NASA/JPL-Caltech/Arizona State University; Figuras B y C muestran cráteres dobles obtenidos experimentalmente, sus yet presentan cierto ángulo respecto a la horizontal.

3.5.1. Velocidad de crecimiento de la corona de eyección

Para entender mejor la distribución final del material eyectado tras la colisión doble es importante estudiar el desarrollo de una sola corona de eyección. En la figura 3.8 se muestra como evoluciona la cortina de eyección con el tiempo $r(t)$, esta se expande de manera radial y simétrica, se reporta que el ángulo al que el material se eyecta es $\approx 45^\circ$. [38]

A partir de medir el crecimiento del radio respecto al tiempo, obtenemos la gráfica 3.9 donde encontramos una función por partes (3.4), con un crecimiento exponencial de $t = 0$ a $t = 0,6$, para t mayor a $t = 0,6$ la velocidad de crecimiento tiene un comportamiento lineal, vemos que este comportamiento de expansión de la corona se observa también para la expansión de la corona de eyección originada por explosiones de trabajos previos [10]

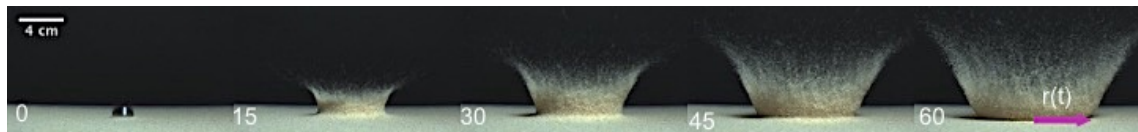


Figura 3.8: Se muestra la evolución en el tiempo, en milisegundos, del crecimiento de la corona de eyección, medido desde el centro de la corona hasta un extremo como indica la flecha rosa

$$r(t) = \begin{cases} At^{0,3} & t \leq 0,06 \text{ s} \\ vt & t \geq 0,06 \text{ s} \end{cases} \quad (3.4)$$

Se realiza un análisis sobre la relación que presenta la ecuación que describe a los yet con respecto al desfase inicial Δt de impacto de los proyectiles. De los resultados obtenidos en la sección anterior, sabemos que la corona aumenta radialmente con velocidad (3.4) describiendo

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.5. MODELO DE COLISIÓN ENTRE CORTINAS DE EYECCIÓN

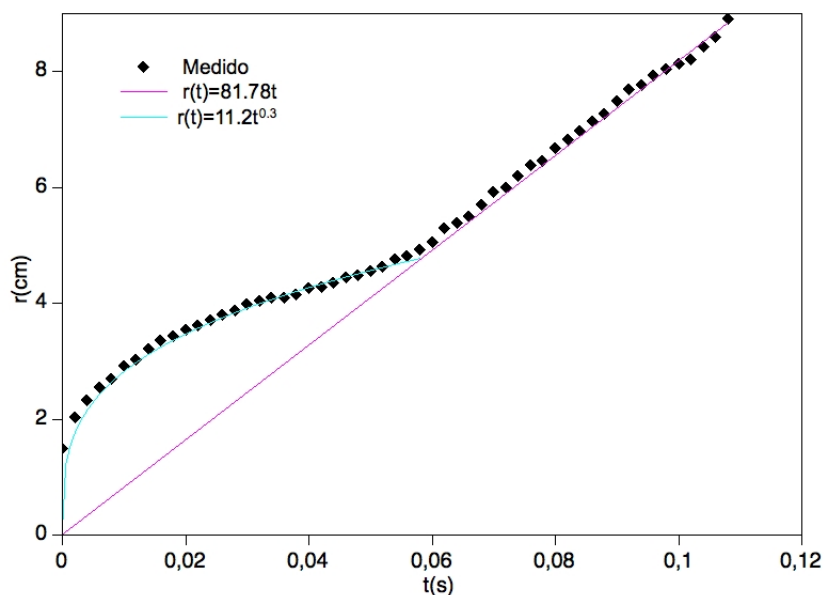


Figura 3.9: Los puntos negros en la gráfica muestran las mediciones del radio de la corona de eyección con respecto al tiempo, medido directamente del video a 2000fps. La línea magenta muestra el ajuste lineal hecho a la curva a partir de 0.06 s, prolongándose hasta intersectar con el eje r , por otro lado, la línea azul es el ajuste exponencial para los primeros 0.06 s de expansión de la corona.

