



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Perlas de Mezcal: Estudio del
comportamiento de burbujas
superficiales en mezclas agua-etanol**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Gibran Rage Rojas

DIRECTOR DE TESIS

José Roberto Zenit Camacho



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Silvana, Omar, Bernardo y Roberto
que apoyaron directamente la elaboración de este trabajo

Índice general

Resumen	1
1. Introducción	3
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Bebidas alcohólica: panorama histórico y actual	3
1.1.2. El mezcal: bebida de tradición artesanal	6
1.1.3. Normatividad	8
1.1.4. Proceso de fabricación de mezcal	9
1.1.5. Producción artesanal de mezcal	12
1.1.6. Las Perlas de Mezcal: prueba empírica de formulación final	12
1.2. Las Perlas de Mezcal: descripción del fenómeno físico	15
1.2.1. Formación de las perlas	15
1.2.2. Vida de las perlas	17
1.2.3. Rompimiento de las perlas	21
1.3. Motivación y objetivos	23
2. Arreglo experimental	27
2.1. Diseño del experimento	27
2.1.1. Configuración del arreglo experimental	28
2.1.2. Sistema de ensayo de pruebas	29
2.1.3. Sistema fotográfico	31
2.1.4. Sistema de iluminación	33
2.1.5. Estructura de soporte y sistemas auxiliares	34
2.2. Fluidos experimentales	36
2.2.1. Mezcales empleados en la investigación	37
2.2.2. Composición química del mezcal	38
2.2.3. Propiedades físicas de los fluidos experimentales	39
3. Análisis de resultados	43
3.1. Verificación del fenómeno	43
3.1.1. Interpretación de los resultados	44
3.2. Experimentos con mezclas agua-etanol	45
3.2.1. Interpretación de los resultados	46
3.3. Experimentos variando la proporción de otros componentes	46
3.3.1. Interpretación de resultados	47
3.4. Efectos de Marangoni	48
3.4.1. Flujos de Marangoni: introducción al fenómeno físico	48

3.4.2. Marangoni en mezcal	49
3.5. Resultados comparados con otras bebidas	50
3.6. Análisis dimensional	51
3.6.1. Interpretación de resultados	53
3.7. Cálculo de espesor de película	54
3.8. Otros resultados relevantes	54
4. Modelo del drenado de la película de líquido	59
4.1. Drenado de la pared delgada como causa de ruptura de la burbuja	59
4.1.1. Modelo plano del drenado de una burbuja	60
4.1.2. Geometría de una burbuja superficial	61
4.1.3. Flujo en una película delgada	64
4.2. Flujo de drenado para 3 casos distintos	65
4.2.1. Primera condición de frontera: Superficie Libre	65
4.2.2. Segunda condición de frontera: Superficie Rígida	66
4.2.3. Tercera condición de frontera: Gradiente de evaporación	67
4.3. Solución del T_p del modelo de drenado	68
4.3.1. Tiempo de vida para tres casos	69
5. Conclusión	73
5.1. Resultados de la investigación	73
5.2. Relevancia y pasos futuros	74
Apéndices	75
Apéndice 1: Componentes químicos secundarios del mezcal	77
Apéndice 2: Series y propiedades de fluidos experimentales	79
APS Division of Fluid Dynamics Meeting 2016	81
Bibliografía	83

Resumen

En el presente trabajo de investigación se estudia, desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, el fenómeno conocido como perlas de mezcal. Durante el proceso de fabricación de la bebida es empleado por los maestros mezcaleros para conocer el contenido de alcohol del fluido, y también se emplea comunmente como método cualitativo para determinar la calidad de un mezcal. El objetivo de esta investigación es explicar el fenómeno de las perlas y demostrar la veracidad del método tradicional para medir el contenido de alcohol de la bebida. En el transcurso de la investigación se emplearon en conjunto técnicas experimentales de mecánica de fluidos, análisis adimensional y modelado de flujos para observar, medir, visualizar, hipotizar, modelar y explicar los distintos razgos del fenómeno de las perlas. El resultado de la investigación indica que el método tradicional para medir el contenido de alcohol es certero ya que existen relaciones causales directas entre el tiempo de vida de las perlas y el contenido de alcohol de un mezcal y otras bebidas alcohólicas. Se espera que dicho resultado ayude a acreditar la validez del conocimiento tradicional de los maestros mezcaleros.

Capítulo 1

Introducción

El primer capítulo de este trabajo contiene los antecedentes necesarios para entender el fenómeno físico de las perlas de mezcal. Pretende con ello justificar los motivos que llevaron a la presente investigación y su relevancia para la ciencia en el campo de la mecánica de fluidos. La primera sección es un panorama general de bebidas alcohólicas incluido el mezcal y su proceso de fabricación. La segunda sección contiene una descripción detallada del fenómeno físico de burbujas superficiales dentro del cual se puede clasificar a las perlas. La última sección explica la motivación que inspiró la presente investigación y enumera los objetivos generales y específicos que persigue.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Bebidas alcohólica: panorama histórico y actual

La producción y consumo de bebidas alcohólicas es un fenómeno cultural que forma parte de costumbres y tradiciones de sociedades en todo el mundo. El origen histórico del consumo de alcohol está integrado con el desarrollo de la civilización durante la Revolución Neolítica ($\sim 10,000$ a.C.) y la transformación del nomadismo al sedentarismo; particularmente está ligado al desarrollo de la agricultura de granos y frutos. Existe evidencia arqueológica en forma de textos (leyes, registros y líricas), pinturas rupestres y herramientas primitivas que documentan por ejemplo la elaboración de cerveza en Egipto Antiguo, el comercio de vino de Fenicios en el Mediterráneo, la adoración de dioses relacionados al alcohol en Grecia y Roma, el consumo de cerveza en los pueblos bárbaros del norte de Europa, la invención del destilado de arroz en Japón o la elaboración de fermentados en los pueblos Pre-hispánicos de América [1–4].

Las bebidas alcohólicas son sustancias líquidas elaboradas y consumidas por el ser humano que tienen un contenido relevante de etanol y que pueden ser obtenidas por distintos métodos de fabricación de mayor o menor complejidad. El etanol o alcohol etílico es un compuesto químico que ocurre de manera natural como producto de la descomposición de azúcares contenidos en granos y frutos por la acción de microorganismos como levaduras; este proceso de transformación es conocido como fermentación alcohólica. El etanol es un compuesto psico-activo que al ser ingerido por el ser humano entra al torrente sanguíneo y se esparce por el cuerpo causando efectos estimulantes de diversos índoles.

La cultura alcohólica comenzó con la domesticación del etanol a través de la realización del proceso de fermentación y el desarrollo de técnicas y artefactos para llevarlo a cabo de manera controlada [1]. Las primeras bebidas alcohólicas fueron fermentados de granos (cervezas) o de frutos (vinos) con graduaciones alcohólicas menores al 17 % en volumen que corresponde al máximo

contenido de etanol que se puede lograr con la fermentación natural. Cada civilización desarrolló prácticas culturales propias alrededor de la fabricación y consumo de alcohol influenciadas por la disponibilidad y calidad de recursos naturales propicios para su producción (por ejemplo: el *terroir* o buena calidad del suelo, la existencia de flora domesticable, clima estable, disponibilidad de agua, etc.) y el grado de integración de la bebida en la dieta de su sociedad (por ejemplo: usos hedonistas, religiosos, sociales, ceremoniales, políticos, etc.). Las culturas que domesticaron el etanol han invertido una gran cantidad de ingenio en el desarrollo de tecnologías de producción y consumo de bebidas como máquinas, herramientas, utensilios, procesos y contenedores con el fin de mejorar y hacer más económico el producto final. Aproximadamente en el año 800 d.C. ocurrió un avance tecnológico significativo con el descubrimiento de los Árabes pre-islámicos del proceso de destilación que permite concentrar bebidas con un contenido en volumen de etanol mayor al 40%. Tal vez por ello muchas lenguas ha adoptado variaciones de la palabra ‘alcohol’ cuyo origen etimológico proviene del árabe *al-koh'l* que significa ‘esencia’ o ‘espíritu’.

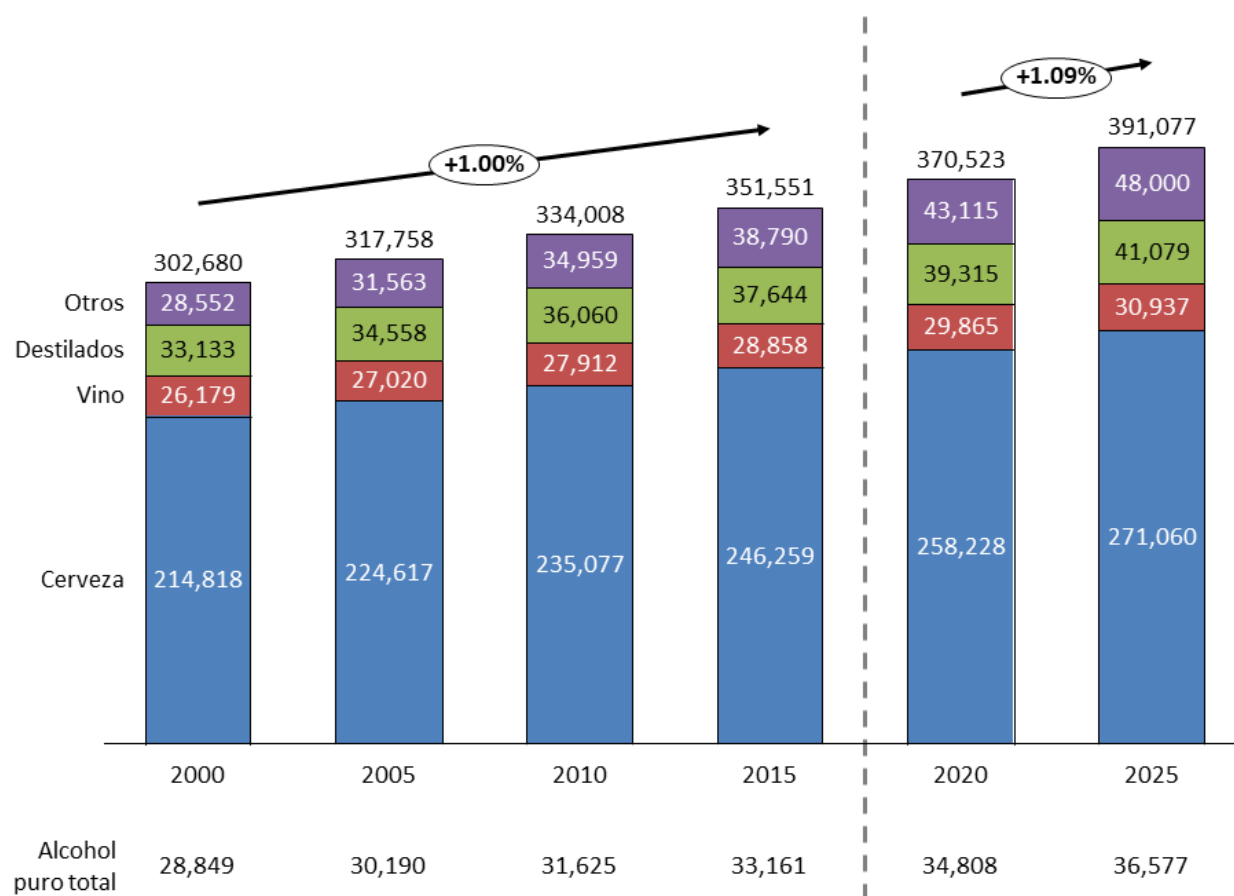


Figura 1.1: Crecimiento histórico y proyección de consumo mundial de bebidas alcohólicas estimado a partir de datos de la Organización Mundial de la Salud [5]. Las cifras se encuentran en millones de litros anuales de bebida alcohólica consumida en todo el mundo por tipo. En la parte inferior se muestra el consumo equivalente de alcohol puro (etanol) en millones de litros anuales. Los datos muestran una tasa promedio de crecimiento anual de 1.0% en el consumo total de bebidas desde el año 2000. La cerveza corresponde aproximadamente al 70% del consumo.

En el contexto actual de inicios de siglo XXI la cultura alcohólica tiene un alcance global y se caracteriza por el alto grado de industrialización de la producción, cuyas consecuencias más importantes han sido: la caída en los costos de fabricación de las bebidas y su respectiva caída en el precio de venta al público, que las ha vuelto disponibles a todos los estratos sociales; la diversificación de la demanda y oferta de bebidas en todo el mundo, que ha expandido el mercado global que ahora incluye nichos especializados que sortean el balance entre calidad y precio; la introducción de políticas de prohibición y de impuestos especiales, que han buscado sin éxito reducir el consumo per cápita con el objetivo de disminuir problemas de salud pública relacionados con la ingesta excesiva de alcohol; el rezago y eclipsamiento de tradiciones culturales de producción y consumo de bebidas en pueblos de todo el mundo, que ha reforzado las pérdidas de identidad cultural de sociedades minoritarias.

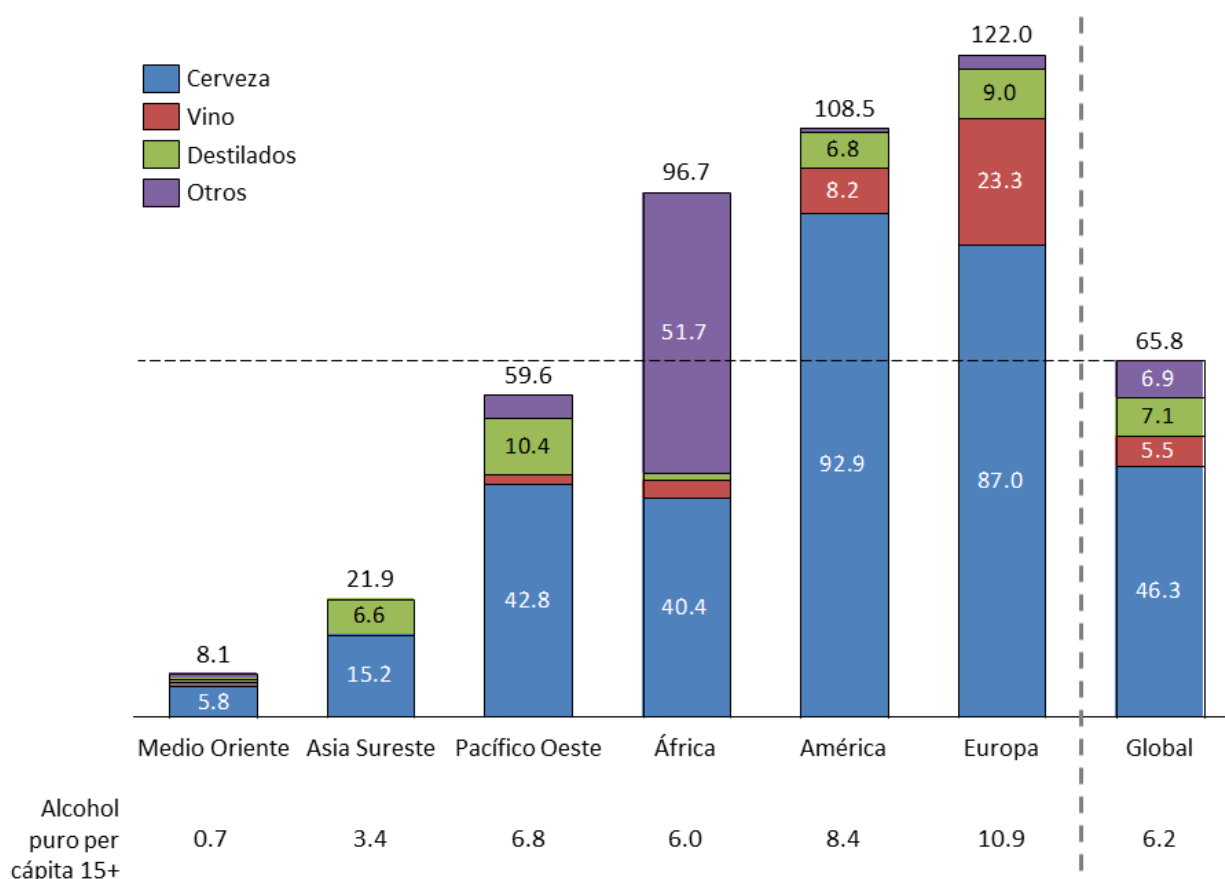


Figura 1.2: Consumo de bebidas alcohólicas per cápita 15+ por región y tipo, estimado a partir de cifras de la OMS [5]. Las cifras se encuentran en litros per cápita 15+. En la parte inferior se muestra el consumo per cápita 15+ equivalente de alcohol puro (etanol). La línea punteada muestra el promedio mundial de consumo.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) monitorea el consumo de bebidas alcohólicas a nivel mundial y publica los resultados de sus censos con cierta regularidad. El último reporte del año 2014 incluye resultados de consumo de alcohol por tipo de bebida, por país, por región y per cápita [5]. En la Figura 1.1 se muestra el crecimiento histórico del consumo mundial de bebidas

alcohólicas en millones de litros desde el año 2000 hasta el 2015, y se muestra el crecimiento proyectado de consumo hasta el año 2025.

Por mucho la cerveza es el tipo de bebida alcohólica que más se consume en el mundo; sin embargo, su contenido de alcohol es menor al de las demás bebidas con un promedio de 5% en volumen; para el vino 12%, para los destilados 40% y para las otras bebidas 6% (en otras bebidas se incluyen mezclas de fermentados y destilados que se consumen en cantidades significativas en África). En 2017 el consumo global de bebidas alcohólicas se aproxima a 360,000 millones de litros anuales, equivalentes a unos 34,000 millones de litros de etanol puro. El crecimiento en el consumo de los últimos años es cercano al 1.0% anual, cifra semejante al crecimiento de la población mundial. El reporte de la OMS incluye datos de consumo per cápita 15+ (consumo total dividido entre la población mayor a 15 años) por región para el año 2010 que se muestran en la Figura 1.2. Europa es la región del mundo que más bebidas alcohólicas consume con un promedio de 122.0 litros al año per cápita 15+, equivalentes a 10.9 litros de etanol puro. En cambio, Medio Oriente solamente consume 8.1 litros. El promedio mundial es de 65.8 litros de bebida alcohólica per cápita 15+ al año, equivalente a 6.2 litros de etanol puro, lo que sitúa a Medio Oriente, el sureste de Asia y el Pacífico Oeste debajo del promedio, y a África, América y Europa por arriba del promedio mundial. Sin embargo, en África se consume bebida de baja graduación alcohólica y el Pacífico Oeste consume la mayor cantidad de destilados de alto contenido alcohólico, por lo que en función del consumo de alcohol puro África se encuentra abajo del promedio de 6.2 litros anuales de etanol y el Pacífico Oeste por arriba.

1.1.2. El mezcal: bebida de tradición artesanal

El mezcal es una bebida alcohólica destilada proveniente del maguey creada en la tradición cultural de los pueblos del sur y centro de México. La bebida es el producto histórico de un proceso complejo de domesticación del maguey y refinamiento paulatino de técnicas agrícolas y gastronómicas de las culturas que habitaron la zona [6, 7]; se trata de un producto artesanal por haberse originado en una tradición indígena y campesina. Su industrialización comenzó recientemente en la década de 1990 con el auge en la popularidad del tequila y posteriormente los demás tipos de mezcal.



Figura 1.3: La imagen de la izquierda muestra una planta de maguey maduro de la especie *espadín*, tomada de [8]. La imagen de la derecha muestra un plantío de magueyes mezcaleros típico de la región de Oaxaca y Guerrero, tomada de [9].

Actualmente la producción de mezcal está protegida por una denominación de origen y una norma federal que especifica las características que debe cumplir la bebida para considerarse como tal, ambas legislaciones están a cargo del Consejo Regulador de Mezcal (CRM), órgano dependiente de la Secretaría de Economía (SE) encargado de su supervisión. La Denominación de Origen Mezcal o DOM define las zonas del territorio nacional sobre el cual es válido el cultivo de maguey para la producción de la bebida. Cuenta con más de $500,000\text{km}^2$ en los siguientes estados: Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas, Michoacán y Puebla [10].

La producción histórica de mezcal se muestra en la Figura 1.4 en millones de litros al año. La producción de mezcal para exportación equivale aproximadamente al 55 % de toda la producción de los últimos 6 años. El auge reciente en popularidad del mezcal se ve reflejado en el crecimiento de la producción total que en promedio ha sido de 33.3 % cada año. Sin embargo, en el contexto nacional, el mezcal solamente equivale al 0.018 % del consumo total de bebidas alcohólicas, es decir, a 1.85 millones de litros al año sobre un total estimado en 10,300 millones de litros.

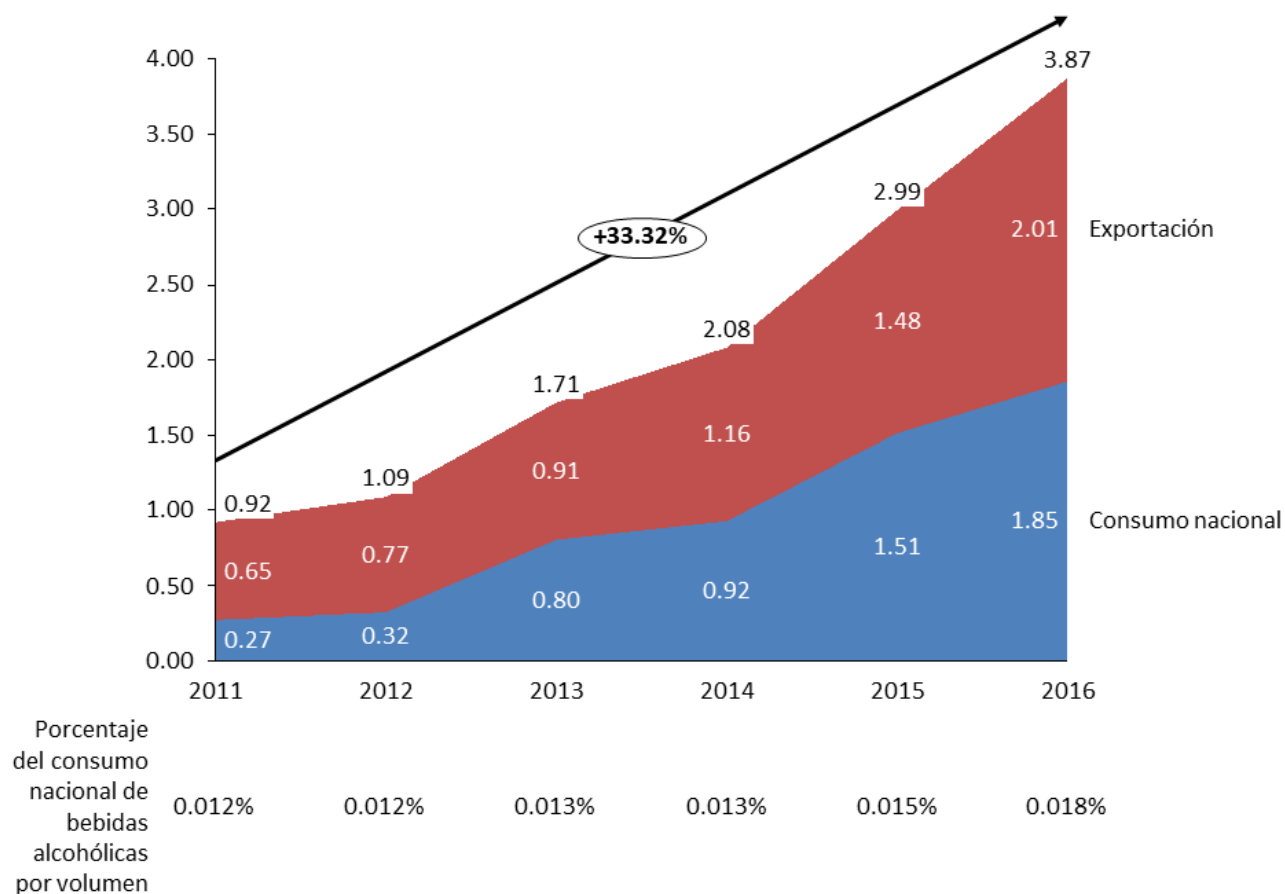


Figura 1.4: Producción histórica de mezcal según datos del Informe Anual 2017 del Consejo Regulador de Mezcal [10]. Las cifras se encuentran en millones de litros al año. Se observa que la tasa de crecimiento anual promedio entre 2011 y 2016 es de 33.3 %. En la parte inferior se muestra el porcentaje que el mezcal representa en el consumo nacional de bebidas alcohólicas.

1.1.4. Proceso de fabricación de mezcal

La cadena de valor del producto mezcal tiene 5 actividades fundamentales llevadas a cabo por los siguientes jugadores: viveristas, agricultores, productores de mezcal, envasadores y comercializadores. La actividad principal de los viveristas es cruzar, reproducir, crecer y resguardar semillas y brotes de magueyes para surtir a los agricultores, quienes plantan, riegan, crecen y cosechan los magueyes. Los productores de mezcal reciben los corazones de magueyes cosechados y los convierten en la bebida alcohólica que será envasada y comercializada en los siguientes pasos de la cadena. En la Figura 1.6 se muestra la cadena de valor completa. Los productores de mezcal serán el principal foco de atención del presente trabajo.



Figura 1.6: Cadena de valor del mezcal de 5 eslabones, tomada de [10].

La fabricación de mezcal es un proceso físico y químico que se divide en 6 subprocesos: cosecha, cocción, molienda, fermentación, destilación y embotellamiento.

Cosecha

El proceso de elaboración comienza con el agricultor, encargado de cultivar los magueyes mezcaleros por un periodo medio de 7 años. Cuando la planta está lista para ser cosechada, el agricultor o jimador corta las hojas del maguey hasta dejar solamente el corazón de la planta conocido como piña. El trabajo del agricultor termina con la comercialización de la piña, la cual pasa al control del maestro mezcalero.



Figura 1.7: Jimador cortando las hojas de un maguey maduro, tomada de [13].

Cocción

La primera actividad que supervisa el maestro mezcalero es la cocción de las piñas del maguey en un horno tradicional. El horno consiste de un hoyo en el suelo con forma de cono invertido. Antes de cada cocción se acomoda en el fondo del horno la leña y las ramas secas que servirán de combustible y se cubre con piedras basálticas. Se enciende el fuego y se espera a que se consuma la leña y que las piedras se calienten al rojo vivo para colocar entre 10 y 30 piñas crudas que a su vez son sepultadas bajo una capa de hojas, piedras y arena. Bajo tierra ocurre lentamente la cocción de las piñas sin entrar en contacto directo con el fuego. El maestro detiene la cocción desenterrando las piñas y sacándolas del horno para pasarlas al molino.



Figura 1.8: Cocción de piñas de maguey en un horno tradicional de piso encendido con leña, bagazo seco y piedras calientes, tomada de [14].

Molienda

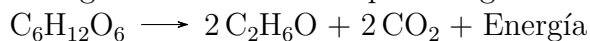
El modo artesanal de moler piñas es con un molino de piedra circular jalado por un burro. Las piñas cocidas son macheteadas en pedazos y colocadas en el molino para ser aplastadas bajo el peso de la piedra. El proceso desintegra los tejidos del maguey dejando una mezcla de fibras, pasta suave y jugos dulces. El producto se recoge del molino y se deposita en barrica de madera sin tapa para la fermentación.



Figura 1.9: Molienda de piñas cocidas de maguey en un horno de piedra tradicional jalado por un caballo, tomada de [15].

Fermentación

En las barricas de madera las levaduras encuentran las condiciones necesarias para llevar a cabo fermentación alcohólica. La fermentación es la transformación de los azúcares originales del maguey, principalmente glucosa $C_6H_{12}O_6$ en forma de sacarosa, en alcohol etílico C_2H_6O y otros subproductos. El proceso químico general está descrito por la siguiente fórmula:



Tradicionalmente el proceso ocurre sin la adición de levaduras artificiales u otros medios para acelerar la fermentación; de esta manera el proceso tarda entre 11 y 15 días en completarse. El maestro puede identificar cuando está listo el subproducto fermentado debido a las burbujas de CO_2 y la degustación del líquido. Este líquido fermentado tiene un contenido alcohólico entre 4 % y 6 % que será concentrado en la destilación para obtener una bebida de un grado alcohólico mayor.



Figura 1.10: Barrica de fermentación del bagazo de maguey, tomada de [16].

Destilación

El líquido fermentado es trasladado a una olla de destilación de cobre donde se agregan ingredientes saborizantes (frutas, hierbas, gusanos de maguey, etc). La olla se cierra y se coloca al fuego, provocando la evaporación de los líquidos; los alcoholes ligeros tienen una temperatura de ebullición menor por lo que se evaporan primero, las moléculas más pesadas se evaporan al final. La parte superior de la olla recolecta los vapores y los transporta por un tubo hacia un serpentín sumergido en agua que actúa como condensador enfriando los vapores. A la salida del condensador se obtiene un producto líquido con cierto contenido de etanol y otras sustancias.



Figura 1.11: Alambique u olla de destilación de cobre de una casa mezcalera, tomada de [17].

Embotellamiento

Antes del embotellamiento el maestro formula (mezcla) los distintos productos de la destilación para obtener el producto final: mezcal. Al mezcal solamente le falta ser embotellado en ollas tradicionales de barro negro, en garrafas de vidrio para su distribución a granel, en botella de vidrio para el consumidor minorista o en barricas de roble para su añejamiento.



Figura 1.12: Presentación final del mezcal en botella de vidrio, tomada de [18].

1.1.5. Producción artesanal de mezcal

La NOM-070 clasifica al mezcal según la tecnología de producción en 3 tipos: industrial, artesanal y ancestral. El proceso artesanal es el foco de la presente investigación. Para ser considerado artesanal la elaboración del mezcal debe cumplir con las siguientes características:

- Cocción: cocimiento de cabezas de maguey en hornos de pozo o elevados de mampostería
- Molienda: con mazo, tahona, molino chileno o egipcio, trapiche o desgarradora
- Fermentación: en piedra, suelo o tronco, piletas de mampostería, recipientes de madera o barro, pieles de animal, cuyo proceso puede incluir la fibra del maguey (bagazo)
- Destilación: con fuego directo en alambiques de caldera de cobre u olla de barro y montera de barro, madera, cobre o acero inoxidable; cuyo proceso puede incluir el bagazo

1.1.6. Las Perlas de Mezcal: prueba empírica de formulación final

En el mezcal es común que la destilación se lleve a cabo más de una vez para obtener un producto puro con mayor contenido alcohólico. Se conoce como producto de 1era destilación al resultado de la primera pasada, 2da destilación a la segunda, y así. En algunos caso el producto se llega a destilar hasta 4 veces.

Antes del embotellamiento, el último paso del proceso de fabricación artesanal es la formulación (mezcla) de distintos productos de la destilación. Esta formulación final se lleva a cabo con el objetivo de obtener una bebida equilibrada en contenido alcohólico y sabor. Se conoce como *punta* al primer volumen de líquido que resulta de la destilación y se caracteriza por tener un contenido alcohólico superior, entre 50 % y 60 % en volumen. La *cola* es el líquido que sale al último del

proceso de destilación y tiene un contenido típico entre 30 % y 40 %. El *cuerpo* es el producto intermedio entre punta y cola y tiene características más equilibradas como se ilustra en la Figura 1.13. Debido a la importancia que este paso tiene en el resultado final y las habilidades gustativas requeridas para llevarlo a cabo, normalmente el maestro mezcalero se encarga de realizar este paso personalmente y definir las proporciones de formulación.

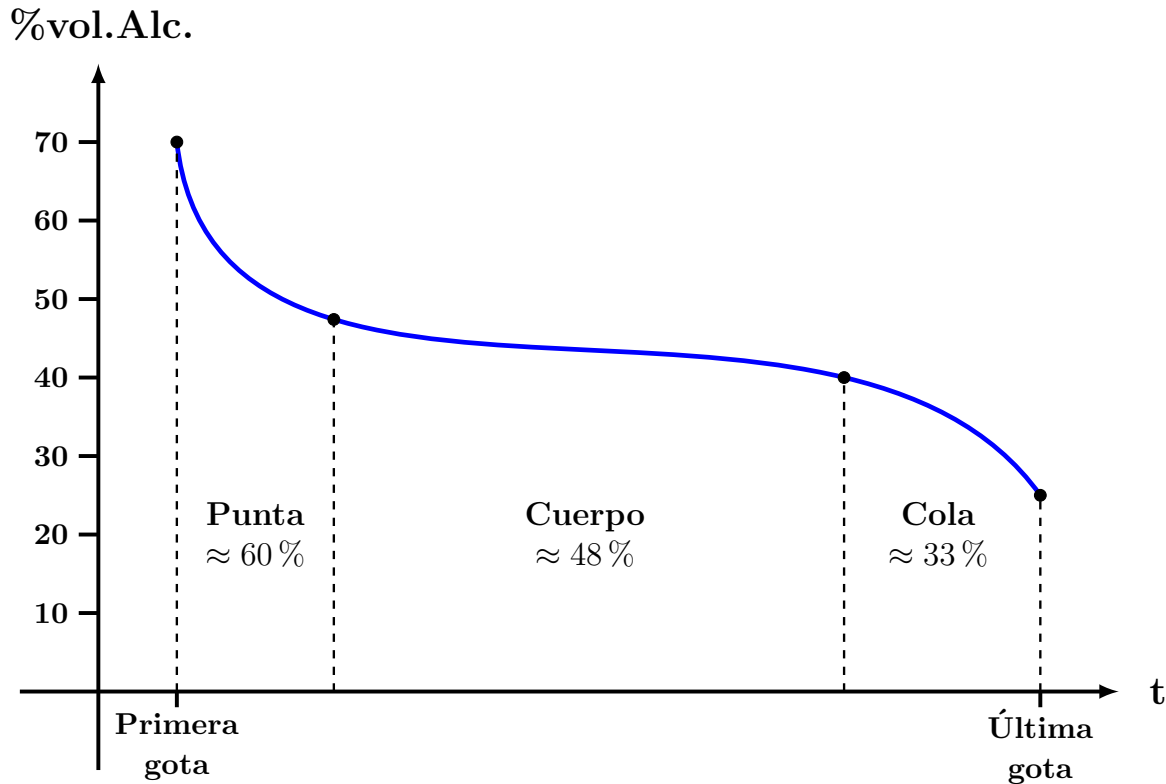


Figura 1.13: Esquema ilustrativo de la variación en el tiempo del contenido de alcohol del producto resultado de la destilación de mezcal, obtenido a partir de entrevistas con maestros mezcaleros de Santiago Matatlán, Oaxaca. La punta tiene un contenido en volumen de alcohol aproximado de 60 %, el cuerpo de 48 % y la cola de 33 %.

El maestro mezcalero puede usar una o varias muestras distintas para determinar las proporciones correctas de punta, cuerpo y cola. Las muestras son sometidas al menos a dos tipos de pruebas para ser calificadas: La primera es una prueba gustativa que depende del paladar del maestro y por tanto es de carácter subjetivo. La segunda es una prueba tradicional para determinar el contenido alcohólico conocida como la prueba de las Perlas de Mezcal.

La prueba consiste en inyectar un chorro de mezcal en una jícara para generar burbujas superficiales que se conocen como perlas y después observar el tiempo que tardan en reventarse y desaparecer de la superficie. El primer paso es llenar la jícara con la muestra de mezcal y usar un popote de bambú para succionar con la boca un poco de la muestra. Se mantiene el líquido dentro del bambú tapando el extremo por donde se succionó con el dedo y después se debe soltar el chorro de manera controlada dentro de la misma jícara. El chorro se mezcla con el mezcal de la jícara y genera burbujas pequeñas que se posan en la superficie con un brillo perlado llamativo. El maestro mezcalero sabe empíricamente que la permanencia de las burbujas perladas en la superficie está relacionado con el contenido alcohólico de la muestra; si el contenido de alcohol es el correcto las perlas permanecerán en la superficie por un tiempo prolongado después de inyectar el chorro; si el

contenido de alcohol es menor o mayor al indicado las perlas reventarán al poco tiempo de inyectar el chorro o inclusive no se formarán. El conocimiento tradicional indica que mientras mayor sea el tiempo de vida de las perlas mayor es la calidad del mezcal. La Figura 1.14 contiene una secuencia de imágenes mostrando la prueba tradicional.

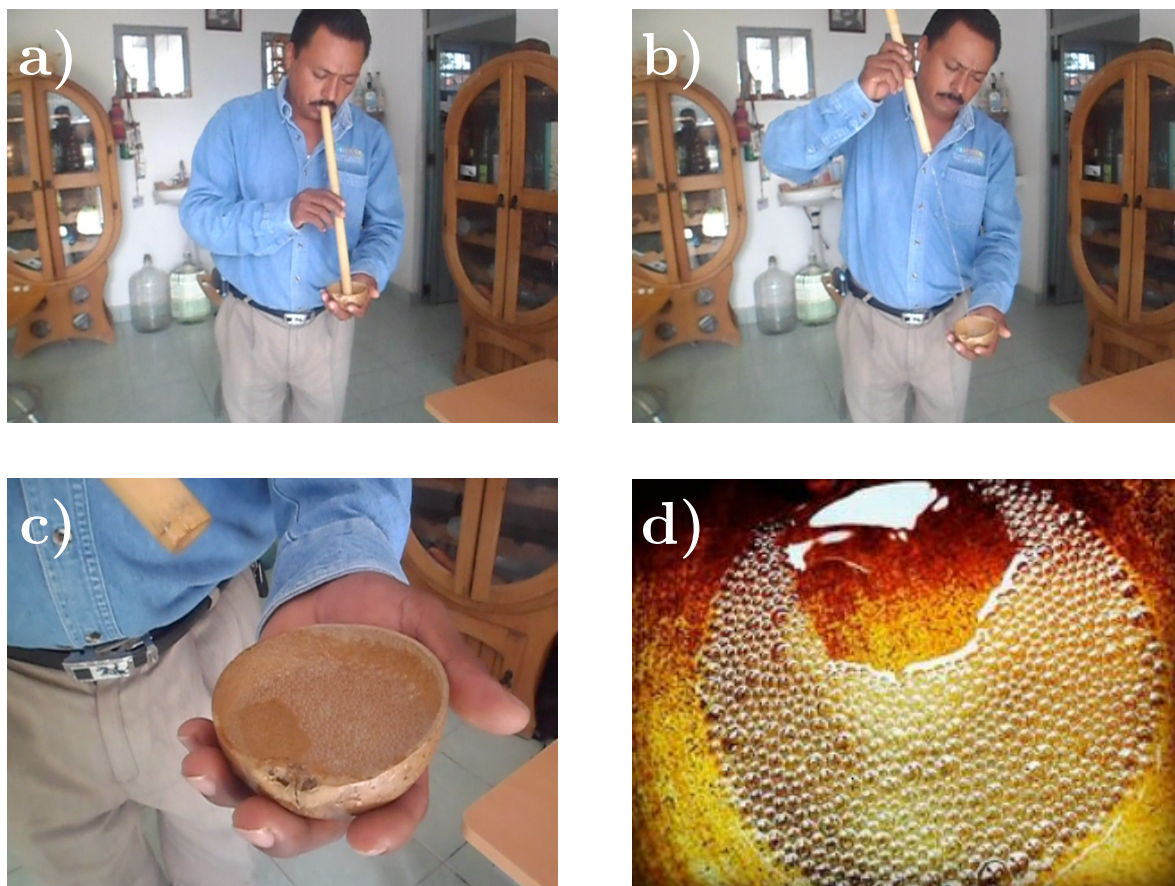


Figura 1.14: Secuencia de imágenes de un maestro mezcalero llevando a cabo la prueba tradicional de las Perlas de Mezcal. Tomadas por Lamberto Díaz en Guerrero, excepto d) tomada de [19].

Durante una vasta investigación de los efectos de las regulaciones y políticas de normalización en la producción de mezcal, la socióloga Sarah Bowen de la Universidad de California entrevistó a varios maestros mezcaleros. En su libro *Divided Spirits* [20] [pag.124-126] documenta una de estas entrevistas en donde un maestro mezcalero de Guerrero le explica la importancia de las perlas:

Después de un recorrido por la viñata, el maestro Gallegos nos invitó a probar su mezcal. Tomó una jícara, copa hecha con la cáscara seca de un fruto, y empujando un tubo de bambú la llenó con mezcal. Agitó el contenido con un movimiento giratorio y me enseñó las burbujas que producía. “Este es fuerte”, me dijo. “Cerca de 50 por ciento”. Gallegos estaba usando una técnica heredada de generaciones anteriores de mezcaleros. Al observar el tamaño y cantidad de las *perlas*, las burbujas que se forman en la superficie del mezcal, y observar cuánto tiempo duran, un maestro mezcalero puede determinar con precisión el contenido de alcohol de una muestra de mezcal. Para muchas personas este es un aspecto importante de conocimiento tradicional. Un recuento histórico de la producción de mezcal en Oaxaca argumentaba que este método

es “el patrimonio de todos los mezcaleros”. El autor escribe, “Por esta razón, nos molesta cuando los ingenieros químicos o los distribuidores nos dicen que las perlas no significan nada para ellos... Para los mezcaleros, las perlas representan las gotas de sudor de nuestros hijos y de nosotros mismos; son nuestro orgullo y un signo de que somos mezcaleros artesanales.”

1.2. Las Perlas de Mezcal: descripción del fenómeno físico

El origen de la técnica de las perlas como prueba de contenido alcohólico es incierto, pero se pueden inferir algunos hechos al respecto. Podemos plantear la hipótesis de que el conocimiento de una relación directa entre el tiempo de vida de las burbujas y el contenido de alcohol del mezcal se debió a la observación repetida de burbujas por maestros mezcaleros que exploraban meticulosamente la forma de mejorar su producto. La prueba de las perlas pertenece al cuerpo de conocimiento empírico propio de las culturas mezcaleras y, desde su realización a la fecha, su transmisión ha sido principalmente por el medio oral de maestro mezcalero a aprendiz de maestro.

El origen empírico y cultural de la prueba hace muy atractivo el estudio del fenómeno para la ciencia en general y la mecánica de fluidos en particular porque proporciona una gran cantidad de observaciones no documentadas de un fenómeno físico que aún no tiene explicación, y porque puede contar con un rango de aplicaciones valiosas. Encontrar una explicación científica al fenómeno de las perlas de mezcal es el objetivo principal del presente trabajo de investigación. Para ello se emplearán las herramientas de la mecánica de fluidos así como sus métodos matemáticos y experimentales. El estudio comienza en las secciones siguientes con una descripción detallada del fenómeno físico dividido en etapas y su abstracción bajo el punto de vista de la mecánica de fluidos.

1.2.1. Formación de las perlas

La técnica tradicional para crear perlas inyectando un chorro de mezcal en una jícara coincide con un fenómeno bifásico comúnmente estudiado en mecánica de fluidos: el atrapamiento de aire por chorros de líquido cayendo en un volumen del mismo líquido [21]. El fenómeno consiste en un chorro o columna de líquido que cae en intervalos regulares o intermitentes sobre la superficie de un volumen del mismo líquido, resultado del cual se llegan a atrapar cantidades de aire bajo la superficie que forman cavidades que colapsan y se convierten en burbujas y después en burbujas superficiales [21–27]. En la Figura 1.15 se muestra un chorro de agua impactando una superficie libre de agua que termina con la formación de una burbuja de aire.

El fenómeno se puede entender como el proceso complejo de penetración de una fase gaseosa en una líquida por inyección de un chorro. Su estudio ha sido relevante para entender procesos industriales y naturales de mayor magnitud como el rompimiento de olas en la superficie del océano; la aireación y oxigenación de cuerpos de agua; el intercambio gaseoso durante la fermentación de bebidas; el vertimiento de sustancias derretidas en procesos de manufactura como polímeros, vidrios, metales, cosméticos, pinturas y alimentos; el atrapamiento de aire alrededor de cascos de barco y propelas; y la producción de espumas y materiales celulares. El entendimiento del fenómeno ha permitido prevenir el atrapamiento de aire así como promoverlo según requiera cada aplicación.

Observaciones detalladas en laboratorio han permitido identificar los parámetros principales que gobiernan el atrapamiento de aire: la velocidad del chorro, el diámetro y longitud de chorro, las propiedades físicas del líquido (viscosidad, densidad y tensión superficial), la forma del chorro, el ángulo en que entra en contacto con la superficie y la rugosidad de la superficie del chorro.

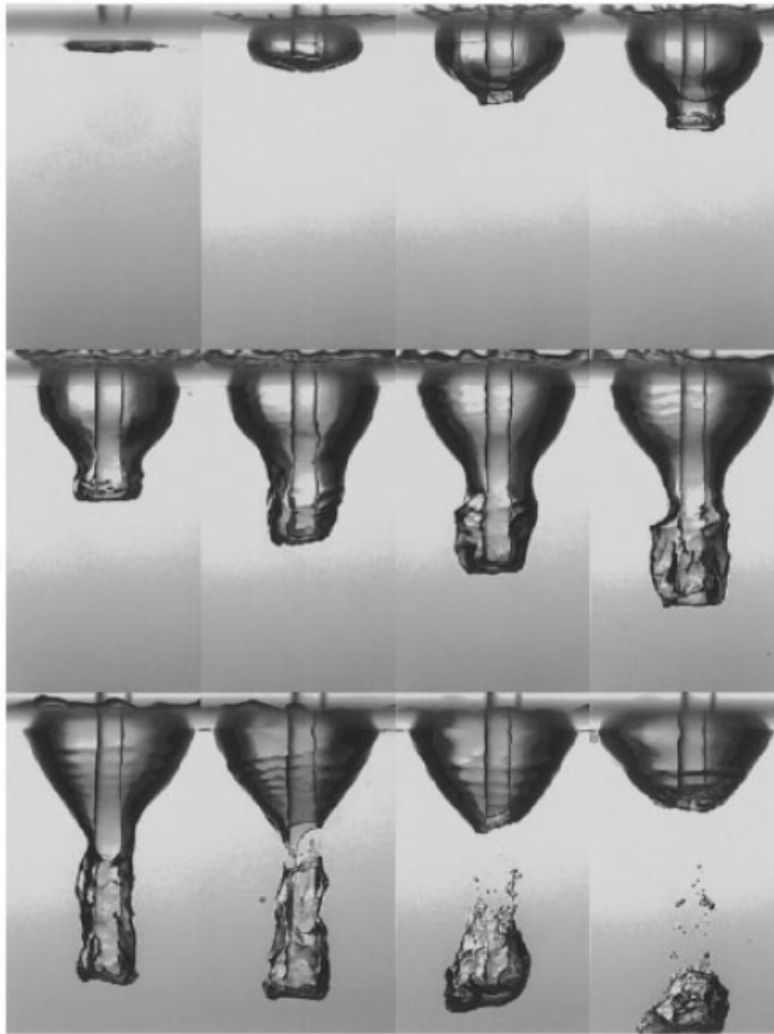


Figura 1.15: Secuencia de imágenes que muestran la formación de una cavidad de aire por el impacto de un chorro sobre una superficie libre y su posterior colapso y formación de una burbuja de aire, tomada de [21].

Para cuantificarlos se han construido arreglos experimentales con cámaras rápidas [23–27], se han construido modelos teóricos-empíricos [22] y se han programado modelos computacionales complejos [21]. La mayoría de estos esfuerzos buscan responder a la pregunta, ¿cuánto volumen de gas puede atrapar un chorro definido?

Quizas el mejor entendimiento del fenómeno a la fecha es el de Zhu, Oguz y Prosperetti [21]:

- Un chorro de líquido perfectamente liso (ideal) no atrapa aire, aún en velocidades elevadas
- Un chorro real con pequeñas irregularidades en su superficie (debidas a turbulencia en Re altos o inestabilidades como Rayleigh-Plateau) puede atrapar cantidades de aire relativamente grandes
- El aire atrapado forma cavidades en la superficie que colapsan por la acción de la gravedad formando burbujas

Las burbujas formadas en este mecanismo nacen inmersas en un flujo que determinará su comportamiento posterior. Un parámetro importante para entender lo que ocurrirá con la burbuja

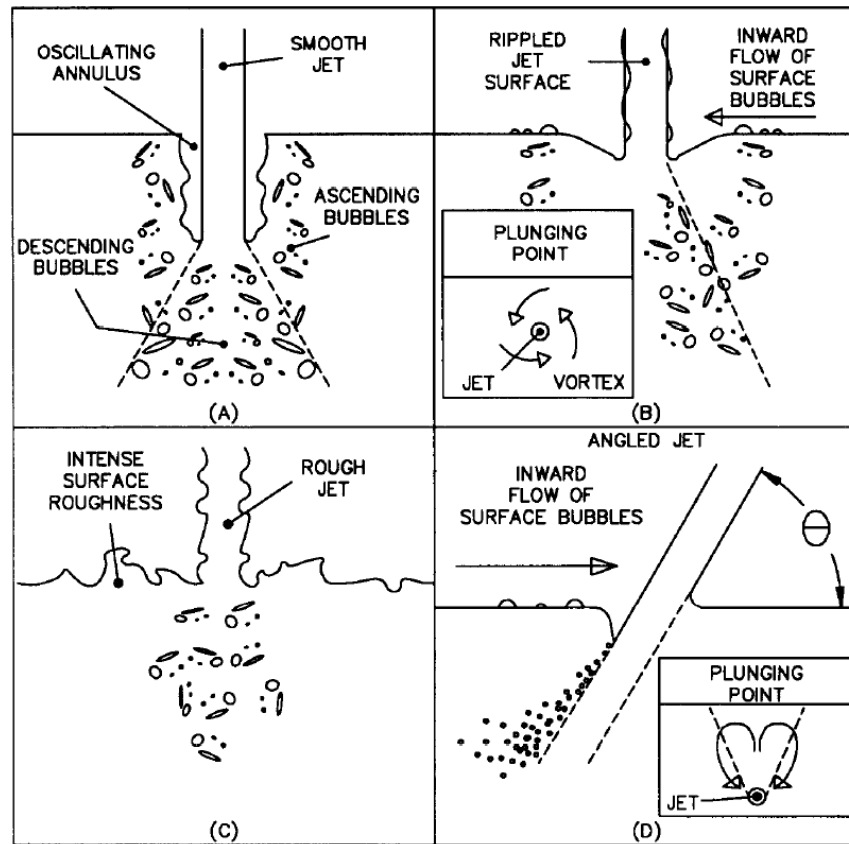


Figura 1.16: Esquema de comportamientos comunes de burbujas de aire formadas por la inyección de un chorro, tomada de [23].

después de su nacimiento es la profundidad a la cual logra penetrar el aire, es decir, la profundidad a la cual nace la burbuja. En la Figura 1.16 tomada de [23], se muestran de forma ejecutiva los escenarios de comportamiento inmediato posterior al nacimiento de burbujas identificados en laboratorio. Se observan en el cuadro (A) burbujas que son empujadas hacia abajo por la fuerza de inercia del chorro, en el (B) burbujas que llegan a la superficie y son atraídas de nuevo hacia el chorro en un movimiento de recirculación, en el (C) burbujas con movimientos caóticos debidas a chorros y superficies turbulentos, y en el (D) burbujas creadas por un chorro en ángulo que además recirculan.