cada uno, una circunferencia cuyo radio cambia con el tiempo. En la figura 3.10 se muestra de manera esquemática los parámetros considerados para el modelo, siendo Δt el tiempo de diferencia que le toma llegar a un rayo proveniente de la cortina 1 avanzar hasta el mismo punto que otro rayo proveniente de la cortina 2, siendo R_1 y R_2 el radio de las circunferencias descritas por las coronas de eyección.

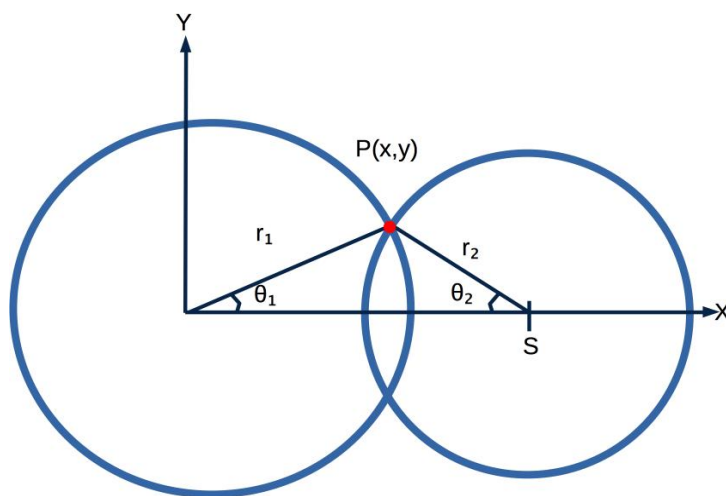


Figura 3.10: Esquema del modelo utilizado para calcular el ángulo final del yet

La ecuación de la circunferencia con radio R_1 :

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE
3.5. MODELO DE COLISIÓN ENTRE CORTINAS DE EYECCIÓN

$$x^2 + y^2 = R_1^2$$

Mientras que para la circunferencia R_2 en $(\Delta x=S,0)$:

$$(x - \Delta x)^2 + y^2 = R_2^2$$

Restando ambas ecuaciones:

$$2x\Delta x - \Delta x^2 = R_1^2 - R_2^2 \quad (3.5)$$

Siendo $R_1 = vt$, $R_2 = v(t - \Delta t)$ y considerando a $x = R_1 \cos \theta_1$. Obtenemos:

$$t = \frac{\Delta x^2 - v^2 \Delta t^2}{2v(\Delta x \cos \theta_1 - v \Delta t)} \quad (3.6)$$

que es el tiempo para el cual las cortinas de eyección se intersectan, con V igual a ec. (3.4).

Consideremos los casos particulares para $\Delta t = 11ms, 6ms, 0ms$. Primero calculamos el tiempo de colisión dado por la ecuación (3.6) de $t(\Theta_1)$ en un intervalo de $-\pi/2 < \theta_1 < \pi/2$. Posteriormente, hallamos las coordenadas colisión para cada Δt dado, usando $X = vt \cos \theta_1$ y $Y = vt \sin \theta_1$, finalmente graficamos, como se muestra en la figura 3.11. Donde vemos que la curva que se ajusta correctamente a los yets.