En la creación de perlas de mezcal el chorro generado por el maestro mezcalero es turbulento: tiene una velocidad relativamente alta y una viscosidad baja, lo cual significa que el Re es muy elevado. Además, la poca profundidad de la jícara hace que el chorro se impacte directamente contra ella contribuyendo a crear más turbulencia. Esto provoca el atrapamiento de grandes cantidades de aire y la formación abundante de burbujas en la superficie. Al terminarse la inyección del chorro la superficie recobra su nivel y, si la calidad del mezcal es buena, se encuentra cubierta en gran parte por perlas.

1.2.2. Vida de las perlas

Después de ser formadas las burbujas suben a la superficie por flotación donde pueden reventarse inmediatamente o pueden estabilizarse por periodos de tiempo largos (segundos o minutos) hasta que finalmente revientan. El tiempo transcurrido desde que se estabiliza hasta que revienta se

conoce como tiempo de vida de la burbuja y depende de variables internas y externas al fluido. Las perlas de mezcal se caracterizan por su tiempo de vida, T_p , largo que los maestros mezcaleros han relacionado con propiedades intrínsecas al fluido en particular el contenido de etanol.

En la superficie las burbujas se encuentran en estado cercano al equilibrio durante el cual ocurren cambios imperceptibles en su volumen y geometría. Varios autores han descubierto procesos que continúan ocurriendo en el sistema durante este tiempo y que finalmente, después de un tiempo de vida suficiente, llevan a que una burbuja salga del estado de equilibrio y reviente sin la acción de una perturbación externa. Prosperetti et al. [28] proponen que el tiempo de vida de una burbuja es el requerido para que la película delgada que la forma se adelgace debido a un mecanismo de drenado del líquido hasta alcanzar la inestabilidad y después la ruptura. Doublez et al. [29] y Howell et al. [30] estudian y desarrollan modelos mecanicistas de drenado de burbujas que buscan predecir tiempos de vida a partir de una aproximación de lubricación de Navier-Stokes. Los autores identifican las variables relevantes para el proceso como el gasto volumétrico de drenado, la tasa de adelgazamiento de la pared y el espesor crítico de ruptura. La Figura 1.17 representa un modelo geométrico de 3 variables de una burbuja superficial empleado por varios autores.

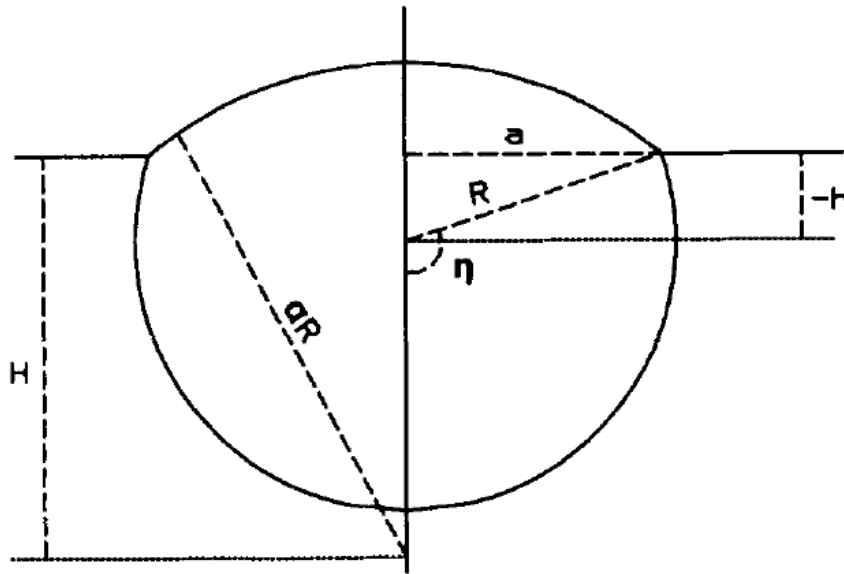


Figura 1.17: Modelo geométrico de una burbuja superficial tomado de [28].

La siguiente ecuación es propuesta por Ghosh et al. [31] para calcular el espesor crítico de la pared de una burbuja a partir del cual puede ocurrir una ruptura:

$$h_{rup} = 0.267 \left(\frac{a_f A_H^2}{6\pi\gamma\Delta p} \right)^{1/7} \quad (1.1)$$

En donde a_f es el área de la película, A_H es la constante de Hamaker, γ es la tensión superficial y Δp es el diferencial de presión interna y externa.

A partir de un modelo determinista, que parte de una simplificación en 2 dimensiones, Howell [30] llegan a la siguiente ecuación para el tiempo de ruptura de una burbuja aislada:

$$t_{rup} = \frac{3\pi}{32} \frac{\mu\rho g}{\sigma^2} R^3 \left(\sqrt{\frac{R}{h_{rup}}} - \sqrt{\frac{R}{h_0}} \right) \quad (1.2)$$

En donde R es el radio de curvatura de la burbuja (medida característica del tamaño de la burbuja en unidades adimensionales) y h_0 es el espesor inicial de la pared.

La mayoría de autores coincide en la importancia de otros factores intrínsecos en el estudio del tiempo de vida de burbujas. Ghosh [31] menciona la existencia de fluctuaciones térmicas en la pared de la burbuja debidas a la evaporación del líquido que pueden llevar a la inestabilidad y nucleación de una fractura. Este autor también resalta la importancia de la actividad superficial, específicamente la migración y concentración de contaminantes químicos y agentes superficiales activos, como surfactantes y co-surfactantes, en la pared de la burbuja. De manera similar Garret [32] estudia los efectos de una capa monomolecular en las paredes de la burbuja formada por adsorción de agentes químicos polares. Doubliez [29] encontró experimentalmente que el tiempo de vida es altamente sensible a la presencia de contaminantes superficiales. La Figura 1.18 esquematiza algunas características de la pared delgada de una burbuja superficial.

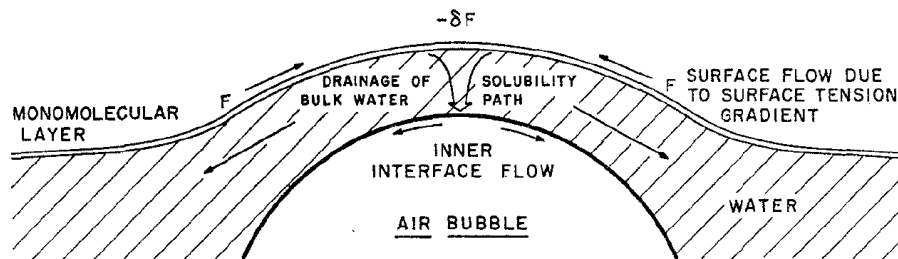


Figura 1.18: Esquema ilustrativo de las características estructurales principales de una burbuja superficial, tomada de [32].

La manera en que contaminantes y agentes químicos afectan las propiedades intrínsecas de fluidos, como la tensión superficial es conocida, sin embargo, existe discusión sobre el mecanismo específico por el cual alargan o acortan el tiempo de vida de burbujas superficiales. Autores como Prosperetti y Ghosh [28, 31] mencionan consecuencias en la estabilidad de la película delgada; Garret [32] habla de la rigidización de las interfaces; mientras que Doubliez [29] menciona la existencia de gradientes de tensión superficial en la interface, la elasticidad de las superficies y las variaciones en el espesor de la pared delgada. En el desarrollo de su modelo Howell [30] considera una variación geométrica de la burbuja debido a variaciones en la tensión superficial representadas por el número de Bond, Bo . En la Figura 1.19 se resumen sus resultados.

En cuanto a mecanismos de nucleación de ruptura se ha discutido sobre la posible influencia de factores internos y externos. Existe consenso en que una vez alcanzada la inestabilidad o el espesor de pared crítico, la presencia de una perturbación mínima o una partícula contaminante aumenta drásticamente la posibilidad de nucleación de una fractura en la pared de la burbuja. En cuanto a partículas contaminantes Ghosh [31] menciona experimentos llevados a cabo con fluidos ultrapurificados en donde el tiempo de vida de burbujas en agua simple aumenta significativamente. El mismo autor resalta la importancia de otro mecanismo, según el cual, cuando el espesor de la película es suficientemente pequeño, las fuerzas de van der Waals se vuelven dominantes y provocan el colapso puntual de la película.

Otros autores han estudiado la vida de burbujas con métodos estadísticos. [33] realizó series experimentales para distintas muestras y encontró que la distribución de probabilidad de Rayleigh se ajusta razonablemente bien a los resultados. También demostró que el tiempo de vida promedio de las burbujas depende de su tamaño. Uno de sus resultados se muestra en la Figura 1.20.

Empleando un método probabilístico Hsu et al. [33] obtienen una ecuación para el tiempo de

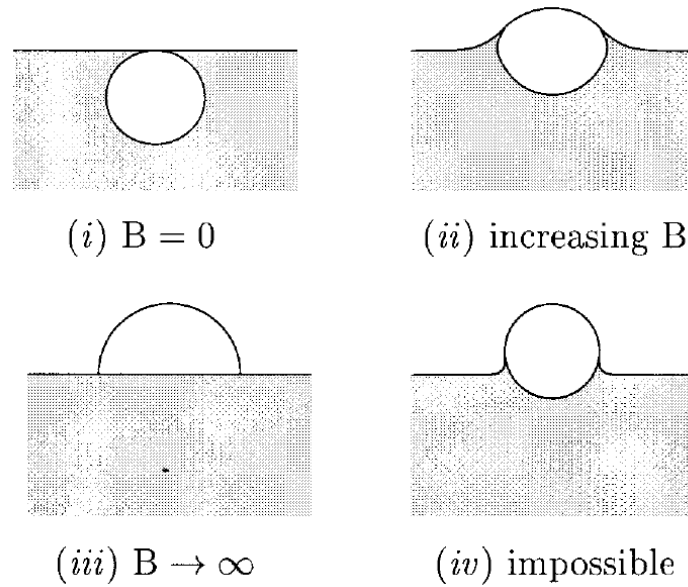


Figura 1.19: Idealización del comportamiento de burbujas superficiales en función del número de Bond, B_o , tomada de [30].

ruptura promedio de burbujas en función de su tamaño y 2 constantes empíricas:

$$t_{rup} = k \frac{d}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{d}{2\sigma^2}\right) \quad (1.3)$$

Donde d es el diámetro de la burbuja y k y σ^2 son constantes empíricas, en unidades respectivas de segundos y centímetros, cuyos valores deben determinarse experimentalmente para cada fluido.

Las burbujas superficiales formadas con la inyección de un chorro presentan otras características y fenómenos que vale la pena mencionar en breve ya que algunos son muy evidentes en las perlas de mezcal. Diferentes autores han estudiado a mayor o menor profundidad estos fenómenos explicando sus causas, identificando sus variables principales y modelando su comportamiento:

Cantidad: Es de interés poder predecir la cantidad de burbujas que un chorro genera y la manera en que éstas se reparten sobre la superficie libre. De forma general, a la mecánica le interesa poder identificar el mecanismo por el cual un grupo de burbujas superficiales se convierte en una espuma.

Tamaño: El tamaño de las burbujas está relacionado con el proceso de formación y las propiedades del fluido; es de interés poder predecirlo y relacionarlo con la cantidad de burbujas.

Agrupamiento: Las burbujas superficiales tienden a agruparse y concentrarse en las orillas del contenedor debido a la pequeña elevación local de la superficie líquida (debido a la capilaridad) y el correspondiente efecto de flotación.

Coalescencia: La coalescencia ocurre cuando dos o más burbujas en contacto logran eliminar la sección de pared que comparten y unen sus volúmenes para formar una sola burbuja que puede ser más grande, igual o más pequeña.

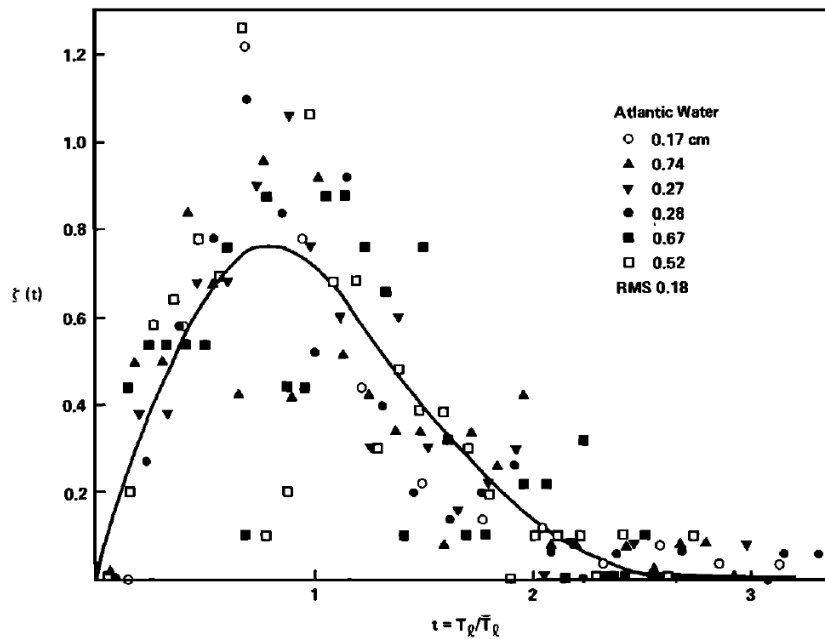


Figura 1.20: Distribución de probabilidad del tiempo de vida de burbujas superficiales para 3 muestras distintas de agua de mar tomada de [33]. Los puntos corresponden a mediciones de laboratorio y la línea es la función de distribución de Rayleigh que mejor se ajusta a los datos experimentales.

Rebote en la interface: Es un fenómeno que ocurre cuando una burbuja asciende por flotación y al llegar a la superficie libre no se estabiliza ni revienta, sino que rebota hacia abajo tan sólo para volver a subir. Una burbuja puede rebotar más de una vez hasta estabilizarse.

1.2.3. Rompimiento de las perlas

La nucleación de una ruptura en la interface aire-líquido es el inicio del proceso de rompimiento de la burbuja superficial; una vez que se forma una fractura en la pared el rompimiento de toda la burbuja es inevitable. Un pequeño agujero circular en la película líquida se expande rápidamente por la superficie pseudo-esférica arrastrando el fluido que la formaba hacia afuera y hacia abajo haciéndola desaparecer. Pequeñas partículas de líquido son expulsadas en el proceso debido a la elevada velocidad. Cuando la parte superior de la burbuja se contrae totalmente lo que resta es un cráter semi-esférico en la superficie del fluido [34,35]. El cráter es inestable por lo que distintas fuerzas actuando sobre el fluido (tensión superficial y flotación) tienden a cerrarlo hasta alcanzar una superficie plana estable. Simultáneamente, el gas contenido originalmente en la burbuja se une con el gas de la atmósfera y el fondo del cráter comienza a elevarse.

Cuando la película delgada de la burbuja se ha contraído por completo deja de acelerar y alcanza su velocidad máxima con dirección hacia el fondo del cráter. La película delgada se mueve rápidamente por las laderas del cráter hasta colisionar en su fondo. Resultado de la colisión nace un chorro líquido que sale disparado hacia arriba por encima del nivel de la superficie libre alcanzando valores de Re del orden de 1,000 [35]. En muchas ocasiones el chorro líquido se rompe en pequeñas gotas que salen disparadas hacia arriba. El chorro pierde velocidad, alcanza una altura máxima y se contrae nuevamente generando ondas en la superficie libre. Cuando las ondas se disipan la superficie libre regresa a un estado estable. En la Figura 1.21 se muestra una secuencia de imágenes

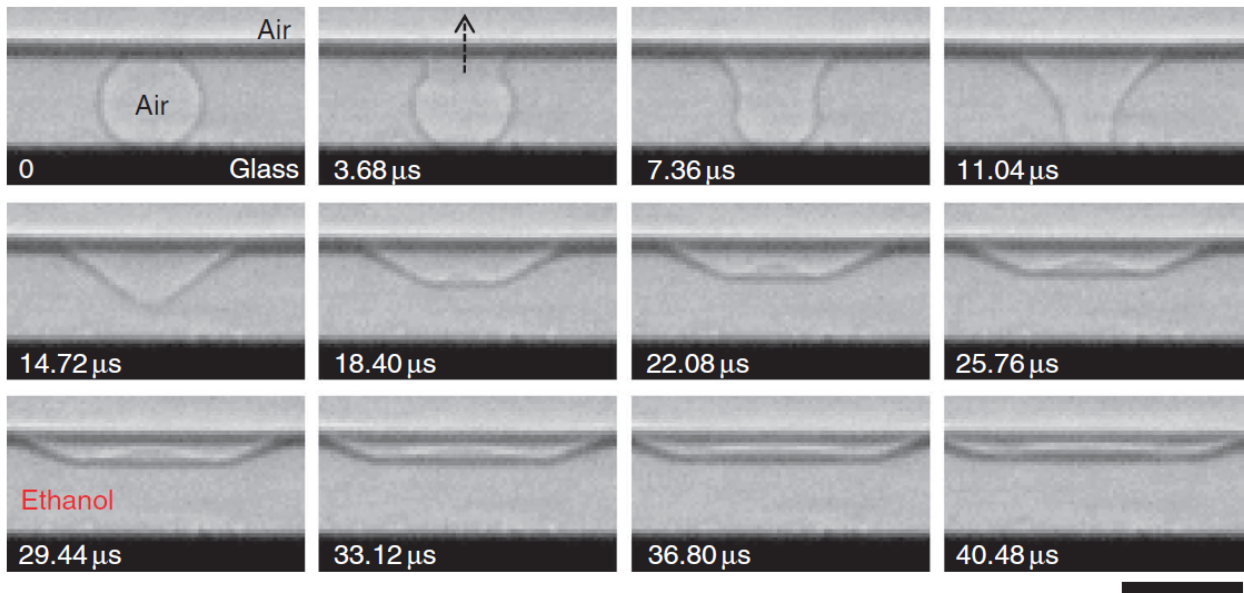


Figura 1.21: Secuencia de imágenes del proceso de ruptura de una burbuja superficial en etanol tomada con una cámara de rayos-x de alta velocidad por [36].

del proceso de rompimiento de una burbuja capturadas por Lee et al. [36] con un sistema de rayos-x de alta velocidad.

Una burbuja estacionada en la superficie libre de un líquido en realidad se encuentra en un estado meta-estable. En la configuración meta-estable el sistema guarda energía potencial en elementos de inercia y elasticidad [35]. La inercia existe indirectamente en el sistema a través de las fuerzas de flotación debidas a la masa del líquido y el gas que forman a la burbuja. La elasticidad existe en la superficie del líquido debido a la tensión superficial de la interface. Las fuerzas de flotación empujan la burbuja hacia arriba; la tensión superficial empuja la burbuja hacia abajo. En el estado meta-estable ambas fuerzas son de igual magnitud pero de sentido contrario.

El rompimiento de la película delgada es el evento que hace que el sistema salga del estado meta-estable hacia uno de estabilidad definitiva pasando por un periodo de transición. La perforación de la película destruye el equilibrio del sistema el cual comienza a liberar energía potencial en forma de movimiento de fluidos. La contracción de la película delgada es la primera manifestación de energía liberada; las fuerzas de tensión superficial aceleran la película la cual comienza a moverse alcanzando velocidades elevadas. El fenómeno que sucede a esta etapa inicial es el resultado de la interacción compleja entre la liberación de energía potencial en sus dos formas, las propiedades hidrodinámicas de los fluidos (densidad, viscosidad y tensión superficial) y el movimiento de los volúmenes de fluido. La energía potencial contenida en la configuración inicial del sistema continúa liberándose hasta que el cráter se cierra totalmente, después de ello el sistema sigue en transición debido a la inercia de la masa en movimiento. El periodo de transición termina cuando el chorro líquido se contrae, la superficie libre vuelve a ser plana y las ondas superficiales se disipan; el sistema ha alcanzado el equilibrio energético. Lee [36] considera que el fenómeno es análogo a la unión de gotas en un estrato líquido; en la Figura 1.22 se muestran imágenes que capturó de chorros en etanol.

Algunas de las propiedades más relevantes del fenómeno del chorro expulsado son: velocidad del chorro, tamaño de la primera gota expulsada, altura de separación de la primera gota, altura alcanzada por la primera gota, etc. [34] considera que el comportamiento del chorro líquido de-

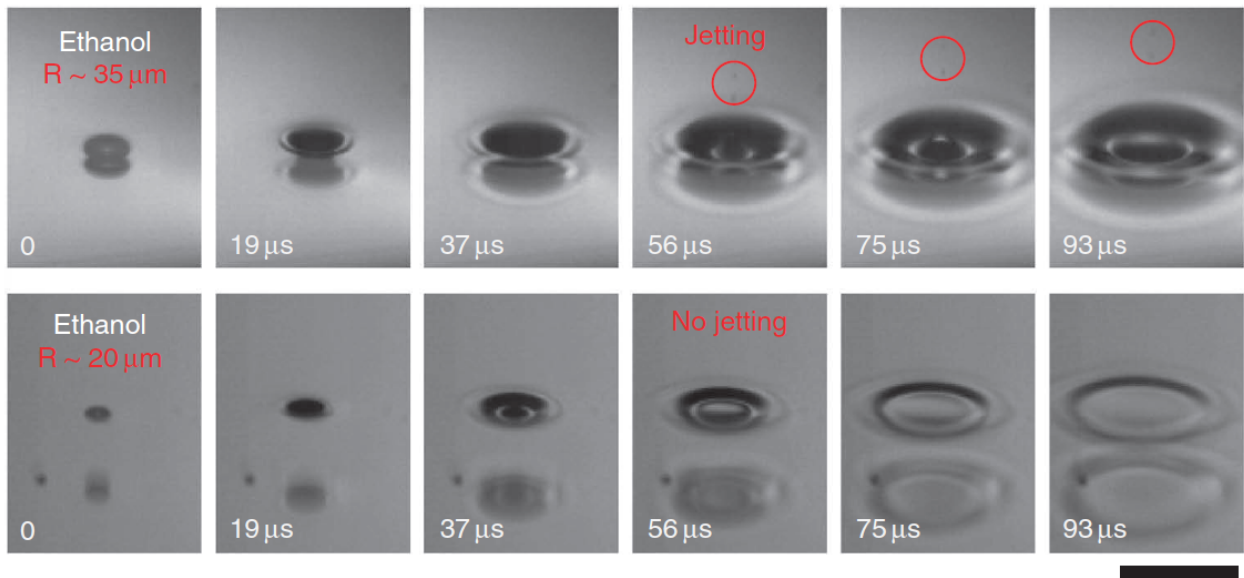


Figura 1.22: Secuencia de imágenes que muestran la formación de un chorro vertical tras la ruptura de una burbuja superficial en etanol. En la serie superior el tamaño de la burbuja es mayor al de la inferior y presenta el rompimiento del chorro en gotas que son expulsadas, mientras que la burbuja de menor tamaño no lo presenta [36].

pende de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad y tensión superficial) y de la longitud característica de la burbuja. A partir de las 3 propiedades y la gravedad solamente se pueden definir dos longitudes características del fenómeno: la longitud capilar en la Ecuación 1.4 y la longitud viscosa-capilar en la Ecuación 1.5.

$$L_c = \left(\frac{\sigma}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

$$L_v = \frac{\rho \nu^2}{\sigma} = \frac{\mu^2}{\rho \sigma} \quad (1.5)$$

Si el radio característico de la burbuja inicial es mucho menor a la longitud capilar entonces los efectos capilares predominan en el fenómeno, si no los efectos inerciales predominan. Si el radio característico es mucho mayor a la longitud viscosa-capilar entonces los efectos viscosos son despreciables. Para radios característicos mayores a L_v y menores a L_c el fenómeno es dominado por la tensión superficial y la inercia. En acuerdo con esta teoría [36] encontró experimentalmente que el tamaño inicial de la burbuja limitaba la formación del chorro líquido para distintos fluidos. Boulton et al. [35] y Duchemin et al. [34] llevaron a cabo simulaciones numéricas que toman en consideración estas longitudes características para simplificar y resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, uno de sus resultados se muestran en la Figura 1.23

1.3. Motivación y objetivos

La motivación para llevar a cabo la presente investigación tiene su origen en la creciente popularidad del mezcal en los últimos años justificada en la gráfica de producción de la Figura 1.4. La demanda de mezcal en el mercado de bebidas destiladas ha crecido significativamente desde 2011

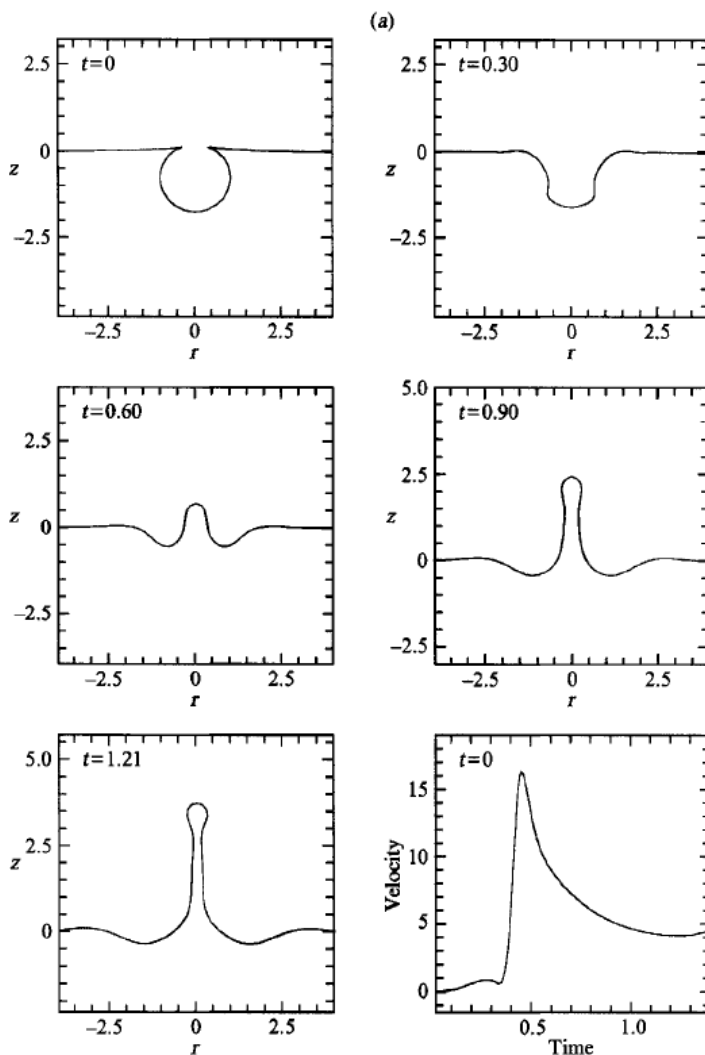


Figura 1.23: Secuencia de imágenes con resultados de una simulación llevada a cabo por [35] del rompimiento de una burbuja superficial y la posterior formación del chorro vertical. La gráfica de la esquina inferior derecha muestra una velocidad característica del chorro en función del tiempo.

llamando la atención del sector empresarial, político y académico. En consecuencia, se ha observado crecimiento en productos y servicios relacionados a la bebida, por ejemplo: la promulgación de la nueva norma oficial NOM-070 en 2016, la venta de subproductos como la sal de gusano, la creación de rutas turísticas en las regiones mezcaleras, la apertura de locales comerciales especializados en la venta de mezcal en la Ciudad de México, entre otras. A partir de la difusión de la cultura mezcalera se ha dado a conocer con mayor detalle al público en general el proceso de fabricación, del cual la prueba tradicional de las perlas de mezcal es una parte esencial. El autor cree que brindar una explicación científica al fenómeno de las perlas aumenta al cuerpo de conocimiento que se posee actualmente sobre la bebida y demuestra la existencia de una vasta fuente de investigación científica inspirada en procesos culturales tradicionales.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal explicar por qué los maestros mezcaleros pueden determinar el contenido de etanol del mezcal empleando el método tradicional de las perlas de mezcal. Para ello será necesario explicar la estabilidad de las perlas que se

manifiesta en un tiempo de vida largo, y la relación entre el tiempo de vida de las perlas y el contenido de etanol del mezcal. La metodología empleada es mayormente experimental aunque también se recurre a un análisis teórico simple. El trabajo está dividido en capítulos que persiguen objetivos específicos dentro de la investigación y sirven para explicar el procedimiento de trabajo, los resultados obtenidos y las conclusiones que se pueden deducir a partir de ellos. Los objetivos por capítulo son los siguientes:

- Capítulo 2: Medir el tiempo de vida de burbujas superficiales en distintos mezcales auténticos
- Capítulo 3: Comparar las mediciones contra otras hechas en fluidos de control (mezclas agua-etanol, mezclas agua-glicerina)
- Capítulo 4: Desarrollar una o varias hipótesis que expliquen el fenómeno y demostrar su validez

Capítulo 2

Arreglo experimental

El método empleado para el estudio de las perlas de mezcal es mayormente experimental, por lo que fue necesario desarrollar un arreglo instrumental versátil y robusto que permita ejecutar ensayos análogos al método tradicional de manera consistente. El segundo capítulo describe el método diseñado para estudiar las perlas. La primera parte describe la configuración física del experimento que permite generar de forma controlada perlas individuales y observarlas a detalle. La segunda sección incluye una explicación de las propiedades de los mezcales y demás fluidos sometidos a prueba.

2.1. Diseño del experimento

El método experimental busca recrear en el laboratorio un fenómeno físico que generalmente ocurre de manera no controlada durante la fabricación de mezcal. En el caso de las perlas de mezcal se busca recrear la prueba tradicional desarrollada por los maestros mezcaleros. Dicha prueba consiste en la observación y medición intuitiva del tiempo de vida de las perlas formadas con la inyección de un chorro en una jícara. Desde el punto de vista de este trabajo, es necesario transformar esta prueba tradicional a una prueba análoga de laboratorio que sea científicamente rigurosa.

El fenómeno de estudio central de este trabajo es el tiempo de vida de las perlas, y no lo es su proceso de formación ni su proceso de ruptura. Dichos procesos han sido estudiados a profundidad por varios autores para distintos fluidos como se muestra en el Capítulo 1. A partir de los resultados de dichos autores, suponemos que es posible eliminar de la prueba de laboratorio la inyección del chorro líquido y sustituir la generación de las perlas por un método de inyección de aire directo sin que esto afecte su tiempo de vida. Las ventajas prácticas de este método simplifican significativamente el trabajo experimental; de esta manera se puede controlar fácilmente la cantidad de aire que se inyecta, el tamaño de las perlas y la cantidad de perlas que se observan simultáneamente, pudiendo inclusive estudiar perlas individuales. Dicho experimento se puede ejecutar con un contenedor de líquidos y una jeringa que inyecte aire dentro del volumen de fluido.

Es de gran importancia para el experimento el poder controlar la posición de las perlas en la superficie durante la observación. En una superficie plana las perlas se mueven aleatoriamente y tienden a estacionarse en las orillas, lo cual complica su seguimiento visual. Para evitar esto se propone generar en el contenedor de fluidos un menisco convexo de líquido que obligue a las perlas a mantenerse estáticas en su punto más alto. Para formar un menisco solamente es necesario emplear un contenedor de fluidos cilíndrico y sobrellenarlo de líquido al momento de la experimentación.

Es necesario medir con precisión el tiempo de vida de las perlas y su tamaño. Al tratarse de un fenómeno que existe en escalas temporales de ms y espaciales de μm , es poco riguroso tomar mediciones visuales. En este caso, la mejor manera de lograr mediciones precisas es grabar las perlas con cámaras rápidas y analizar las imágenes obtenidas para extraer los datos de tiempo de vida y tamaño. Por tanto, es necesario que el arreglo permita grabar fácilmente el fenómeno que ocurre en la superficie del líquido y permita iluminar correctamente las perlas para lograr una fotografía adecuada. Si el experimento se lleva a cabo repetidas veces para distintos fluidos y se extraen los datos de las imágenes obtenidas se puede construir una base de datos que contenga información representativa del fenómeno para ser estudiada posteriormente con métodos matemáticos.

2.1.1. Configuración del arreglo experimental

La configuración del arreglo experimental está dividida en 3 sistemas principales: un sistema de ensayo con un contenedor de pruebas el cual se llena con mezcal y se le inyecta aire para generar perlas; un sistema fotográfico con una o más cámaras rápidas para observar fenómenos que ocurren a altas velocidades; y un sistema de iluminación con una fuente de luz adecuada para lograr una visualización nítida. La configuración del arreglo experimental se muestra en el esquema de la Figura 2.1.

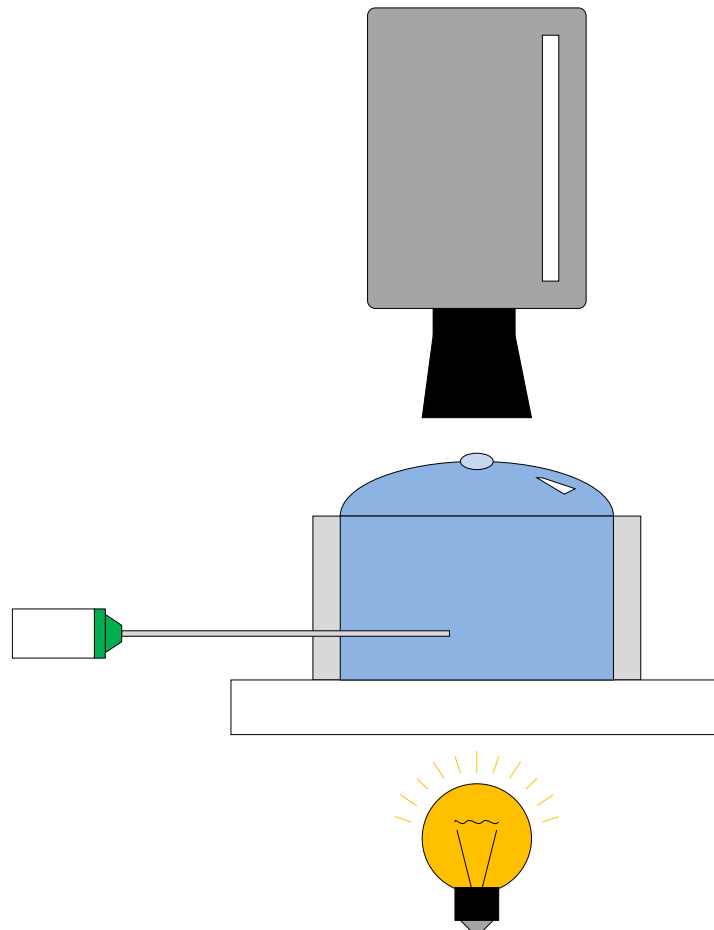


Figura 2.1: Esquema general del arreglo experimental: contenedor de pruebas, cámara rápida y fuente de iluminación. El esquema muestra una configuración vertical que es la más empleada durante la investigación

El procedimiento para ejecutar el experimento es el siguiente: el contenedor de pruebas, que es cilíndrico, se llena ligeramente por encima del borde con el fluido de estudio de modo que el líquido forme un menisco convexo que sobresale del contenedor. Seguido de esto, se inyecta una burbuja de aire al fluido con la intención de que suba por flotación a la superficie y se estacione en la parte más elevada del menisco. De este modo se controla la posición de la burbuja superficial para observarla detenidamente con una o varias cámaras rápidas iluminadas correctamente desde abajo con una lámpara de luz blanca constante de intensidad adecuada. Posteriormente, se analizan las imágenes grabadas lo que permite obtener información sobre el comportamiento de las burbujas.

2.1.2. Sistema de ensayo de pruebas

El sistema de ensayo de pruebas es el encargado de contener y propiciar la ejecución controlada del fenómeno físico de las perlas. Esto lo hace a través de un contenedor de pruebas y un sistema de inyección de aire. Debe permitir una libre observación a las cámaras rápidas y ser iluminado fácilmente por las fuentes de luz. El contenedor de pruebas experimentales es el componente del arreglo en el cuál se colocan las muestras líquidas que son sometidas a observación. El contenedor es el punto central del experimento en donde ocurrirá el fenómeno físico que concentrará la atención del resto de los componentes. Debe cumplir con las siguientes características:

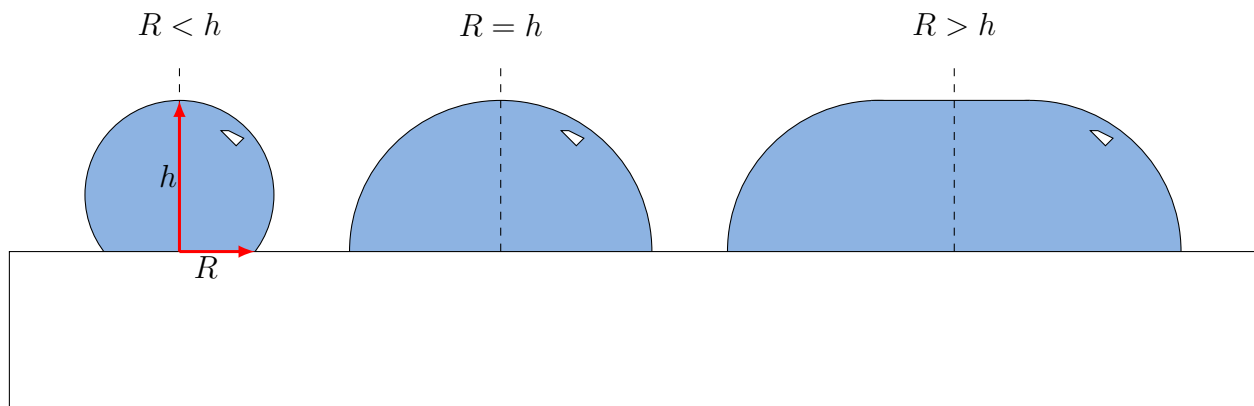


Figura 2.2: Geometría de una gota en contacto con un sustrato sólido

Forma cilíndrica: El contenedor debe tener un perfil cilíndrico para poder formar un menisco homogéneo por arriba del borde que facilite el control de la posición de las burbujas.

Base versátil: El cilindro debe estar montado sobre una base plana que brinde versatilidad para mover y sujetar el contenedor en distintas configuraciones y posiciones, de modo que se pueda lograr rápidamente centrar la imagen en la cámara y enfocar el objetivo.

Base transparente: El material de la base debe permitir suficiente paso de luz para poder iluminar la muestra desde abajo y lograr la visualización a altas velocidades con tiempos de exposición muy bajos.

Tamaño óptimo: El diámetro y la altura del cilindro deben ser suficientes para albergar el tamaño de burbuja deseado sin ser demasiado grandes ya que se requeriría un mayor volumen de muestras y por tanto el desperdicio de líquido sería mayor.

Material hidrofóbico: El material del contenedor de pruebas debe tener propiedades de superficie que propicien la formación del menisco convexo de fluido.

El diseño del contenedor debe tomar en cuenta las características básicas, los materiales disponibles para su construcción, así como la manufactura y ensamble de las piezas. A partir de estos tres principios se conceptualizó la manufactura del contenedor de la siguiente manera: Se parte de una lámina de acrílico transparente recortada a la medida sobre la cual se une con adhesivo una sección de tubo de PVC con el chaflán previamente recortado.

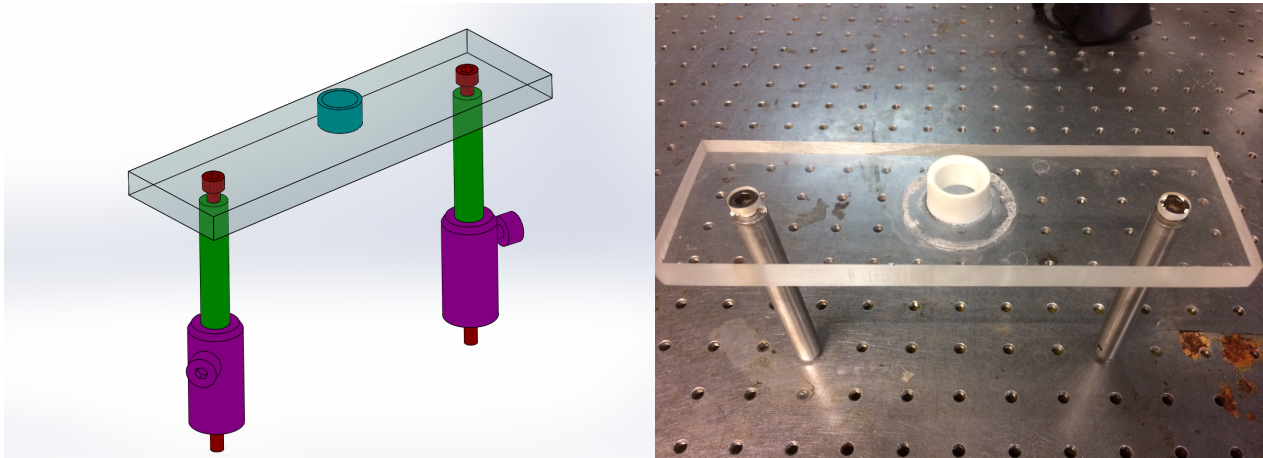


Figura 2.3: Diseño en CAD y prototipo del contenedor de pruebas líquido construido de PVC y acrílico

El primer dimensionamiento debe ser la altura y el diámetro del tubo, este último está sujeto a las medidas comerciales disponibles. La altura del tubo afecta el experimento en la medida en que se requiere más líquido para formar el menisco y por tanto genera más desperdicio, por lo que se buscará mantenerla al mínimo. El diámetro del tubo afecta la formación del menisco. Esta debe ser suficientemente grande para formar un menisco pseudoesférico estable pero no tan grande para que la forma se aplane y se pierda la ventaja de forma esférica como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.4: Bomba de jeringa para inyección de precisión de la marca World Precision Instruments, obtenida de [37]

La disponibilidad de tubos comerciales de PVC limitó la selección a un diámetro interno de $d = 16\text{mm}$. A partir de ello se seleccionó una altura del tubo de $h = 12\text{mm}$ de modo que sea manejable el contenedor, y se dimensionó la base transparente de acrílico empleando espesores comerciales. A la base se le agregaron dos perforaciones para sujetarla. La manufactura del contenedor requirió hacer los recortes de la base de acrílico así como las perforaciones para sujetarla, recortar el tubo de PVC a la altura indicada, y unir ambas piezas con adhesivo de cianoacrilato. El diseño del contenedor se hizo en CAD empleando una licencia estudiantil de la paquetería Solidworks 2016, una imagen se muestra en la Figura 2.3 a lado del contenedor terminado.

La generación de perlas se logra con un sistema de inyección de aire. El contenedor de líquidos puede tener una sección lateral con un tapón de material tipo hule que permita el paso de jeringas delgadas. El aire se inyecta a través de la jeringa empleando un controlador electrónico que permite variar el volumen inyectado en un lapso de tiempo. El diámetro de la jeringa de inyección también es una variable que afecta el tamaño de burbuja formado. Mientras más gruesa sea la jeringa mayor será el volumen de aire que se desprende de su punta. En la Figura 2.4 se muestra la bomba de jeringa empleada para controlar la inyección de aire en el fluido.

2.1.3. Sistema fotográfico

La cámara rápida es el equipo principal para realizar la visualización del experimento. El laboratorio de Reología del Instituto de Investigación de Materiales (IIM) cuenta con 3 cámaras *phantom* marca Dantec Dynamics modelo SpeedSense, que pueden tomar hasta 5,000 fps con una resolución de 1,000 x 1,000 píxeles durante periodos suficientemente largos para observar a las perlas. La mayor parte de las visualizaciones realizadas en esta investigación se llevaron a cabo con esta cámara. En la Figura 2.5 se muestra una de las cámaras empleadas.



Figura 2.5: Cámara rápida marca Dantec empleada en la grabación de perlas de mezcal

Las grabaciones se llevaron a cabo con distintos lentes *macro* que permiten enfocar objetos pequeños como las perlas y obtener una imagen ampliada de alta calidad. Principalmente se empleó un lente marca Rokinon de 100 mm con apertura máxima del diafragma de F/2.8. La distancia de enfoque mínima de este lente es de 30 cm, que corresponde también a la distancia a la cual se puede obtener la máxima ampliación del objeto observado. El arreglo experimental se diseño

para que las perlas a observar se encuentren a esta distancia respecto al sensor de la cámara. En la Figura 2.6 se muestran lentes empleados en la investigación.



Figura 2.6: Lentes macro empleados en la investigación. Imágenes obtenidas de [38] y [39].

La cámara debe posicionarse en la parte superior del contenedor de fluidos mirando hacia abajo y debe estar alineada con el centro del mismo. La altura de la cámara respecto al contenedor debe ser variable para ajustar los parámetros de fotografía, principalmente el enfoque. Además debe ser fácilmente montable y desmontable, debe estar sujeta firmemente de modo que el efecto de vibraciones se reduzca y debe tener facilidad para acceder a las conexiones de datos y corriente eléctrica. Se optó por usar perfiles rectangulares con carriles de desplazamiento para sujetar a la cámara. Los perfiles son parte del equipo del laboratorio, por lo que solamente se diseñaron las uniones y elementos sujetadores. Uno de los carriles empleados se muestra en la Figura 2.7.

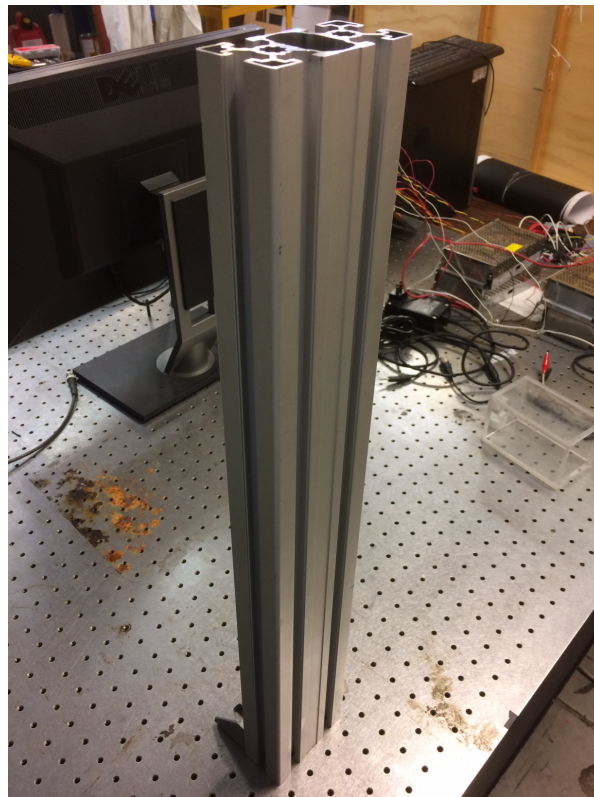


Figura 2.7: Carril de aluminio para sujetar las cámaras rápidas

2.1.4. Sistema de iluminación

Las fotografías de alta velocidad requieren de un tiempo de exposición corto para poder capturar fenómenos que ocurren muy rápido, por lo que la cantidad de luz que recibe el sensor de la cámara es pequeña. En fotografías *macro* de objetos pequeños es difícil obtener una profundidad de campo amplia ya que para ello se requiere tener un diafragma cerrado que entonces proporciona poca luz al sensor; al abrir el diafragma para obtener la mayor cantidad de luz posible se sacrifica profundidad de campo. En el caso de las perlas de mezcal se combinan ambos escenarios, se requiere capturar un objeto pequeño a velocidades altas, haciendo de la falta de luz el principal problema a resolver para obtener fotografías nítidas del fenómeno.