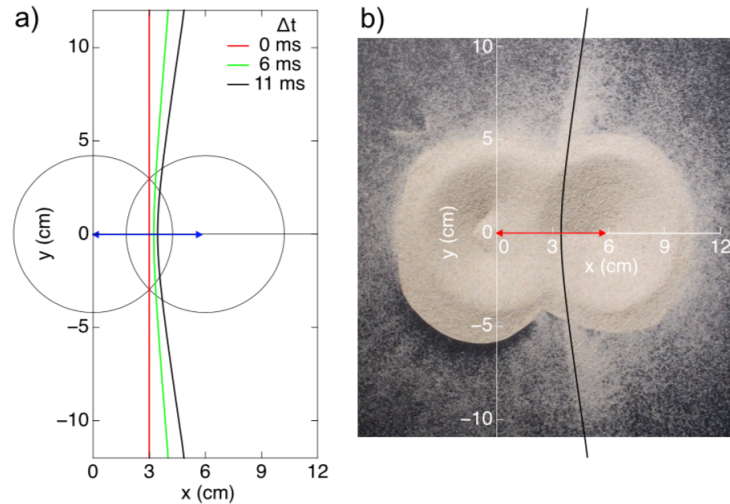


Figura 3.11: En la gráfica (a) se muestran la coordenadas (X,Y) de los cráteres de tamaño $D_c \approx 8,5cm$ generados por una colisión a altura $H = 270cm$, se traslapan para un $\Delta x = 6cm$ dado; la recta roja representa la posición del yet central cuando $\Delta t = 0$, la curva verde para un $\Delta t = 6ms$ y la curva negra para $\Delta t = 11ms$. La figura (b) muestra el ajuste.

Conclusiones

Del estudio de cráteres doblete hechos a partir de proyectiles sólidos que impactan a bajas velocidades un lecho granular plano, vemos que

- Los cráteres resultantes de experimentos a bajas velocidades, reproducen muy bien la morfología de los cráteres generados por impactos a altas velocidades observados en superficies planetarias.
- La relación de escalamiento que sigue el diámetro de un cráter respecto a la energía de impacto empleada es consistente con el escalamiento reportado en trabajos anteriores.
- El crecimiento de la cortina de eyección sigue una ley de potencias a la $1/3$ que es la misma reportada para expansión de corona de eyección originada por explosiones.
- La forma final de los cráteres son sensibles tanto a la separación inicial como al desfase temporal que le toma a un proyectil impactar la cama granular respecto al otro proyectil.
- Cuando hay un ligero delay entre ambos impactos, la cresta central y las cortinas de eyección no son simétricas
- Cuando los proyectiles se dejan caer estando uno en contacto con otro, es decir, sin separación, el cráter resultante es circular y su tamaño es igual al de uno producido por un proyectil con el doble de masa (o bien el doble de energía de impacto).
- La profundidad de penetración final de los proyectiles es diferente para ambos, ya que la profundidad que alcanza el segundo proyectil se incrementa ligeramente debido a la fluidización del lecho producido por el primero.
- El modelo geométrico que describe a la cresta central se ajusta bien a los jets obtenidos experimentalmente.

Se cumplieron con los objetivos de la investigación, sin embargo, aún se podrían hacer estudios al respecto que no fueron considerados, como variar el tamaño de los proyectiles entre sí, usar proyectiles granulares. Las contribuciones que aporta este trabajo es que se puede entender la formación de cráteres doblete a bajas velocidades y con materiales muy sencillos; además, con el uso de la cámara de alta velocidad se visualiza con gran detalle la evolución de la corona de eyección, permitiendo entender de mejor forma la dinámica de la misma.

La realización de este trabajo me permitió vivir de cerca cómo se hace un trabajo de investigación, desde el planteamiento del problema, el diseño del experimento, lo que se espera obtener, las posibles soluciones al problema y los métodos experimentales empleados.

Considero que este trabajo hizo mi formación académica más completa; ya que, apesar de llevar cursos de física experimental, en estos unicamente se recreaban experimentos ya hechos y con resultados conocidos. En cambio, al enfrentarme a resolver un problema desde cero, me encontré con diversas dificultades y a su vez me permitió adquirir conocimientos como tener sentido

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CRÁTERES TIPO DOBLETE

3.5. MODELO DE COLISIÓN ENTRE CORTINAS DE EYECCIÓN

práctico al realizar los experimentos, ya que se realizaron aproximadamente 100 ensayos, hacerlos reproducibles, trabajar en equipo y administrar el tiempo empleado era necesario.