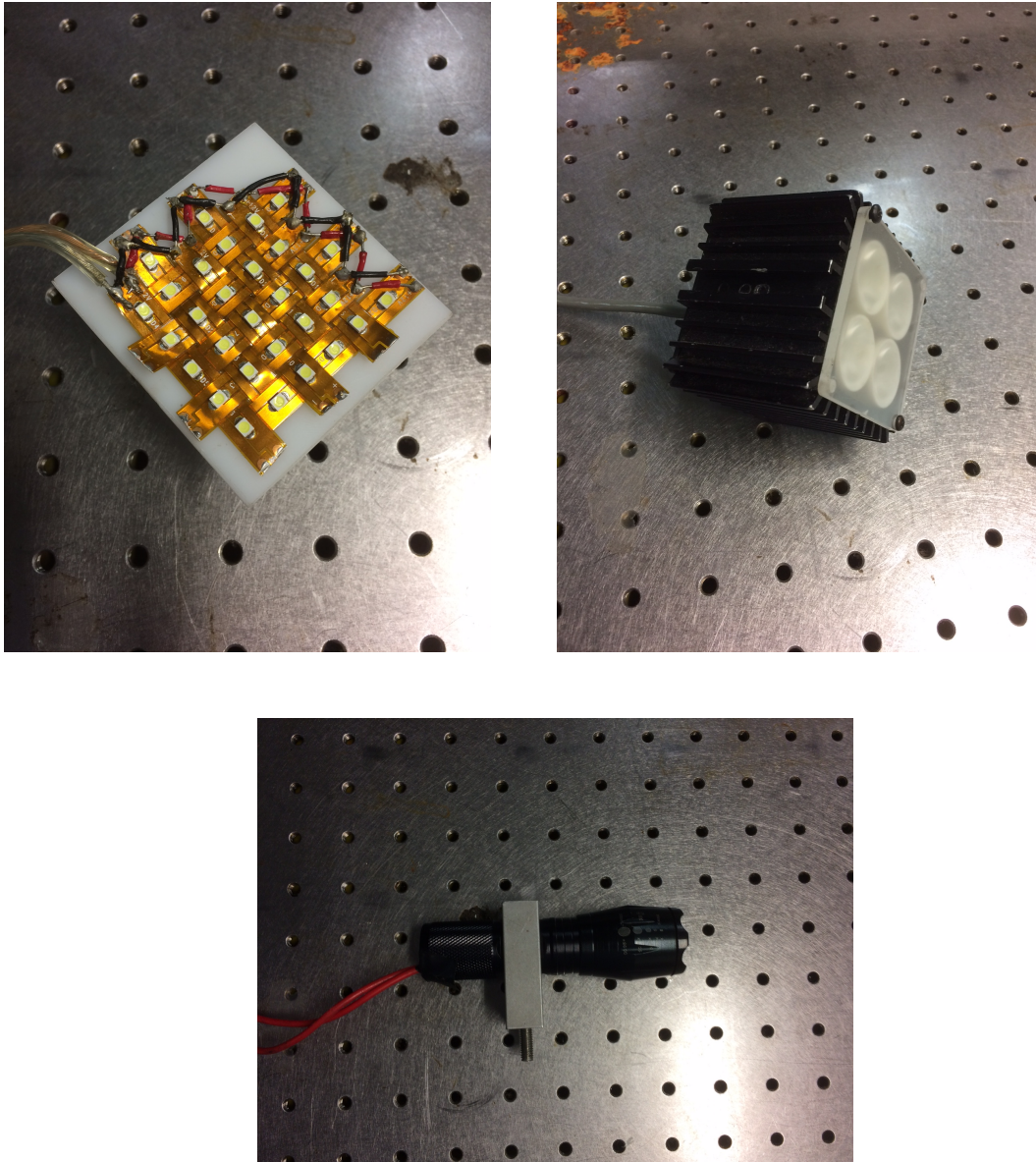


Figura 2.8: Lámparas de LEDs empleadas en la investigación

Para compensar la falta de luz, debida a la naturaleza del fenómeno por capturar, se requiere emplear una fuente artificial de iluminación potente colocada en una posición que haga llegar la luz al lente. El arreglo experimental requiere que el objeto a visualizar (la burbuja en el contenedor de

fluidos) se encuentre entre la cámara y la fuente de luz; se propone colocar una lámpara adecuada debajo del contenedor de fluidos iluminando hacia arriba. Con dicha fuente de luz y un balance correcto de los parámetros fotográficos (velocidad de captura, tiempo de exposición, apertura de diafragma, profundidad de campo, enfoque y distancia al objeto) se pueden capturar imágenes nítidas de la sombra que generan las burbujas al bloquear la luz de la fuente. El laboratorio cuenta con algunas lámparas que pueden cumplir el requisito de tamaño e intensidad de iluminación. En la Figura 2.8 se muestran algunas de las lámparas empleadas en la investigación, y en la Figura 2.9 se muestra el modelo en CAD de una de ellas.

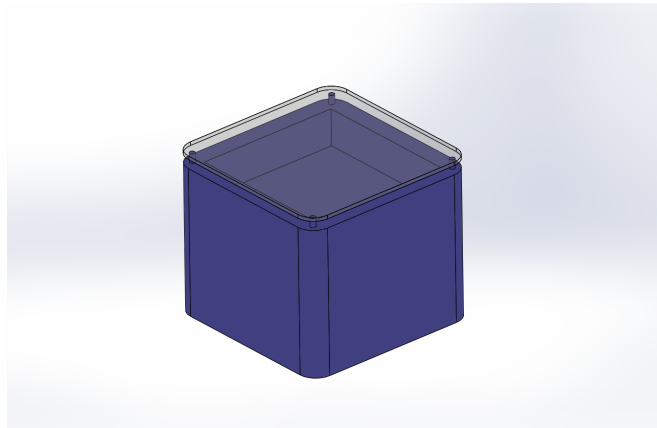


Figura 2.9: Dibujo en CAD de una de las lámparas empleadas en la investigación

2.1.5. Estructura de soporte y sistemas auxiliares

La estructura de soporte es el conjunto de piezas que permiten sostener a los componentes del experimento en su lugar. Es la parte del arreglo experimental que requiere un mayor trabajo porque debe ser diseñado y manufacturado a la medida. Su función es acoplar al resto de los sistemas en un solo arreglo que aproveche adecuadamente las ventajas de cada uno. La estructura de soporte debe resolver 3 necesidades básicas:

Configuración rígida: La estructura de soporte debe sostener a los componentes del arreglo en su posición precisa. Para lograrlo el soporte debe tener una rigidez estructural elevada que se puede obtener usando piezas metálicas de calibre grueso.

Versatilidad de configuración: Además de cumplir con las tolerancias de posición, la estructura debe permitir hacer modificaciones ligeras en la configuración de los componentes para ajustar la posición de las burbuja y lograr un enfoque. Para obtenerlo se pueden emplear mecanismos de ajuste de distancias y ángulos para sujetar los componentes como carriles y elevadores mecánicos.

Amortiguación de vibraciones: El sistema estructural debe ser capaz de absorber adecuadamente las vibraciones del ambiente para que no vibre la imagen de video. Para lograrlo se debe tomar en cuenta la masa de los componentes en cantiliver y asegurarse que el soporte cuente con suficiente rigidez para sostenerlo. Adicionalmente se pueden emplear gomas de caucho en la base de la estructura para amortiguar las vibraciones transmitidas por el ambiente.

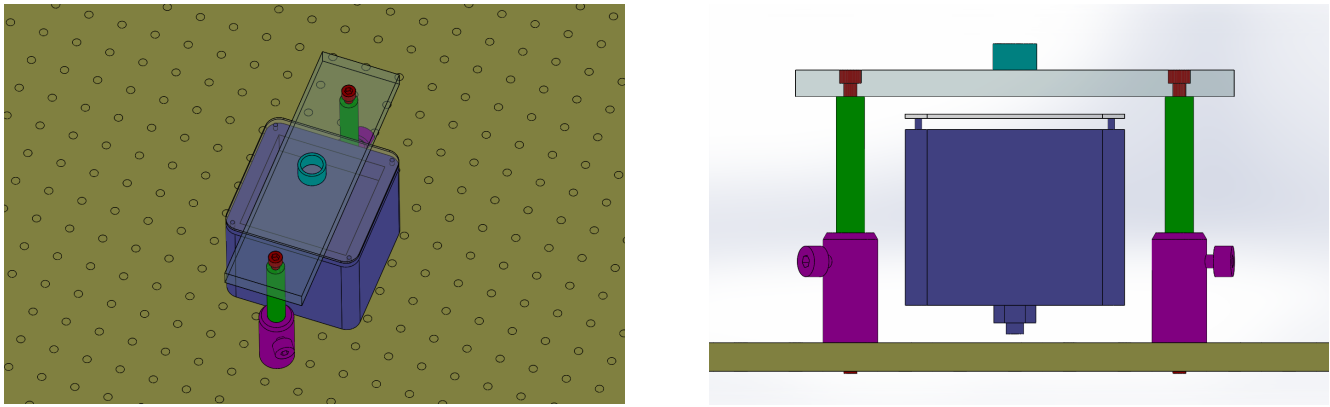


Figura 2.10: Diseño CAD del contenedor de muestras, la lámpara y la base

Se optó por usar como base del arreglo una mesa perforada (machueleada) de aluminio anodizado de calibre grueso (12.5mm) de 60×60 cm disponible en el laboratorio. Sobre dicha lámina se adaptaron los soportes individuales para las cámaras, el contenedor de fluidos y el sistema de iluminación empleando para ello una serie de sujeciones metálicas en ángulo fabricadas en el taller del IIM. Los sistemas auxiliares corresponden a los componentes secundarios necesarios para que el experimento funcione, por ejemplo: el cableado eléctrico y de datos, los elementos de sujeción, los controladores de la iluminación, las pantallas fotográficas, el enrutador de datos, la computadora y los programas para controlar las cámaras rápidas. El ensamblaje de todos los sistemas y componente es el último paso en la construcción del arreglo experimental.

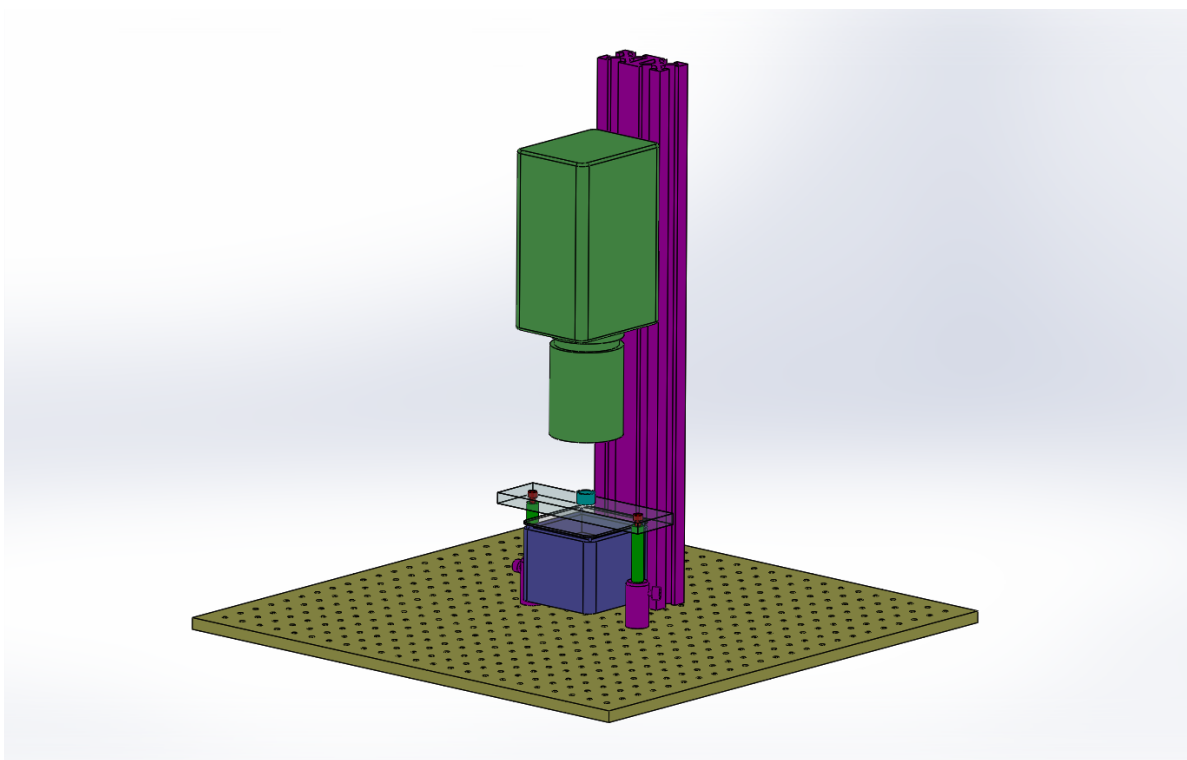


Figura 2.11: Primer diseño del arreglo experimental con una cámara rápida Dantec

El arreglo fue modelado en CAD como parte del proceso de diseño y manufactura, en la Figura 2.10 se muestran dos imágenes del contenedor de muestras y una lámpara de leds. En la Figura

2.11 y 2.12 se muestran imágenes de la primera versión en CAD del arreglo experimental completo y la versión final con dos cámaras rápidas marca Dantec.

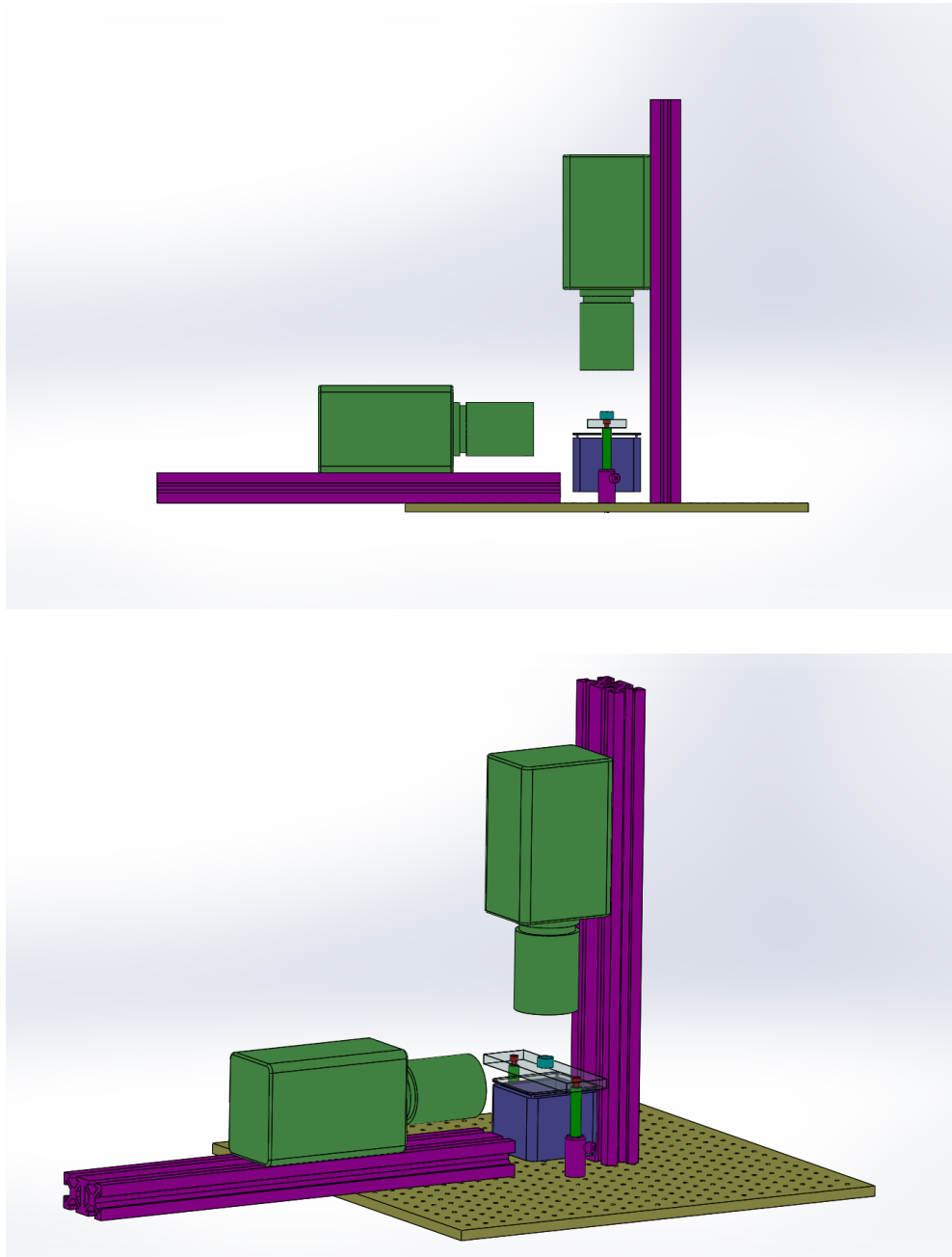


Figura 2.12: Arreglo experimental que emplea 2 cámaras Dantec para lograr una visualización con vista superior y lateral

2.2. Fluidos experimentales

Las bebidas destiladas como el mezcal tienen 2 componentes químicos principales que son agua y etanol, y muchos otros componentes secundarios. El contenido volumétrico de etanol se emplea como medida de la graduación alcohólica de la bebida; del contenido restante la mayor parte es

agua. Solamente en proporciones pequeñas los destilados contienen azúcares, alcoholes, precipitados, partículas contaminantes y otras moléculas orgánicas que le otorgan a la bebida propiedades organolépticas (color, aroma, sabor y textura) particulares. Por esta razón, las propiedades físicas de los mezcales están dictadas principalmente por el contenido de agua y etanol. Sin embargo, la presencia de otras sustancias puede afectar significativamente el comportamiento de las perlas.

En el transcurso de la investigación se sometieron a prueba diferentes mezcales originarios de pueblos de Oaxaca, para los cuales se obtuvieron previamente sus propiedades físicas y químicas. Además, se mezclaron mezcales con distintas sustancias puras como agua, etanol y glicerina en distintas proporciones y se sometieron a prueba. También se experimentó con fluidos de control. La información obtenida se estructuró en una base de datos de las propiedades y el origen de cada fluido. Posteriormente, cada sustancia se ensayó repetidas veces de modo que los datos de tiempo de vida y tamaño de las perlas formaran una muestra representativa, cuyos resultados se agregaron a la misma base de datos.

2.2.1. Mezcales empleados en la investigación

Los mezcales empleados en la investigación fueron adquiridos directamente con el productor en los palenques (fábricas de mezcal) durante un viaje por el estado de Oaxaca. El viaje se organizó con el objetivo de adquirir mezcales, observar de cerca el proceso de fabricación y conocer a los maestros mezcaleros. La ocasión se aprovechó para intercambiar puntos de vista sobre la bebida y su producción. Los mezcales adquiridos provienen de 3 fábricas en municipios distintos de la zona central del estado: Santiago Matatlán, San Luis Amatlán y San Baltazar Chichicápam. En las 3 fábricas se nos permitió el acceso al palenque, la degustación de sus productos y también la plática con los encargados de la producción. La Tabla 2.1 muestra una descripción del origen de los mezcales empleados en la investigación.

Muestra	Maestro mezcalero	Marca	Agave	Características	Ubicación
1	Miguel Sánchez Altamirano	Los Sánchez	Espadín	Jóven	San Baltazar Chichicápam
2	N/D	El Amate	Espadín	Jóven	San Luis Amatlán
3	Martín García Sernas	Los Peregrinos	Espadín	Punta	Santiago Matatlán
4	Martín García Sernas	Los Peregrinos	Espadín	Cuerpo	Santiago Matatlán
5	Martín García Sernas	Los Peregrinos	Espadín	Cola	Santiago Matatlán
6	Martín García Sernas	Los Peregrinos	Madre Cuishe	Jóven	Santiago Matatlán
7	Martín García Sernas	Los Peregrinos	Espadín	Reposado 1 año	Santiago Matatlán

Tabla 2.1: Mezcales oaxaqueños empleados en la investigación

Varias generaciones de la familia “Sánchez” han trabajado en el palenque que hoy produce diferentes tipos de mezcal para consumo doméstico y para exportación. Su mezcal *Espadín* es el de mayor producción y también el que venden con mayor facilidad. Se trata de un mezcal fuerte debido a su alto contenido de alcohol (55%), que tiene un color transparente azulado, con aroma a canela y polen. Su sabor es fuerte al paladar con toques de pera y canela y de textura ligeramente viscosa. El mezcal *Espadín* del palenque “El Amate” tiene un color transparente verdoso, aroma a cenizas y madera, sabor muy fuerte a agave con chile y ceniza, y una textura astringente pegajosa. La fábrica de la familia “García” se llama “Los Peregrinos” y se encuentran en el corazón del centro mundial del mezcal, Santiago Matatlán. Se trata de una fábrica comercialmente más activa que las otras dos pero que no deja de cumplir con los requisitos de producción artesanal. Cuentan con una amplia variedad de mezcales de diferentes agaves, diferentes tiempos de reposo o añejamiento e inclusive fabrican ensambles (mezcales fabricados con más de un tipo de agave a la vez). Su mezcal

Espadín tiene un color transparente naranja con aroma a hierbas frescas, sabor a tomillo y hierba y una textura ligera que persiste en el paladar. Su mezcals *Madre Cuishe* es de color transparente amarillento, con aromas frutales, sabor con toques de mango, tamarindo y ciruelas, y una textura viscosa y fría. Por otro lado, los “García” también fabrican un mezcals reposado en barricas de madera de un año. Este tiene un color dorado transparente, un aroma a madera joven, sabor ligero a madera y hierbas, y una textura muy sutil.

2.2.2. Composición química del mezcals

La composición química del mezcals ha sido estudiado previamente por [40] quienes emplearon una técnica de microextracción en fase sólida (SPME-GC-MS) para identificar los compuestos contenidos en 5 tipos de mezcales comerciales. Identificaron 37 compuestos distintos de los cuales 9 se encuentran en cantidades relativamente elevadas para ser clasificados como compuestos principales: acetato de etilo, metanol, etanol, 2-butanol, n-propanol, 2-metil-propanol, 2/3-metil-1-butanol, etil-2-hidroxi-propanoato y ácido acético. De los compuestos principales 6 son alcoholes saturados. En los compuestos secundarios encontraron otros alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos orgánicos, entre otros. En la Figura 2.13, en la Tabla 2.2 y en el Apéndice 1 se muestran los resultados obtenidos en su investigación.

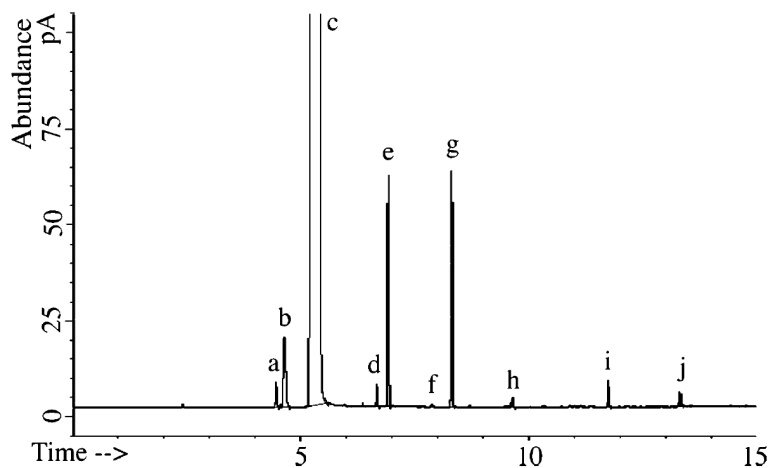


Figura 2.13: Cromatograma de componentes químicos principales encontrados en una muestra de mezcals reposado con gusano por [40]: (a) acetato de etilo, (b) metanol, (c) etanol, (d) 2-butanol, (e) n-propanol, (f) 2-metil-propanol, (g) control interno, (h) 2/3-metil-1-butanol, (i) etil-2-hidroxi-propanoato y (j) ácido acético

En un estudio similar, [41] estudian la variación de compuestos químicos en mezcales fabricados con distintas especies de agave. Los resultados que presentan indican una alta tasa de variación para compuestos como metanol, alcoholes superiores, ácido acético y acetato de etilo. Dichas variaciones se pueden deber a diferencias en el método de producción. En otros compuestos encontraron poca variación, que se puede deber a las similitudes de las especies de agave. En su estudio identifican compuestos propios de cada especie de agave que pueden ser empleados como marcadores para identificar la presencia de un agave u otro en un mezcals.

Compuesto	Blanco (n=4)	Blanco con gusano (n=3)	Reposado (n=3)	Reposado con gusano (n=3)	Añejo (n=3)
Acetato de etilo	182±11	103±6	150±12	113±5	107±10
Metanol	816±72	703±89	891±46	881±38	834±76
Etanol ^a	42±1	39±2	39±2	42±0	42±5
2-butanol	61±17	54±19	66±20	56±6	ND
n-propanol	700±108	728±18	738±87	615±62	388±26
2-metil-2-propanol	17±44	ND	ND	37±4	48±7
2/3-metil-1-butanol	30±7	26±10	ND	17±4	98±19
Etil-2-hidroxiopropanoato	105±13	101±4	117±15	109±17	192±32
Ácido acético	169±51	224±48	207±27	133±5	219±9
Alcoholes con 3 o más carbonos	809±122	808±32	843±64	876±52	533±51

Tabla 2.2: Concentración promedio (mg/L) \pm desviación estándar de los compuestos principales encontrados en diferentes mezcales por [40]. n=número de marcas de mezcal que forman la muestra.
^a Unidades de concentración en %vol/vol

2.2.3. Propiedades físicas de los fluidos experimentales

Durante la investigación se corrieron pruebas con 6 series de fluidos experimentales: mezcales, sustancias puras, mezcal adulterado, mezcal con surfactantes diluidos, mezcla agua-etanol y mezcla agua-glicerina. En total se sometieron a prueba 40 fluidos distintos, con los cuales se generaron y registraron el diámetro y tiempo de vida de 1,007 burbujas superficiales. Para cada uno de los fluidos ensayados se obtuvieron al menos las propiedades físicas siguientes: densidad, viscosidad, tensión superficial y contenido volumétrico de etanol. En los casos donde es viable, como las sustancias puras y las mezclas agua-etanol y agua-glicerina, las propiedades se obtuvieron de tablas publicadas por otros autores, por ejemplo [42, 43]. Para el resto de los fluidos las propiedades se obtuvieron con mediciones en el laboratorio cuando posible, y a partir de estimaciones basadas en los datos disponibles cuando no. En el Apéndice 2 se incluye una tabla con todos los fluidos empleados y sus propiedades físicas, y en la Tabla 2.3 se muestra un resumen.