Aprendí a manejar diversas herramientas y tecnologías que me serán de gran utilidad; por ejemplo, el uso de la cámara de alta velocidad, sincronizar dos cámaras, cuidar la iluminación y colocar la escala para analizar los videos. También fue de utilidad utilizar software para el análisis de videos en ImageJ, análisis de datos y la realización de gráficas en QtPlot. Otro aspecto del que aprendí mucho fue el tener reuniones para discutir sobre el trabajo con mis compañeros y asesor del laboratorio, donde aprendí a plantear las ideas de manera concisa y eficiente.

Bibliografía

- [1] MELOSH, H. J. (1989). Impact Cratering. A Geologic Process. Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series Vol. 11.
- [2] Hoyt, W. G.: 1987, Coon Mountain Controversies, University of Arizona Press, Tucson, AZ, 442 pp.
- [3] Koeberl, C. Craters On The Moon From Galileo To Wegener: A Short History Of The Impact Hypothesis, And Implications For The Study Of Terrestrial Impact Craters. *Earth, Moon, and Planets* 85, 209–224 (1999).
- [4] Ellen T. Drake, Paul D. Komar; Origin of impact craters: Ideas and experiments of Hooke, Gilbert, and Wegener. *Geology*; 12 (7): 408–411 (1984).
- [5] Wood, Charles A. 2019. "Scientific Knowledge of the Moon, 1609 to 1969"*Geosciences* 9, no. 1: 5
- [6] NASMYTH, J., CARPENTER J. The Moon: Considered as a Planet, a World, and A Satellite. London: John Murray, 1874.
- [7] Proctor, Richard A. The moon: her motions, aspect, scenery, and physical condition. London, Longmans, Green, and co (1873).
- [8] BALDWIN, RALPH B. The Face of the Moon. Chicago: The University of Chicago Press, 1949. 239 p
- [9] Melosh, H. (2011). *Planetary Surface Processes (Cambridge Planetary Science)*. Cambridge: Cambridge University Press
- [10] F. Pacheco-Vázquez, A. Tacumá and J.O. Marston, Craters produced by explosions in a granular medium, *Phys. Rev. E* 96, 032904 (2017).
- [11] F. E. Loranca Ramos, J. L. Carrillo-Estrada and F. Pacheco-Vázquez, Craters and granular jets generated by underground cavity collapse, *Phys. Rev. Lett.* 115, 028001 (2015).
- [12] Valentine G.A, White, J. D. L., Ross, P.-S., Amin, J., Taddeucci, J., Sonder, I., and Johnson, P. J. Experimental craters formed by single and multiple buried explosions and implications for volcanic craters with emphasis on maars, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20301 (2012).
- [13] Alvarez et al. (1980). Extraterrestrial cause for the cretaceous tertiary extinción.
- [14] Pickering, W.H. (1903). *The Moon – A Summary of the Existing Knowledge of our Satellite with a Complete Photographic Atlas*
- [15] H. Katsuragi, *Physics of Soft Impact and Cratering*, Springer, Japan, 2016.
- [16] Cook, Cheryl M., H. Jay Melosh, and William F. Bottke Jr. Doublet Craters on Venus. *ICARUS* 165, no. 1 (2003).