Fluido	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad μ (mPa · s)	Tensión superficial σ (mN/m)	Contenido de etanol % vol. (%)
Agua	997	1.00	72.5	0 %
Etanol	791	1.19	22.2	100 %
Glicerina	1,261	900.00	63.4	0 %
Mezcal “Jesús Sánchez” Espadín	919	3.08	30.6	55 %
Mezcal “El Amate” Espadín	914	3.08	28.7	48 %
Punta “García” Espadín	927	3.08	29.6	58 %
Cuerpo “García” Espadín	913	3.08	29.2	41 %
Cola “García” Espadín	933	3.08	32.7	31 %
Mezcal “García” Madre Cuishe	928	3.08	29.9	52 %
Reposado “García” Espadín	949	3.08	34.0	39 %
Mezcal adulterado con agua y etanol	842-965	1.83-3.04	25.1-41.6	22 %-88 %
Mezclas agua-etanol	852-990	1.09-2.79	27.5-66.8	0 %-100 %

Tabla 2.3: Propiedades físicas de los mezcales

En el momento en que se llevó a cabo el presente trabajo, el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM contaba con un acceso limitado a equipos

adecuados para medir viscosidad (viscosímetro o reómetro). Por otro lado, no existe bibliografía que documente las propiedades reológicas del mezcal, y, a diferencia de la densidad, lograr una medición precisa de la viscosidad es complejo si no se cuenta con el equipo adecuado. La viscosidad solamente se pudo medir para el mezcal “Los Sánchez” *Espadín* en un reómetro marca Brookfield modelo DV-III como el que se muestra en la Figura 2.14, para el cual se obtuvo un valor de viscosidad dinámica de $3.08\text{mPa}\cdot\text{s}$. Se tomó este valor para los otros 6 mezcales, y para el resto de los fluidos la viscosidad se obtuvo ajustando los datos de contenido de etanol a una función de interpolación basada en el trabajo de [42]. En dicho trabajo se muestra que la viscosidad dinámica en mezclas de agua-etanol (a temperatura ambiente) es una función de la proporción de la mezcla que tiene forma convexa y que alcanza un máximo cuando el contenido de etanol es cercano al 50 %. Empleando el contenido de alcohol de cada fluido, el valor de la viscosidad de los componentes que lo conforman y la forma de la función citada se obtuvo un valor de viscosidad dinámica para cada fluido. Consideramos que el ajuste de los datos es razonable ya que el mezcal es principalmente una mezcla de agua con etanol. La tensión superficial de los fluidos se midió empleando un tensiómetro DynaTester+ de la marca SITA, mostrado en la Figura 2.14, que emplea el *método de presión de burbuja*.



Figura 2.14: Reómetro Brookfield DV-III [44] y Tensiómetro SITA DynaTester+ [45]

La densidad de los fluidos se midió sencillamente con una balanza científica y probetas de laboratorio. El contenido volumétrico de etanol se obtuvo empleando tablas alcoholométricas de

la Organización Internacional de Metrología Legal [46]. Dichas tablas permiten obtener un valor aproximado del contenido de etanol en un líquido en función de su temperatura y densidad. Se trata de un método de medición indirecto que ofrece en cambio una lectura fácil, práctica y económica, y que durante muchos años ha sido el único método accesible para muchas fábricas. Por ello su uso es común entre los productores mezcaleros artesanales.

Capítulo 3

Análisis de resultados

Este capítulo contiene los resultados de la experimentación con distintos mezcales y combinaciones de otras sustancias. También contiene el análisis de datos y la interpretación de los resultados obtenidos. El capítulo está dividido en secciones que estudian un aspecto particular del fenómeno a través de una serie de experimentos que varían alguna propiedad del sistema y su posterior interpretación. Se plantean hipótesis que pueden dar explicación a los resultados observados.

3.1. Verificación del fenómeno

La primera serie de experimentos que se llevó a cabo es una verificación de la existencia del fenómeno de las perlas de mezcal. Se eligió el mezcal “Los Sánchez” *Espadín* para emplearlo como muestra de control y se empleó agua destilada y etanol puro (desnaturalizado al 99.97%) para mezclarlo. El experimento consiste en colocar una muestra de fluido en el contenedor de pruebas, crear una perla inyectando aire y medir el tiempo de vida T_p y el diámetro D a través del análisis de imágenes grabadas con las cámaras rápidas. Se hizo una serie de experimentos para el mezcal de control y después se repitió la medición para el mezcal adulterado con etanol y agua para aumentar o reducir el contenido total de alcohol. La Figura 3.1 es una muestra de las imágenes capturadas.

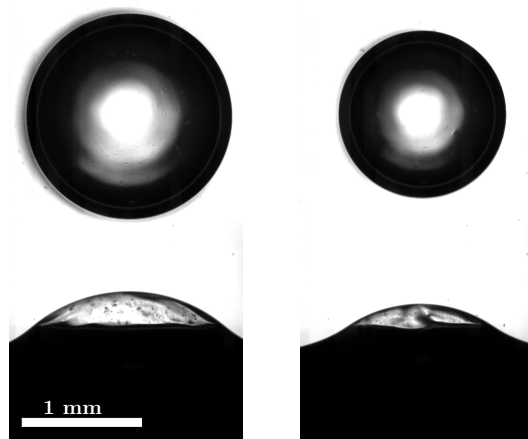


Figura 3.1: Imágenes de 2 perlas de mezcal “Los Sánchez” *Espadín* de diferentes tamaños grabadas con 2 cámaras rápidas simultáneas a 6,400 cuadros por segundo. La perla de la izquierda mide 1.9mm de diámetro y la de la derecha de 1.3mm. La vista superior permite medir el diámetro con mayor precisión, mientras que la vista lateral muestra mejor la geometría de la perla.

Al agregar agua destilada al mezcal se reduce la proporción de etanol en la mezcla, simulando un mezcal con menor contenido alcohólico. Al agregar etanol puro se simula un mezcal con mayor contenido de alcohol. Con ello se puede analizar fácilmente la manera en que el contenido alcohólico afecta el tiempo de vida de las perlas para un mismo mezcal. Este método es mejor que emplear diferentes mezcales con graduaciones alcohólicas distintas porque evita la alteración de los resultados debido a la variación de sustancias químicas en los mezcales. Las gráficas de la Figura 3.2 muestran los resultados de esta primera serie de experimentos.

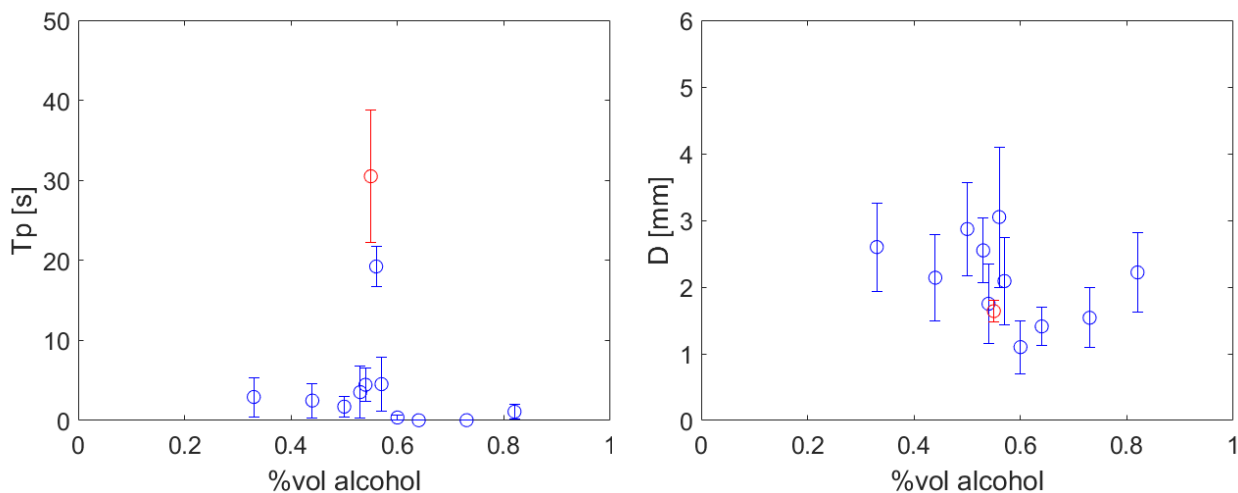


Figura 3.2: Gráficas que muestran los resultados del experimento de verificación de la existencia del fenómeno de las perlas de mezcal. La gráfica de la izquierda muestra el tiempo de vida, T_p , en segundos contra el contenido total de etanol en porcentaje volumétrico; la gráfica de la derecha muestra los respectivos diámetros, D , de las perlas en milímetros. En ambas gráficas se muestra el mezcal “Los Sánchez” Espadín en rojo y sus mezclas diluidas en azul. Los resultados de T_p indican que el fenómeno es real al mostrar que el mezcal tiene el tiempo de vida más grande. El D no muestra tendencias significativas.

3.1.1. Interpretación de los resultados

Los resultados de la Figura 3.2 muestran que el mezcal no adulterado tiene un tiempo de vida más largo que sus combinaciones con agua y etanol. Además muestran que el máximo es un pico notable que se alcanza en volúmenes de etanol cercanos al 50%. Esto demuestra que existe una relación directa entre el contenido de alcohol del mezcal y el tiempo de vida de las perlas, y que la prueba descubierta de forma empírica por los maestros mezcaleros es acertada. Llama la atención que la función presente un pico máximo a la mitad en lugar de un crecimiento continuo. La Figura 3.2 muestra que el diámetro de las perlas no afecta la medición del tiempo de vida.

Una posible explicación de los tiempos de vida encontrados es que pequeñas variaciones en la composición del mezcal afectan drásticamente sus propiedades físicas (densidad, viscosidad y tensión superficial), lo que a su vez influye en el comportamiento de las perlas. Es interesante notar que la viscosidad μ de las mezclas de agua con etanol no es monotónica: las propiedades físicas de mezclas agua-etanol en distintas proporciones ha sido reportada por [42] y se muestran en la Figura 3.3.

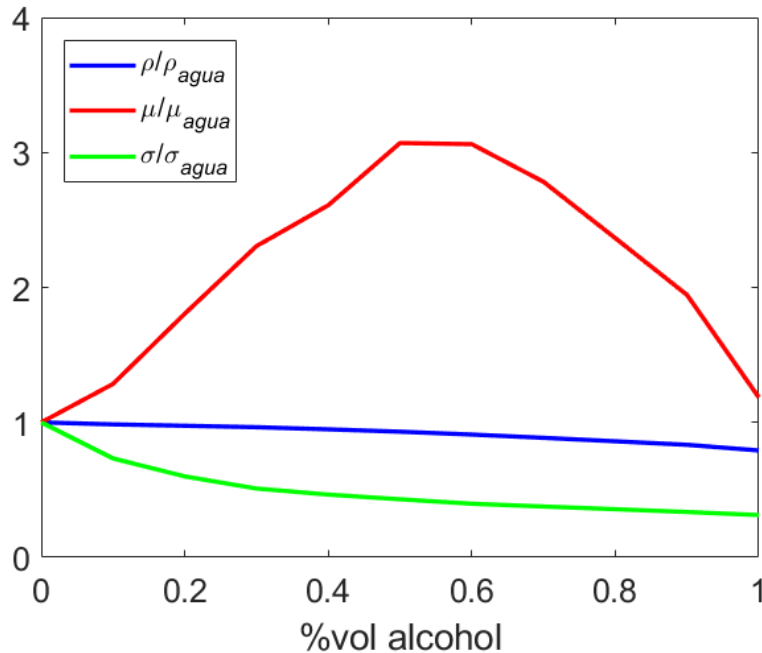


Figura 3.3: Propiedades físicas de mezclas agua-etanol en función de la proporción de mezcla reportadas por [42]. La función color rojo es la viscosidad, la azul la densidad y la verde la tensión superficial. Las funciones muestran valores relativos a las propiedades del agua. Llama la atención el comportamiento no monótono de la viscosidad.

El resultado reportado muestra que la viscosidad de la mezcla agua-etanol no es lineal, sino que tiene forma de parábola invertida y alcanza un máximo cuando el contenido de etanol es cercano al 50%. Esto coincide con los resultados del experimento para el cual el mayor T_p se alcanza en mezclas con etanol cercano al 50%. Además, se sabe que la composición química del mezcal es principalmente agua con etanol. Dada toda esta evidencia podemos hipotetizar que la viscosidad (propiedad hidrodinámica) que el mezcal alcanza cuando tiene un contenido alcohólico cercano al 50% explica el prolongado T_p de las perlas. Esta idea se sustentará en la siguiente sección.

3.2. Experimentos con mezclas agua-etanol

Se llevo a cabo una segunda serie de experimentos para comprobar la validez de la hipótesis anterior. Ésta consistió en obtener el T_p y el D para distintas mezclas de agua con etanol puros. Los resultados se pueden comparar directamente con la gráfica de la Figura 3.2 para buscar una relación directa entre el tiempo de vida y las propiedades físicas.

Al realizar el mismo experimento para mezclas de agua con etanol se espera encontrar un pico de tiempo de vida máximo similar al encontrado en el mezcal. De ser así se refuerza la hipótesis hidrodinámica y se puede generalizar para muchas bebidas alcohólicas. En caso de que no exista el pico se comprueba que el mecanismo que prolonga la vida de las perlas depende de otras sustancias presentes en el mezcal, y que su relación con el contenido alcohólico es más compleja de los hipotizado. Los resultados se muestran en la Figura 3.4.

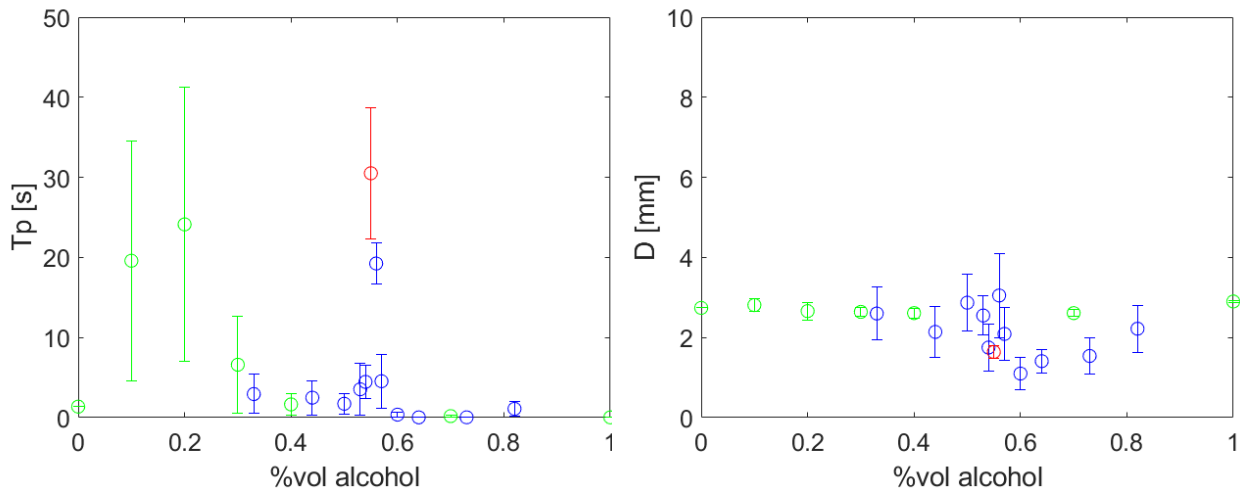


Figura 3.4: Gráficas de resultados de experimentos con mezclas agua-etanol en verde y resultados anteriores. Se observa que el tiempo de vida tiene un máximo de magnitud similar al mezcal pero desfasado en el eje horizontal.

3.2.1. Interpretación de los resultados

Los datos muestran que el tiempo de vida de las mezclas de agua con etanol también varía según su composición y que alcanza un máximo cuando el contenido de alcohol por volumen es cercano al 20% a diferencia del mezcal que presenta su máximo cercano al 50%. A pesar del desplazamiento, el T_p máximo es del mismo orden que el del mezcal, rondando los 30 segundos. El resultado es en parte el esperado porque se comprueba la existencia de un pico en el tiempo de vida que se puede generalizar para todas las mezclas agua-etanol, sin embargo, no se esperaba el desplazamiento del pico en el eje horizontal. El desplazamiento le resta importancia a una comparación directa con la gráfica de propiedades físicas, e indica que la hipótesis hidrodinámica es cierta pero no es el único mecanismo del cual depende el tiempo de vida de las perlas. Por tanto, el mecanismo que prolonga la vida de las perlas es más complejo de los esperado ya que depende tanto del contenido alcohólico como de la presencia de otras sustancias en el mezcal.

El diámetro promedio de las mezclas de agua con etanol es similar al del mezcal con una diferencia pequeña en concentraciones mayores al 50%. El diámetro de las burbujas de agua pura es significativamente más grande que el resto; éstas se asemejan mucho a las burbujas de etanol puro. Es posible que la variación en el diámetro de las burbujas explique el desplazamiento de la curva del tiempo de vida.

3.3. Experimentos variando la proporción de otros componentes

La tercera serie de experimentos tiene como objetivo comprobar la hipótesis de que el mezcal contiene agentes químicos en cantidades pequeñas que afectan el tiempo de vida de las perlas. Para ello se preparan muestras de mezcal con agentes químicos diluidos. A estas mezclas se les agregó etanol puro para aumentar el volumen de alcohol y después se les agregó agua destilada para regresar el volumen alcohol a la cantidad original. De esta manera disminuye la cantidad relativa de químicos en la mezcla sin alterar el contenido alcohólico, haciendo la serie comparable

con las anteriores. Dicha técnica está inspirada en el trabajo de Davidson [47] y Dickinson [48].

Al agregar simultáneamente agua y etanol al mezcal, manteniendo el volumen proporcional de etanol, se diluye el contenido de cualquier otra sustancia presente en el mezcal. Se cree que estos agentes químicos contenidos en el mezcal ayudan a prolongar el tiempo de vida de las perlas, por lo que se espera que en esta tercera serie de experimentos el tiempo de vida de las perlas se reduzca considerablemente. En la Figura 3.5 se muestran los resultados para una serie de experimentos en los cuáles el mezcal se diluyó a la mitad en volumen con la cantidad indicada de etanol y agua; por tanto, los resultados reflejan el comportamiento de las perlas cuando los agentes químicos se reducen a la mitad volumétrica.

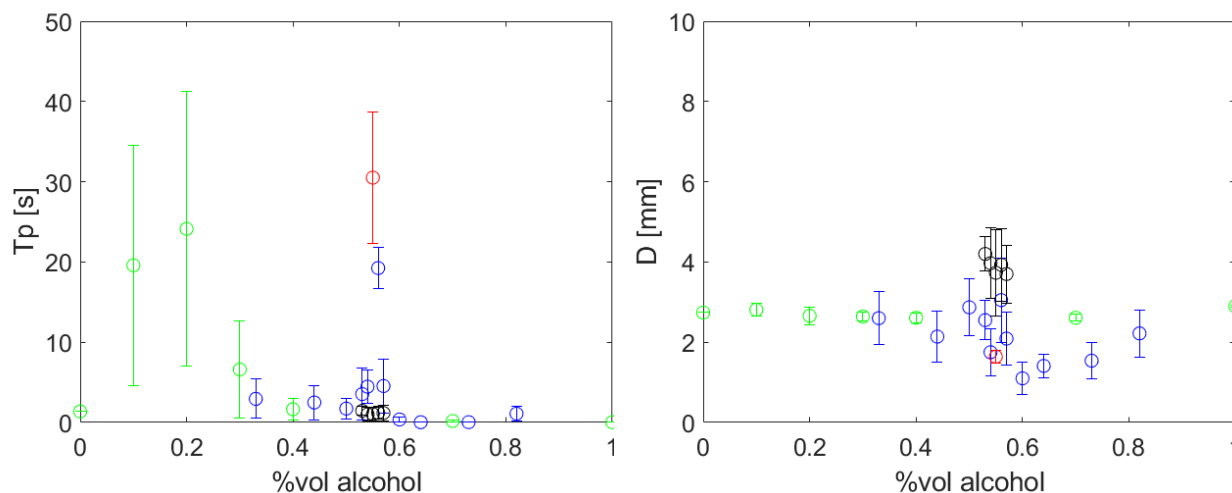


Figura 3.5: Gráficas de resultados de experimentos con mezcales con agentes químicos diluidos al 50 % en volumen en color negro y resultados anteriores. Se observa que el T_p cae drásticamente como era esperado.

3.3.1. Interpretación de resultados

Los resultados de la Figura 3.5 muestran que el tiempo de vida de las perlas es drásticamente menor si se reduce la presencia de agentes químicos en el mezcal. Por ejemplo, el tiempo de vida para un contenido alcohólico de 55 % pasó de 30 segundos a 1 segundo, reduciéndose 30 veces. Resalta que el T_p varía muy poco entre las muestras de esta serie y no presenta picos ni máximos. Por otro lado el diámetro promedio de las perlas aumentó significativamente respecto a las series anteriores.

Una explicación a este resultado puede ser que el mezcal contiene pequeñas cantidades de sustancias que actúan como surfactantes cambiando su tensión superficial, lo que a su vez influye en el comportamiento de las perlas. El cambio de la tensión superficial le brindaría mayor rigidez a las película delgada de líquido que da forma a las burbujas superficiales extendiendo su tiempo de vida. Los resultados concuerdan con esta hipótesis demostrando experimentalmente que al reducir la cantidad de surfactantes presentes en el mezcal se reduce significativamente el tiempo de vida de las perlas. Para justificar definitivamente la hipótesis es necesario ampliar el alcance de los experimentos incluyendo mezcales diluidos en menor proporción.

3.4. Efectos de Marangoni

En el transcurso del análisis de los videos de alta velocidad obtenidos en los experimentos anteriores se encontró un fenómeno no esperado que se observa en la superficie de las paredes de las perlas. Se encontró que en ciertas burbujas existe un flujo de líquido que asciende por la pared delgada que la forma. El flujo observado es una sucesión de ondas que nacen en un punto de la base de la burbuja, avanzan hacia arriba extendiéndose a lo ancho y al llegar a cierta altura pierden velocidad y descienden de nuevo por la pared. Una onda nace tras otra sin ningún patrón evidente, sino con un comportamiento complejo e irregular, amontonándose por momentos e interfiriendo unas con otras.

Al observar este fenómeno en las burbujas de mezcal y otras mezclas se concluyó que en la pared delgada existen fuerzas de tensión superficial debidas a la diferencia de propiedades físicas del agua y el etanol y de sus índices de evaporación. Este comportamiento superficial es conocido como Efecto de Marangoni [49]. Se cree que dicho fenómeno puede afectar el tiempo de vida de las perlas al evitar el drenado de sus paredes. La evidencia documentada permite suponer que el flujo de Marangoni transporta líquido del contenedor a la parte superior de la burbuja retrasando de esta manera el adelgazamiento de la pared delgada y aumentando su tiempo de vida.

3.4.1. Flujos de Marangoni: introducción al fenómeno físico

Un flujo de Marangoni que se observa con facilidad es el llamado *piernas de vino* (o lágrimas del vino) que se puede observar en las paredes de una copa de cristal mojadas con una película delgada de vino: al poco tiempo la película comienza a volverse gruesa y a acumular vino en su parte más elevada. La acumulación continúa hasta que se forman gotas gruesas que se desprenden por acción de su propio peso y caen por la pared deslizándose en forma semejante a lágrimas.



Figura 3.6: Fotografías de una copa de vino que presenta el fenómeno de las piernas del vino en vista superior y lateral, tomadas de [50] y [51]

El fenómeno fue reportado por primera vez por Thomson en 1855 y después por Marangoni en 1865 quienes soportaron la hipótesis de que el flujo es resultado de variaciones en la tensión superficial del líquido [52]. Thomson explica que dichas variaciones se deben a gradientes de concentración de etanol en el vino. El origen de los gradientes es resultado de la diferencia en las tasas de evaporación del agua y el etanol (principales compuestos del vino) y la geometría de la película delgada: a lo largo de toda la superficie de vino que está en contacto con el aire ocurre evaporación de sus compuestos volátiles, principalmente del etanol. A diferencia del resto del vino en la copa, la película delgada tiene una superficie en contacto con la atmósfera relativamente

grande en comparación a su volumen, por lo que no cuenta con un depósito de etanol que migre a la superficie para reponer el evaporado. Por tanto, al poco tiempo de formada la película, el etanol disminuye localmente su concentración de forma significativa mientras que el agua la aumenta, y, debido a que el agua tiene una mayor tensión superficial, esta propiedad aumenta localmente. En este instante del ciclo del fenómeno, existe un gradiente de tensión superficial entre la película delgada y el depósito de vino en la copa. El gradiente de tensión superficial genera esfuerzos en la superficie libre del vino, conocidos como esfuerzos de Marangoni. El vino se deforma continuamente en respuesta a los esfuerzos de Marangoni y se genera un flujo en la superficie que va de la zona de baja tensión superficial a la zona de alta tensión superficial, es decir, del depósito de vino a las paredes de la copa en sentido opuesto a la atracción de la gravedad. El vino arrastrado por el flujo se deposita en la película a una altura en la cual encuentra equilibrio dinámico, y comienza a acumularse formando una banda semi-homogénea en toda la circunferencia de la copa. Al inicio, el peso del vino acumulado en la banda es pequeño comparado con las fuerzas de Marangoni que mueven el flujo por lo que éste siempre es ascendente. Sin embargo, el peso del fluido cobra una importancia mayor conforme aumenta el volumen de vino en la banda. Cuando esto sucede la banda semi-homogénea se vuelve inestable y se divide lentamente en gotas que continúan creciendo. La inestabilidad de las gotas aumenta junto con su volumen hasta alcanzar un punto de ruptura en donde el peso de la gota vence a las demás fuerzas y ésta comienza a descender por la pared de la copa hacia el depósito de vino. La Figura 3.7 esquematiza el proceso del fenómeno.

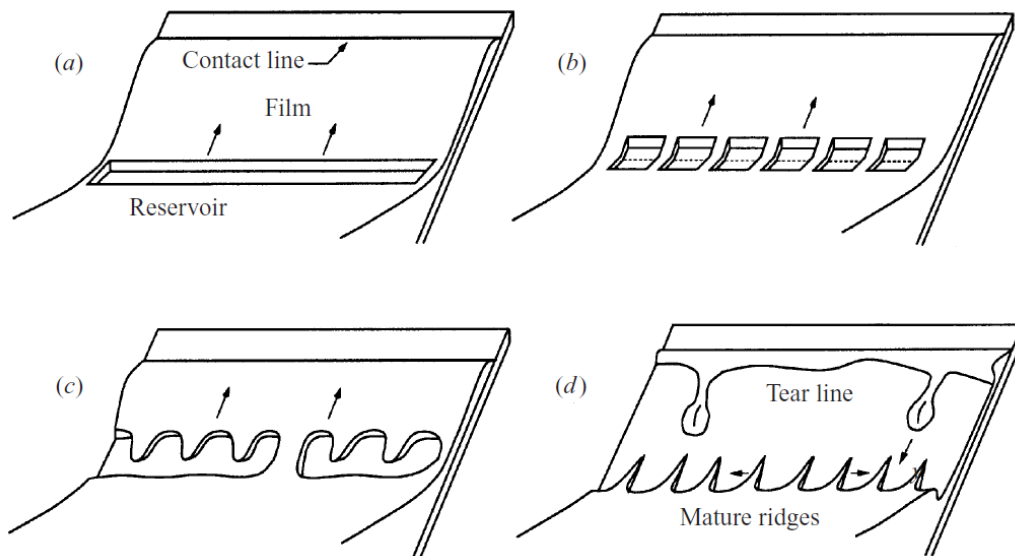


Figura 3.7: Esquema de la fase transitoria de las piernas del vino , tomada de [52]

3.4.2. Marangoni en mezcal

El nombre *piernas de vino* hace referencia al fluido en donde se descubrió y se observa comúnmente el fenómeno, aunque que no es exclusivo de esta bebida. Se ha documentado el mismo fenómeno en otras bebidas alcohólicas y en otras mezclas líquidas a base de diferentes compuestos. Sin embargo, no se encontraron referencias que documenten la presencia de piernas de vino en mezcal.

Hosoi et al. [52] y Bush [49] han investigado la manera en que la geometría del contenedor afecta el desarrollo del fenómeno. En acorde con los resultados que reportan, es viable suponer que el

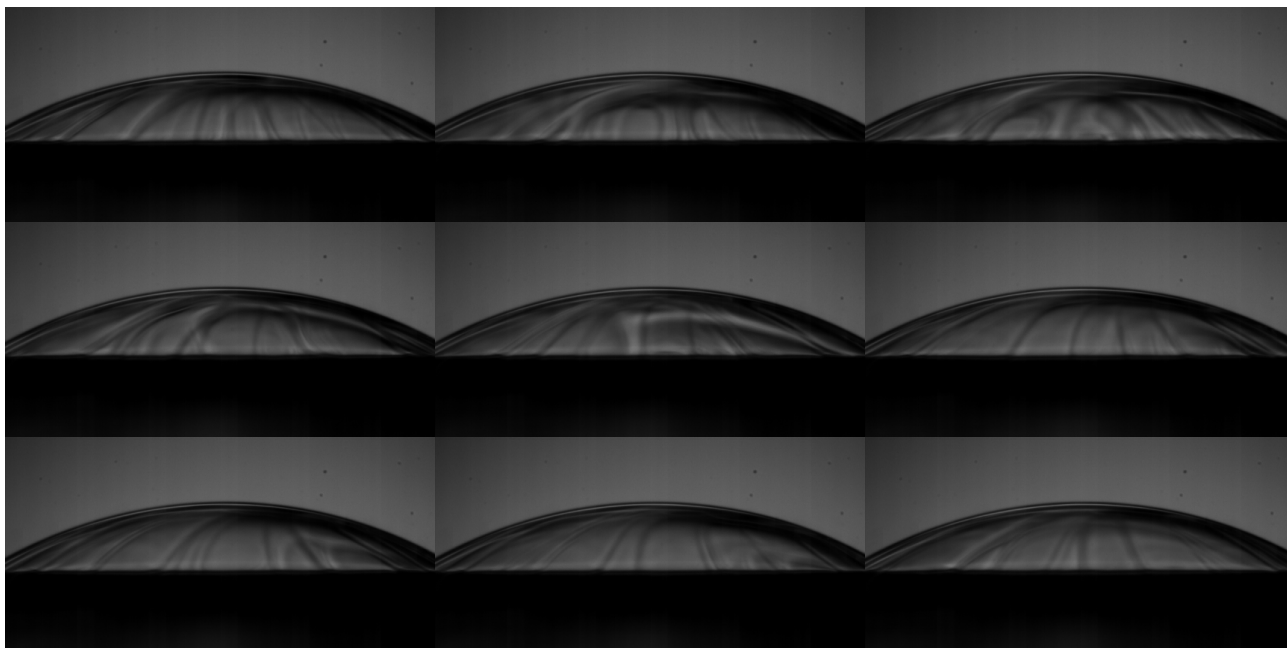


Figura 3.8: Secuencia de fotografías de una burbuja de mezcal espadín *El Amate* que presenta un alto nivel de flujo superficial en su pared. La secuencia fue tomada a 3,200fps; el intervalo entre imágenes es de 20ms. El diámetro aproximado de la burbuja es de 3.2mm

fenómeno observado en las perlas de mezcal es análogo a las piernas de vino pero en lugar de ocurrir en las paredes de una copa ocurre sobre las paredes de una burbujas pseudo-esférica: se trata de un flujo de Marangoni impulsado por gradientes de tensión superficial debidos a la evaporación del etanol contenido en el mezcal. En la Figura 3.8 se muestra una secuencia observada en perlas de mezcal *El Amate* “Espadín” donde es evidente la presencia de Marangoni en la paredes.

3.5. Resultados comparados con otras bebidas

El tiempo de vida de burbujas en whisky ha sido estudiado previamente por Davidson [47] y Dickinson [48]. En ambos trabajos se realizan experimentos para medir el tiempo de vida de la espuma que se forma al agitar un contenedor con whisky de distintos grados de alcohol obtenidos por dilución con etanol puro y agua destilada. Ambos autores concluyen que el tiempo de vida de las espumas tienen un máximo cuando el contenido de alcohol es cercano al 50 % en volumen. En la Figura 3.9 se comparan los resultados de Davidson con los obtenidos para burbujas individuales en mezcal.

Los resultados de Davidson reportados en la Figura anterior demuestran que el tiempo de vida prolongado de burbujas superficiales no es exclusivo del mezcal, sino que otras bebidas alcohólicas también lo presentan. El pico máximo que logra el whisky es menor al del mezcal puro pero se encuentran en la misma escala de magnitud. El pico se encuentra desfasado respecto al del mezcal ya que alcanza su máximo en un contenido de alcohol menor.

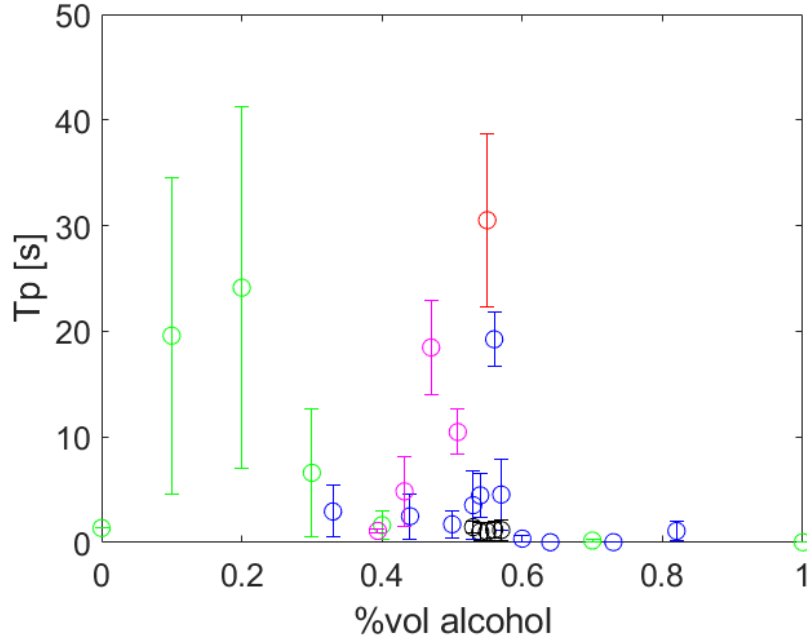


Figura 3.9: Resultados de tiempo de vida para espumas de whisky reportados por [47] en color magenta, comparados con los resultados de mezcal. Al igual que las perlas de mezcal, la espuma de whisky presenta un máximo en tiempo de vida para un contenido de etanol similar.

3.6. Análisis dimensional

Hasta el momento la interpretación de resultados ha ignorado la relación entre el tamaño de las perlas y su tiempo de vida. Es posible observar para un mismo fluido la creación de perlas de distintos tamaños, la existencia de un tamaño de perlas predominante y un límite de tamaño máximo alcanzado. El trabajo presente no abarca el estudio del comportamiento de creación de perlas, sin embargo, por observación del fenómeno, se espera que las burbujas de mayor tamaño tengan un tiempo de vida menor debido a la inestabilidad de sus paredes. Con el objetivo de obtener resultados generalizados para cualquier tamaño de perla y cualquier fluido es posible realizar un análisis dimensional que incluya el diámetro de las perlas.

Se puede decir que el tiempo de vida de las perlas T_p es una función de la viscosidad μ , la tensión superficial σ , la densidad ρg y el diámetro D :

$$T_p = f(\mu, \sigma, \rho g, D) \quad (3.1)$$

Por lo tanto el sistema cuenta con 5 variables con las siguientes dimensiones de masa M , longitud L , fuerza F y tiempo T :

$$T_p [=] T \quad (3.2)$$

$$\mu [=] \frac{F}{L^2} T = \frac{MLT}{T^2 L^2} = \frac{M}{TL} \quad (3.3)$$

$$\sigma [=] \frac{F}{L} = \frac{ML}{T^2} L = \frac{M}{T^2} \quad (3.4)$$

$$\rho g [=] \frac{ML}{L^3 T^2} = \frac{M}{L^2 T^2} \quad (3.5)$$

$$D [=] L \quad (3.6)$$

A partir de estas 5 variables se pueden definir 2 parámetros adimensionales Π_1 y Π_2 y una relación funcional. El primer parámetro se desarrolla a continuación:

$$\Pi_1 = T_p \mu^\alpha \sigma^\beta D^\gamma \quad (3.7)$$

Cuyas dimensiones son:

$$1 [=] T \left(\frac{M}{TL} \right)^\alpha \left(\frac{M}{T^2} \right)^\beta (L)^\gamma \quad (3.8)$$

Al resolver para T, M y L se obtiene el primer parámetro adimensional:

$$\Pi_1 = \frac{T_p \sigma}{\mu D} \quad (3.9)$$

El segundo parámetro adimensional se desarrolla a continuación:

$$\Pi_2 = (\rho g) \mu^\alpha \sigma^\beta D^\gamma \quad (3.10)$$

$$1 [=] \left(\frac{M}{L^2 T^2} \right) \left(\frac{M}{TL} \right)^\alpha \left(\frac{M}{T^2} \right)^\beta (L)^\gamma \quad (3.11)$$

Por lo que el segundo parámetro adimensional es:

$$\Pi_2 = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (3.12)$$

Al existir solamente 2 parámetros adimensionales posibles para el sistema la relación funcional está dada por:

$$\Pi_1 = \phi(\Pi_2) \quad (3.13)$$

Por lo tanto, la relación funcional tiene la forma:

$$\frac{T_p \sigma}{\mu D} = \phi \left(\frac{\rho g D^2}{\sigma} \right) \quad (3.14)$$

El T_p de las perlas depende del equilibrio entre fuerzas de tensión superficial y fuerzas gravitacionales. Las primeras actúan en la superficie de la burbuja, con dirección normal a ella, reduciendo la energía por unidad de área; son las responsables de la forma pseudoesférica de la burbuja. Las segundas fuerzas son de cuerpo por lo que actúan en el volumen de la película delgada que forma las paredes de la burbuja así como en el contenido gaseoso; su dirección total es hacia arriba, ya que son las responsables de la flotación de la burbuja debido a su contenido gaseoso y de la caída del líquido que forma la película delgada. La comparación de ambas fuerzas está comprendida en la parte interna de la relación funcional y se conoce como número de Bond Bo :

$$Bo = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (3.15)$$

La relación se puede escribir de la siguiente manera:

$$T_p = \frac{\mu D}{\sigma} \phi \left(\frac{\rho g D^2}{\sigma} \right) \quad (3.16)$$

Por lo que el T_p es directamente proporcional a la viscosidad de la mezcla. Sin embargo, el Bo es una función que depende del cuadrado del diámetro D como se indica en la Ecuación (3.15).

Ahora definimos el tiempo de vida adimensional T_p^* como:

$$T_p^* = \frac{T_p \sigma}{\mu D} = \phi \left(\frac{\rho g D^2}{\sigma} \right) \quad (3.17)$$

Empleando las propiedades físicas de las mezclas se pueden convertir las gráficas de las secciones anteriores en una gráfica del T_p^* contra el Bo con resultados que incluyan las consideraciones por el diámetro de cada perla. Los resultados se muestran en la Figura 3.10.

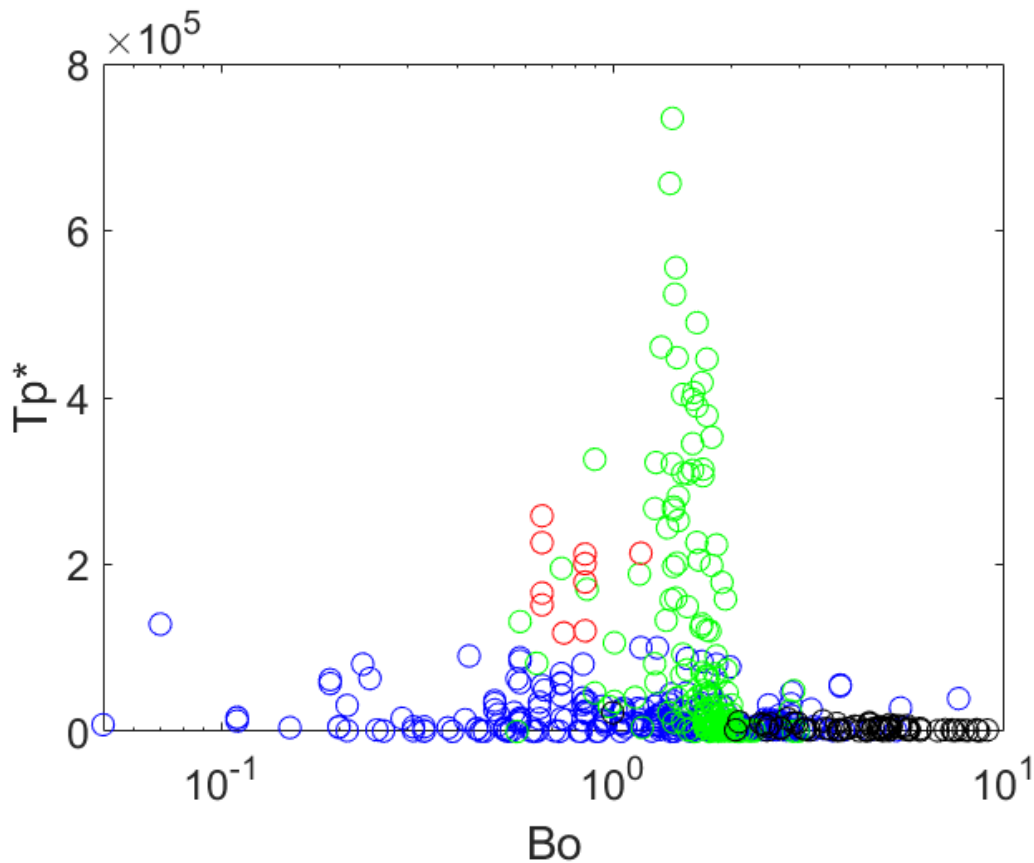


Figura 3.10: Gráfica de resultados adimensionales, T_p^* contra Bo , para los resultados absolutos mostrados con anterioridad. Se observa la existencia de un pico máximo en el T_p^* para números de Bo entre 1 y 2. El mezcal “Los Sánchez” Espadín se muestra en rojo.

3.6.1. Interpretación de resultados

La gráfica de la Figura 3.10 contiene los resultados adimensionales para las 3 series experimentales realizadas. En ella se observa la existencia de un pico de tiempo de vida adimensional máximo en Bo cercanos a 1. También disminuye el corrimiento de la gráfica de T_p absoluto para

la mezcla de agua con etanol, alcanzando un T_p^* máximo cercano al del mezcal. La gráfica sugiere la posible existencia de un rango de número de Bond entre 0.9 y 2 dentro del cuál el T_p^* es alto para cualquier fluido. Los resultados adimensionales muestran que las mezclas de agua con etanol tienen un T_p^* mayor al de mismo mezcal y se esparcen por un rango de Bo relativamente corto. El T_p^* para todas las muestras con surfactantes diluidos es muy pequeño.

3.7. Cálculo de espesor de película

El espesor de la pared de la burbuja e es un parámetro importante porque determina el comportamiento del flujo que ocurre en la pared y a su vez es afectado por el flujo. Existe una técnica experimental sencilla para aproximar e que consiste en medir la velocidad puntual del frente de una ruptura en la pared de la burbuja. La velocidad de apertura es constante y está dada por la ley de Dupré-Taylor-Culick [53]:

$$v^2 = \frac{2\gamma}{\rho e} = 2gl \quad (3.18)$$

En donde v es la velocidad de apertura, γ es el valor de la tensión superficial líquido-gas, ρ es la densidad del líquido, g es la aceleración de la gravedad y l es un tamaño característico de la burbuja. Es de utilidad en la investigación estimar un valor de e de las perlas de mezcal. Las propiedades γ y ρ para distintos mezcales se conocen por los métodos explicados en el Capítulo 2. Por tanto, para estimar e es necesario obtener v experimentalmente, empleando para ello video de alta velocidad de la ruptura de perlas y analizando las imágenes obtenidas. En la Figura 3.11 se muestra un ejemplo de imágenes obtenidas para calcular la velocidad de ruptura v .

Empleando un programa de visualización de videos de alta velocidad, es posible medir sobre las imágenes obtenidas distancias lineales; además se conoce la frecuencia de captura de las imágenes, por lo que se conoce la separación temporal entre ellas. Para obtener la velocidad de apertura v se divide la distancia recorrida por la ruptura entre dos imágenes sucesivas Δd entre la separación temporal Δt .

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Se repite el cálculo para cada par de imágenes que abarquen el proceso de ruptura, y se repite de nuevo para distintas burbujas del mismo fluido. A continuación, se despeja e de la ecuación de Dupré-Taylor-Culick y se emplean las propiedades intrínsecas del fluido para calcularlo. Observamos para un grupo de burbujas de mezcal “Los Sánchez” *Espadín* y los resultados se resumen en la Tabla siguiente, en donde se concluye que el espesor de las paredes de las perlas de mezcal es del orden de $\sim 10\mu m$.

3.8. Otros resultados relevantes

En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestran secuencias de imágenes del proceso de rompimiento de burbujas capturada en el laboratorio con el sistema de cámaras rápidas descrito en el Capítulo 2.

Burbuja	Velocidad de ruptura (m/s)	Espesor e (μm)
1	1.67	23.97
2	1.88	18.94
3	1.71	22.66
4	1.86	19.31
5	1.82	20.14
6	1.58	26.56
7	1.75	21.75
8	1.67	23.97
9	1.75	21.75
10	1.60	26.01
11	1.83	19.81
12	1.67	23.97
13	1.50	29.60
14	1.41	33.68
15	2.06	15.76
16	1.86	19.31
17	1.69	23.39
18	1.42	33.18
Promedio \pm Desviación estándar	1.71 \pm 0.17	23.54 \pm 4.84

Tabla 3.1: Velocidad lineal de ruptura y espesor de pared de burbujas superficiales de mezcal “Los Sánchez” Espadín calculado con la ecuación de Dupré-Taylor-Culick

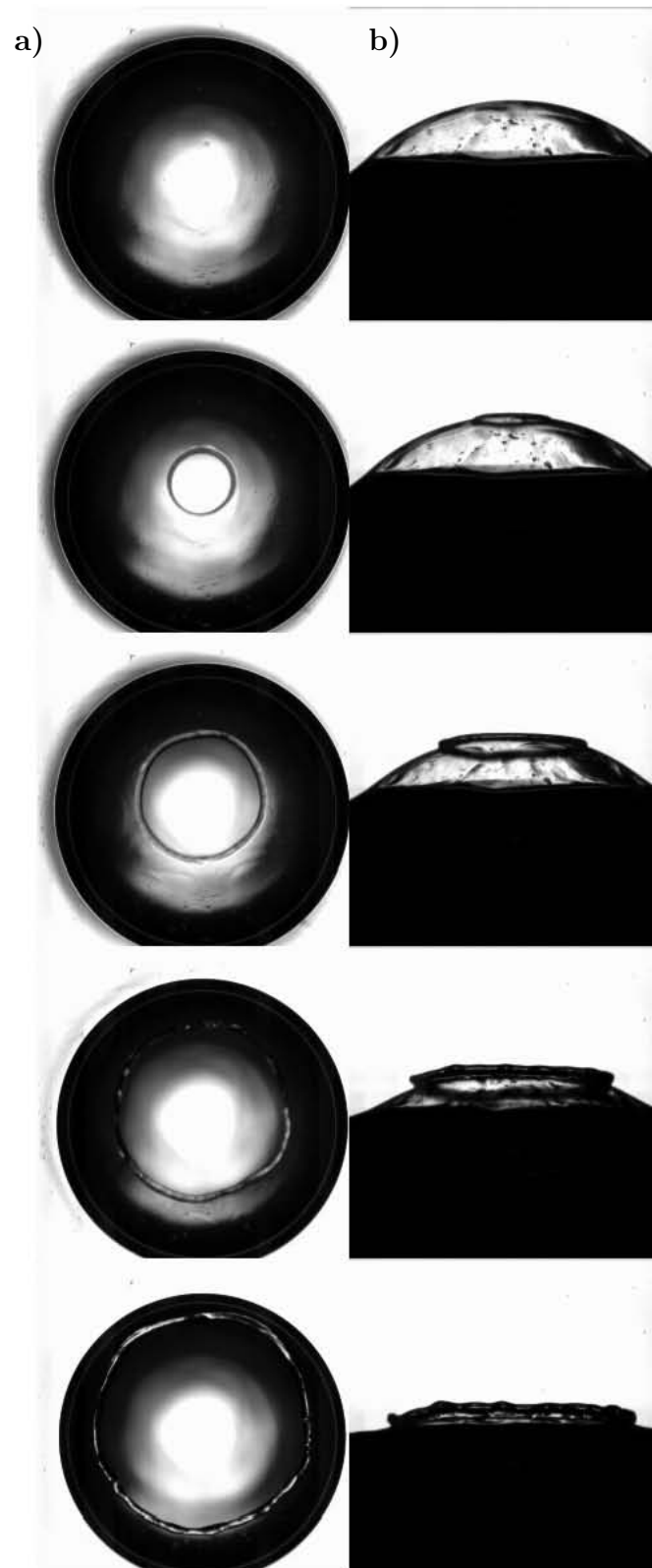


Figura 3.11: Secuencia de fotografías de la ruptura de una perla de mezcal “Los Sánchez” Espadín en vista superior a) y lateral b). Las imágenes muestran la nucleación de la ruptura en la parte superior de la burbuja y su crecimiento posterior. Nótese que la apertura mantiene su forma circular durante el proceso de ruptura, lo que indica que la velocidad v es homogénea. La secuencia fue tomada con dos cámaras rápidas sincronizadas a 5,000fps; el intervalo de tiempo entre las imágenes mostradas es de 0.4ms. El diámetro aproximado de la burbuja es de 2.65mm