- [17] W. F. Bottke, Jr., H.J. Melosh, Binary Asteroids and the Formation of Doublet Craters, *Icarus*, 124, 2 (1996).
- [18] Walsh, Kevin J. Richardson, Derek C. Michel, Patrick - Rotational breakup as the origin of small binary asteroids (2008) [10.1038 nature07078]
- [19] Mehta, A. (2007). Introduction. In *Granular Physics* (pp. 1-17). Cambridge: Cambridge University Press.
- [20] Altshuler E, Ramos O, Martínez E, Batista-Leyva AJ, Rivera A, Bassler KE. Sandpile formation by revolving rivers. *Phys Rev Lett.* 2003;91(1):014501. doi:10.1103/PhysRevLett.91.014501
- [21] B Duplantier, TC Halsey, V Rivasseau (2011). *Glasses and Grains: Poincaré Seminar 2009*. Springer, Basel.
- [22] Baerbel K. Lucchitta. Crater clusters and light mantle at the Apollo 17 site; A result of secondary impact from Tycho. *Icarus*, 30, 80-96 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(77\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(77)90123-3).
- [23] K.S. Martin-Wells, D.B. Campbell, B.A. Campbell, L.M. Carter, Q. Fox. Secondary crater-initiated debris flow on the Moon, *Icarus*, 291, 176-191, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.11.007>.
- [24] Passey Q. R; H.J. Melosh. Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus* 42, 211-233, 1980.
- [25] H.J. Melosh, J.A. Stansberry. Doublet craters and the tidal disruption of binary asteroids. *Icarus*, 94, 171-179, 1991.
- [26] K. Miljkovic, G.S. Collins, S. Mannick and P.A. Bland. "Morphology and population of binary asteroid impact craters" *Earth Planet. Sci. Lett.* 363, 121-132, 2013.
- [27] Oberbeck, V. R. 1973. Simultaneous Impact and Lunar Craters. *Moon* 6, 83-92. doi:10.1007/BF02630653
- [28] Oberbeck, V. R., Morrison, R. H. 1973. On the formation of the lunar herringbone pattern. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings* 4, 107.
- [29] V. R. Oberbeck, and R. H. Morrison, Laboratory simulation of the herringbone pattern associated with lunar secondary crater chains, *The moon* 9, 415-455 (1974).
- [30] Uehara, J. S., Ambroso, M. A., Ojha, R., Durian, D. J. (2003). Low-Speed Impact Craters in Loose Granular Media. *Physical Review Letters*, 90 (19), 194301-1-194301-4.
- [31] F. PACHECO-VÁZQUEZ y J. C. RUIZ-SUÁREZ , *Impact Craters in Granular Media: Grains against Grains*, *Phys. Rev. Lett.* 107, 218001, (2011).
- [32] F. PACHECO-VAZQUEZ *Ray systems and craters generated by the impact of non- spherical projectiles.*, *Phys. Rev. Lett.* 2019
- [33] A. Q. WALSH, K. E. HOLLOWAY, P. HADBAS y J. R. DE BRUYN, *Morphology and Scaling of Impact Craters in Granular Media*, *Phys. Rev. Lett.* 91, 104301 (2003).
- [34] Z. YUE, B. C. JOHNSON, D. A. MINTON, H. J. MELOSH, K. DI, W. HU AND Y. LIU , *Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters*, *Nature Geoscience* 6(6):435-437 (2013).

- [35] T. SABUWALA, C. BUTCHER, G. GIOIA y P. CHAKRABORT, *Ray Systems in Granular cratering*, Phys. Rev. Lett. 120, 264501 (2018).
- [36] Radin, C. Random Close Packing of Granular Matter. J Stat Phys 131, 567–573 (2008).
- [37] Random Loose Packing in Granular Matter J Stat Phys (2009) 135: 1–23 DOI 10.1007/s10955-009-9722-4
- [38] Housen, K. R., Holsapple, K. A. 2011. Ejecta from impact craters. Icarus 211, 856–875. doi:10.1016/j.icarus.2010.09.017
- [39] Kosuke Hayashi, Ikuro Sumita(2017). Low-velocity impact cratering experiments in granular slopes. Icarus 291, 160-175, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.03.027>
- [40] de Vet, S.J. and J.R. de Bruyn. 2007, Oct. Shape of impact craters in granular media. Phys. Rev. E 76: 041306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.041306> .