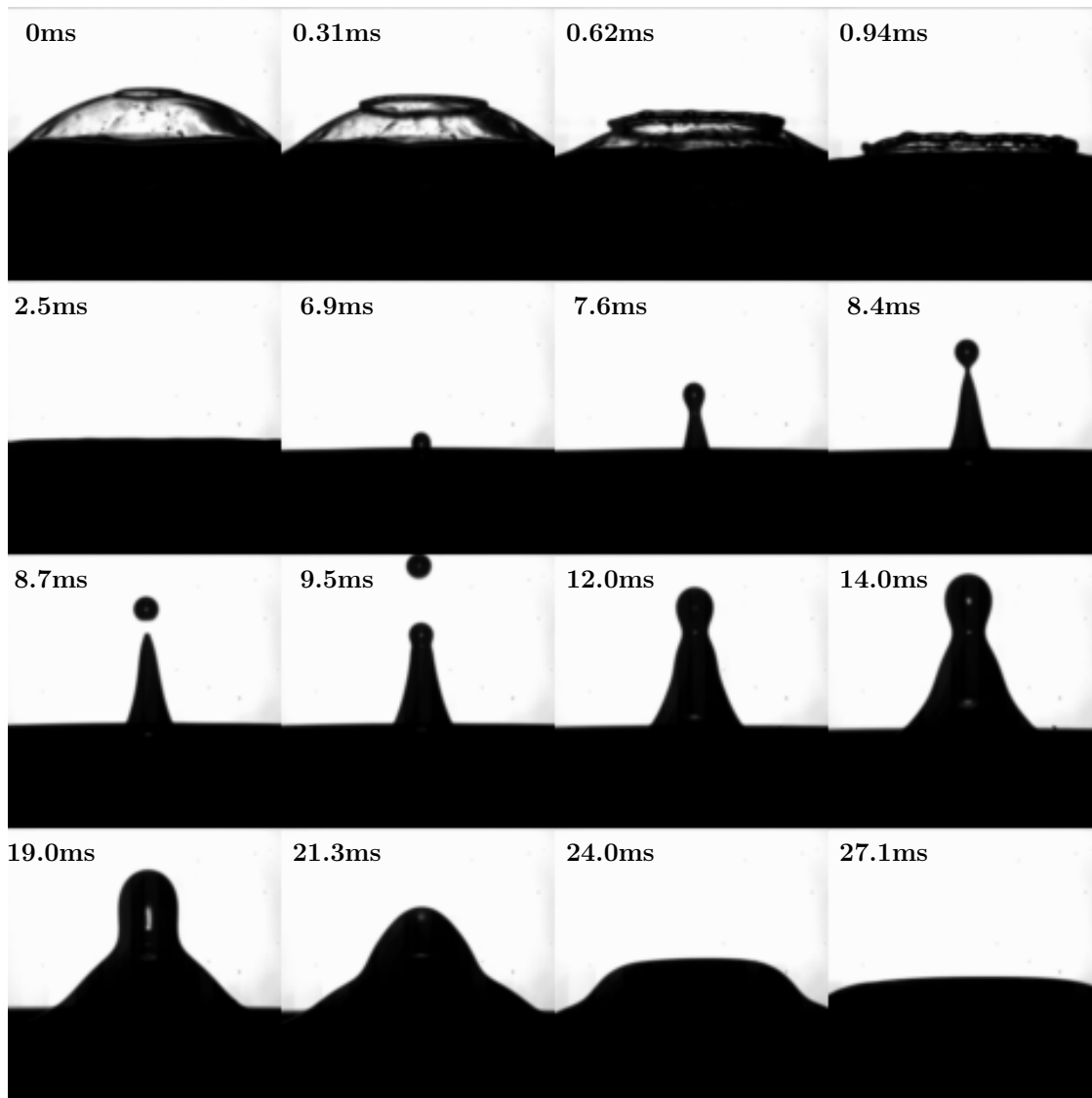


Figura 3.12: Secuencia de imágenes del proceso completo de ruptura de una burbuja superficial en mezcal “Los Sánchez” Espadín. Tomada por el autor con una cámara rápida a una tasa de 6,400 cuadros por segundo.

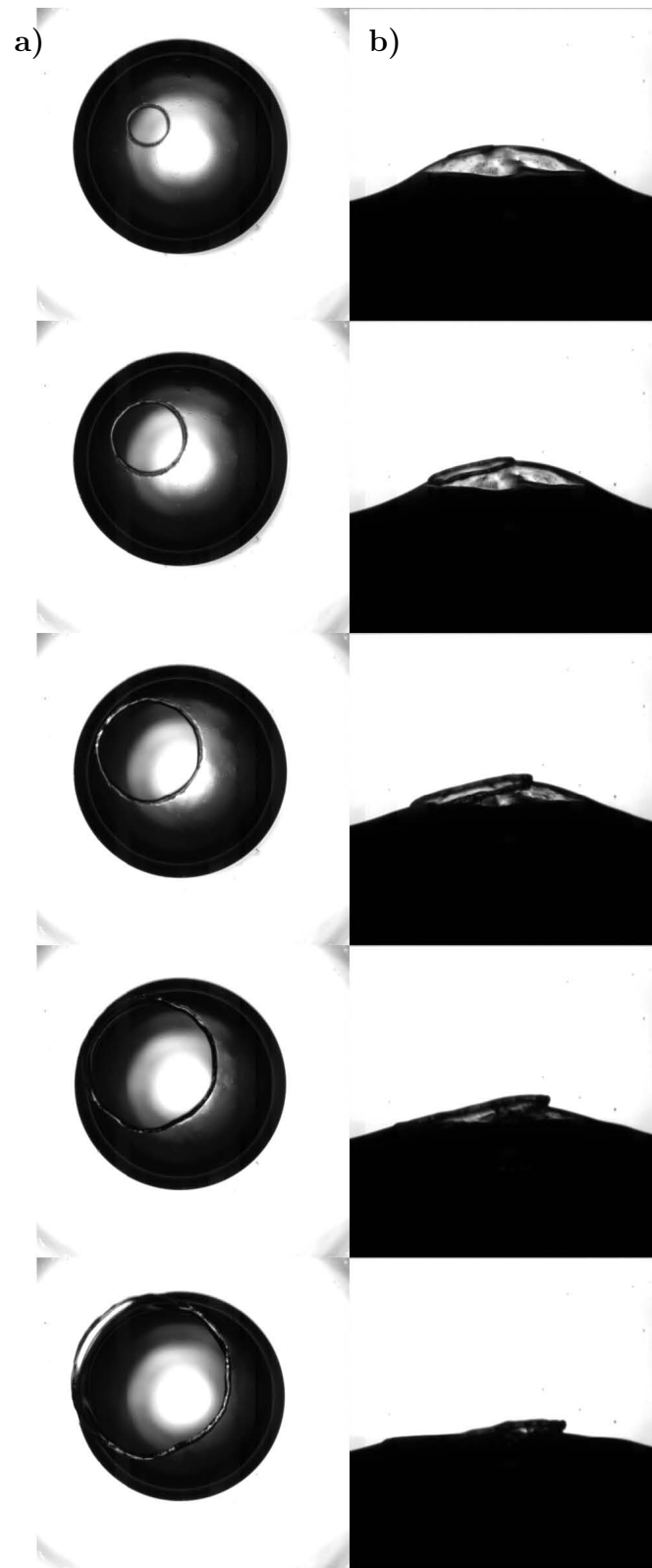


Figura 3.13: Secuencia de fotografías de la ruptura de una perla de mezcal “Los Sánchez” Espadín en vista superior a) y lateral b)

Capítulo 4

Modelo del drenado de la película de líquido

En el presente capítulo se desarrolla un modelo teórico simple de una burbuja superficial y se emplea para explicar el prolongado tiempo de vida de las perlas de mezcal. El modelo abarca solamente la descripción del estado estable de la perla en la superficie, es decir, no incluye el proceso de formación ni de ruptura. El objetivo es encontrar las variables relevantes que afectan al T_p y comprobar la validez de las suposiciones empleadas en el desarrollo del modelo.

4.1. Drenado de la pared delgada como causa de ruptura de la burbuja

Las perlas son burbujas superficiales que se pueden definir como un volumen de gas encerrado entre un depósito de líquido y una película delgada de líquido con forma de casquete esférico. La estabilidad de una burbuja depende del equilibrio entre las fuerzas de presión ΔP (diferencia entre la presión interna P_i ejercida por el contenido gaseoso de la burbuja y la presión externa P_e ejercida por las condiciones atmosféricas) y la resistencia de su pared líquida. La resistencia de la pared de la burbuja es una función de su espesor e y de las propiedades reológicas del líquido, principalmente la tensión superficial σ , la densidad ρ y la viscosidad μ como se muestra en la Figura 4.1. La ruptura de la burbuja ocurre cuando en un punto de la pared el espesor e alcanza un valor crítico mínimo.

La pared delgada de la burbuja está formada por un fluido constreñido entre dos interfaces líquido-gas. La pared tiene rigidez debido a la predominancia, en la escala de e , de las fuerzas de tensión superficial presentes en las interfaces sobre otras fuerzas. En estos órdenes de magnitud espacial la fuerza gravitacional que actúa sobre el fluido de la pared se vuelve relativamente pequeña mientras que las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas viscosas relativamente grandes.

El líquido entre las dos interfaces de la película delgada fluye lentamente bajo el efecto de la gravedad, drenando el volumen de la pared V_p y disminuyendo el espesor e . El drenado comienza desde que se forma la burbuja y emerge por encima del nivel medio de la superficie, continúa durante su vida estable y es la causa de ruptura de la pared que ha adelgazado hasta volverse susceptible ante cualquier perturbación.

La nucleación de una fractura en la pared es el primer paso del proceso de ruptura e indica la terminación de su vida. Para que ocurra debe existir una perturbación o impureza en la pared de la burbuja. La probabilidad P_f de que una perturbación o impureza se convierta en un punto de

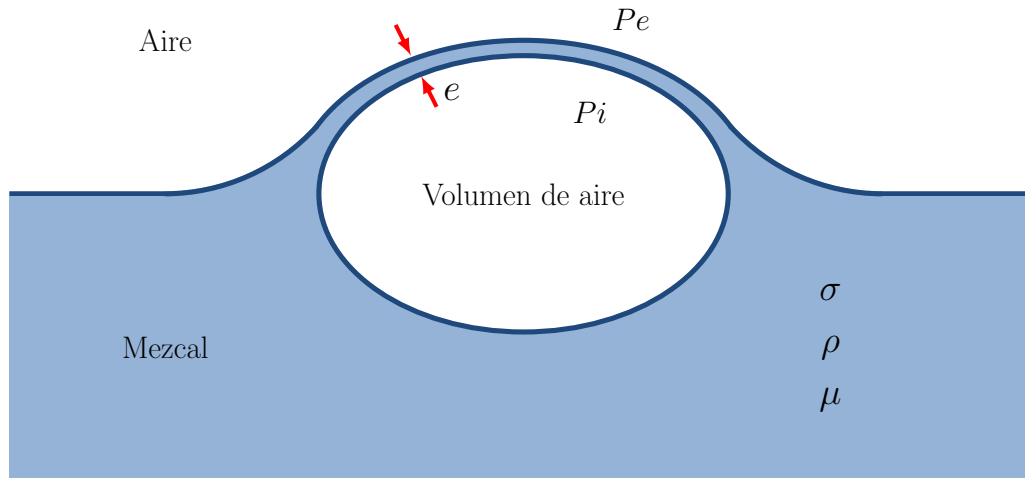


Figura 4.1: Esquema de una burbuja superficial

nucleación de fractura es una función inversa del espesor e . En otras palabras, el drenado de la pared de la burbuja incrementa la probabilidad de fractura. La muerte de la burbuja es inevitable una vez que ocurrió la nucleación. El siguiente paso en el proceso de ruptura es el crecimiento de la fractura y la contracción de la pared de la burbuja. El proceso termina cuando la inercia de la contracción expulsa un chorro de líquido vertical y la superficie regresa a su forma plana estable.

4.1.1. Modelo plano del drenado de una burbuja

El modelo de flujo en una película delgada se puede emplear para describir el comportamiento de la pared de la burbuja y predecir su drenado. Al conocer la tasa de flujo de la pared es posible estimar el tiempo de vida de la burbuja. La Figura 4.2 es un esquema del modelo aplicado a la pared de una burbuja en donde e es el espesor de la película, Q es el gasto volumétrico del drenado y α es el ángulo característico de la pared respecto a la horizontal.

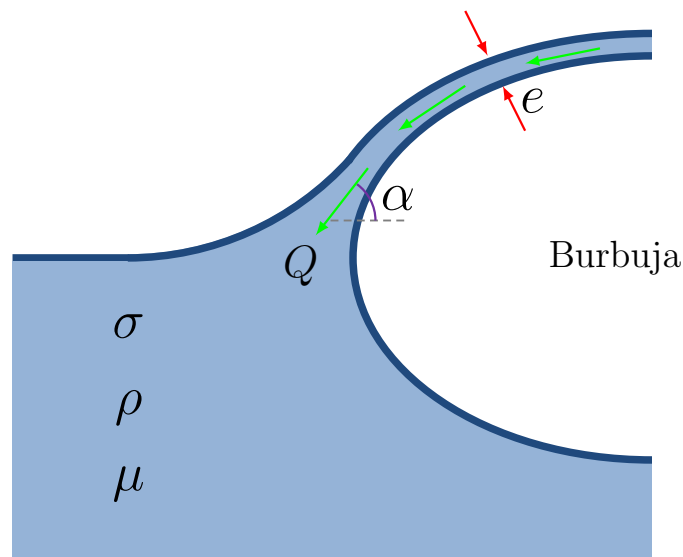


Figura 4.2: Modelo en 2 dimensiones de una burbuja superficial que muestra las propiedades físicas relevantes (σ , ρ y μ), parámetros geométricos (e y α) y el flujo de drenado Q .

El modelo plano (en 2 dimensiones) de drenado de una burbuja es una simplificación muy útil con los siguientes supuestos:

- Modelo plano. La primera aproximación al problema considera un flujo en 2 dimensiones (x y y) de modo que las ecuaciones se puedan simplificar y resolver analíticamente. El modelo toma el semi-plano de un corte transversal de la burbuja.
- Geometría simple. La geometría pseudo-esférica de la burbuja se simplifica a un plano inclinado con un ángulo α respecto a la horizontal.
- Espesor constante. El espesor e es en realidad una función de la posición. En este modelo se considera constante para toda la pared.

4.1.2. Geometría de una burbuja superficial

Resultado de una investigación experimental con burbujas gigantes de jabón [53] demuestra que la geometría real de las burbujas superficiales no es esférica, sino que su forma es pseudo-esférica aplanada en la parte superior debido al peso propio de su pared. En su artículo demuestra matemáticamente que la geometría de una burbuja ideal es esférica si toma como supuesto una pared infinitamente delgada que no tiene masa; al dotar de espesor y masa a dicha burbuja la esfera se aplanada. Por tanto, la geometría real de una burbuja superficial se asemeja a un cascarón pseudo-esférico de espesor e como la del esquema de la Figura 4.3.

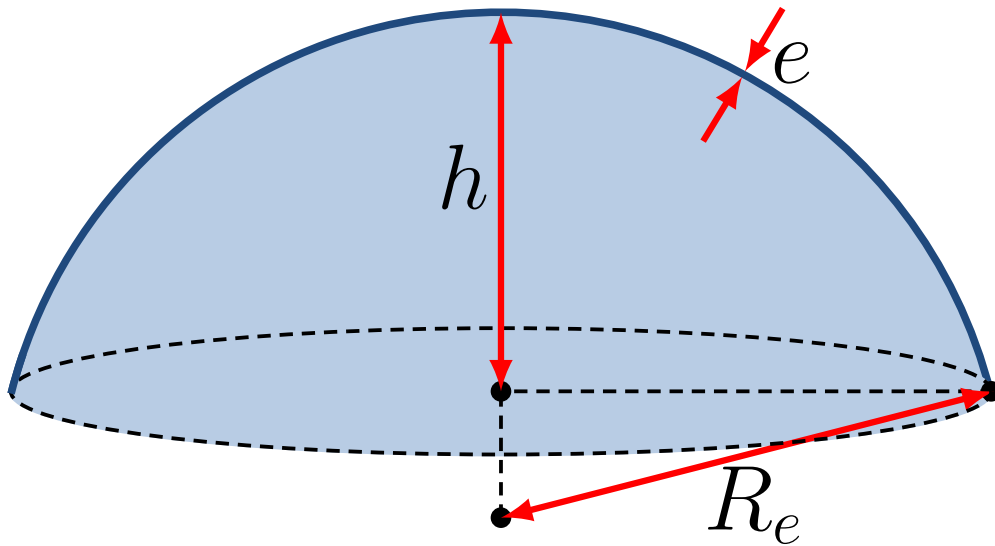


Figura 4.3: Modelo geométrico de una burbuja superficial

El perfil de la burbuja se puede aproximar a una sección de cascarón esférico y se puede calcular el volumen de líquido contenido en la pared V_p . Se considera que la burbuja es axisimétrica respecto al eje vertical que la atraviesa por el centro. Por tanto la burbuja se puede considerar un sólido de revolución y su volumen se puede calcular integrando las funciones de circunferencia y líneas rectas adecuadas. En la Figura 4.4 se plantea el área A encerrada entre funciones que al rotarse alrededor del eje y genera la geometría de la burbuja.

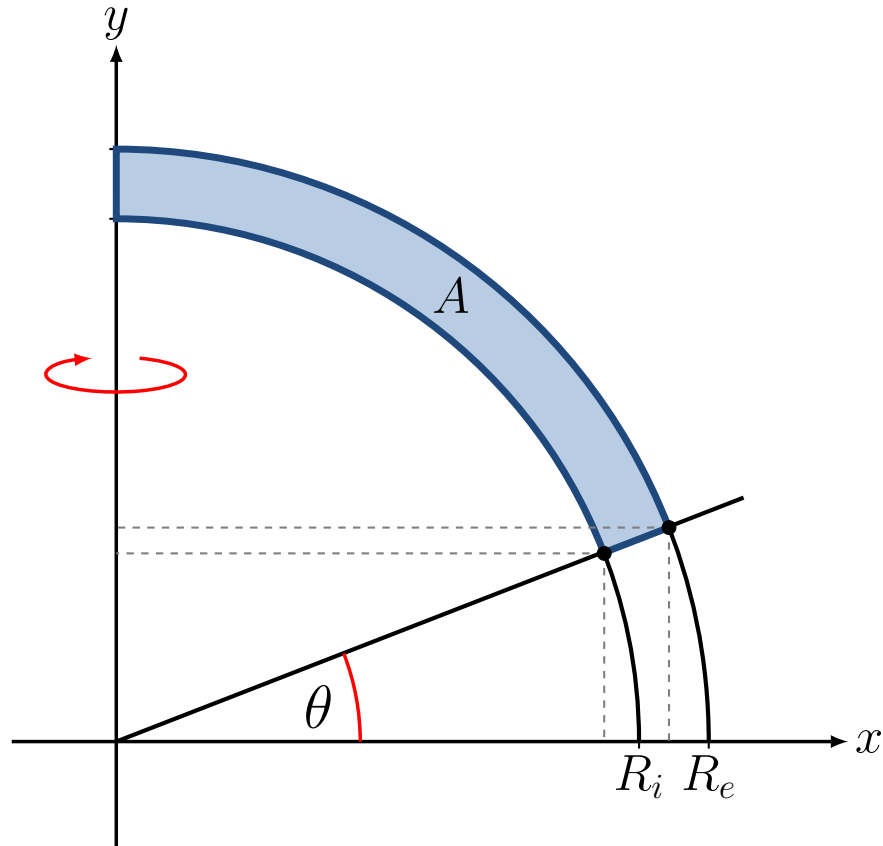


Figura 4.4: Sólido de revolución empleado para el cálculo del V_p

Se emplea el método de los discos para calcular el volumen del sólido de revolución dividido en pasos como se muestra en la Figura 4.5. Este método permite describir matemáticamente a la figura axisimétrica que se obtiene al rotar 360 grados el área de la Figura 4.4. Se considera que el resultado es una figura geométrica que representa a las burbujas superficiales adecuadamente en una primera iteración.

La ecuación general para calcular el volumen de un sólido de revolución con el método de los discos se muestra a continuación.

$$V = \pi \int_c^d g^2(y) dy \quad (4.1)$$

Para obtener el volumen final V_f se calcula el volumen de cada uno de los 4 pasos mostrados, sumando el volumen del paso 1 y 2, y restando el volumen del paso 3 y 4. A partir de la ecuación que describe una circunferencia:

$$\begin{aligned} V_1 &= \pi \int_{R_e \sin \theta}^{R_e} (R_e^2 - y^2) dy = \\ &= \pi R_e^3 \left(\frac{2}{3} - \sin \theta + \frac{1}{3} \sin^3 \theta \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

A partir de la ecuación de una recta:

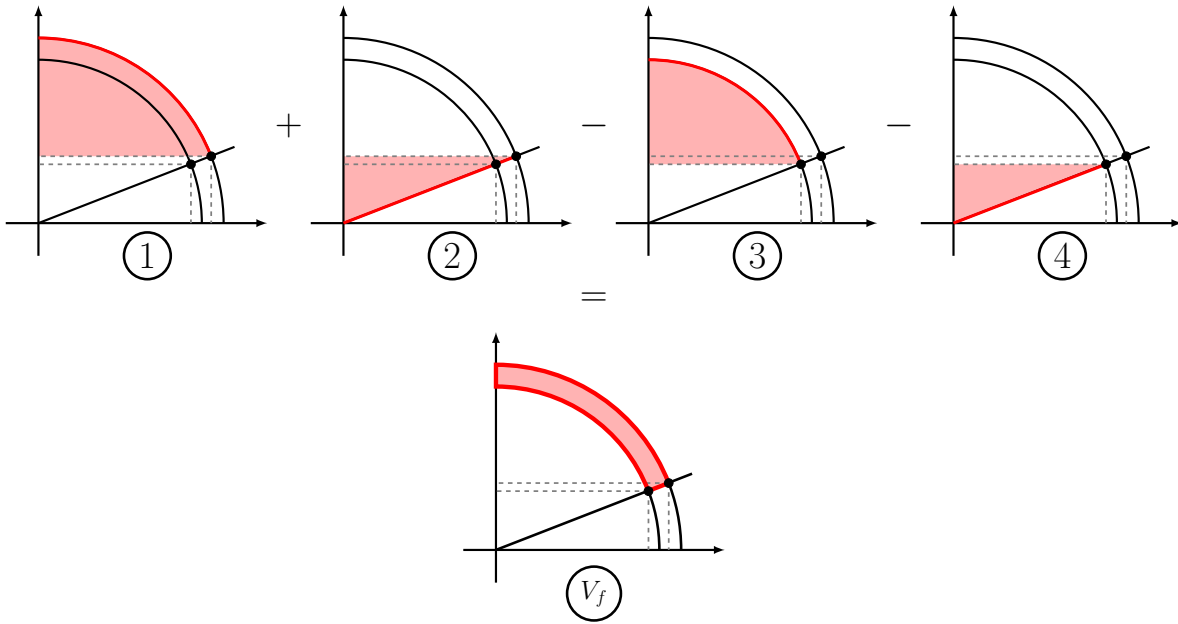


Figura 4.5: Cálculo del volumen del cascarón esférico que representa geoméricamente a las burbujas superficiales a partir del método de los discos

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \pi \int_0^{R_e \sin \theta} \left(\frac{y}{\tan \theta} \right)^2 dy = \\
 &= \frac{1}{3} \pi R_e^3 (\sin \theta - \sin^3 \theta)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

El resultado para V_1 es análogo para V_3 y el resultado para V_2 es análogo para V_4 . Por tanto, se puede obtener V_f sumando y restando los siguientes términos:

$$\begin{aligned}
 V_f &= V_1 + V_2 - V_3 - V_4 = \\
 &= \frac{2}{3} \pi (R_e^3 - R_i^3) (1 - \sin \theta)
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Finalmente, se expresa el resultado del volumen total V_p en términos de las variables que se pueden medir fácilmente en las imágenes obtenidas con el arreglo experimental y las que se pueden obtener por métodos indirectos. Para ello se toma $R_i = R_e - e$ y $\sin \theta = 1 - \frac{h}{R_e}$. A continuación se sustituyen en la fórmula del volumen:

$$\begin{aligned}
 V_p &= \frac{2}{3} \pi (R_e^3 - R_i^3) (1 - \sin \theta) = \\
 &= \frac{2}{3} \pi (3eR_e^2 - 3e^2R_e + e^3) \frac{h}{R_e}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Partiendo de que $e \ll R_e$, se puede eliminar el término e^3 y simplificar la fórmula:

$$\begin{aligned}
 V_p &= \frac{2}{3} \pi (3eR_e^2 - 3e^2R_e) \frac{h}{R_e} \\
 &= 2\pi (eR_e - e^2) h
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

4.1.3. Flujo en una película delgada

La ecuación de Navier-Stokes tiene una solución analítica exacta para el modelo de flujo en una película delgada que se muestra en la Figura 4.6. El modelo describe el comportamiento mecánico de una capa de líquido delgada (profundidad en eje $y \ll$ longitud en eje x) que desciende sobre un plano inclinado.

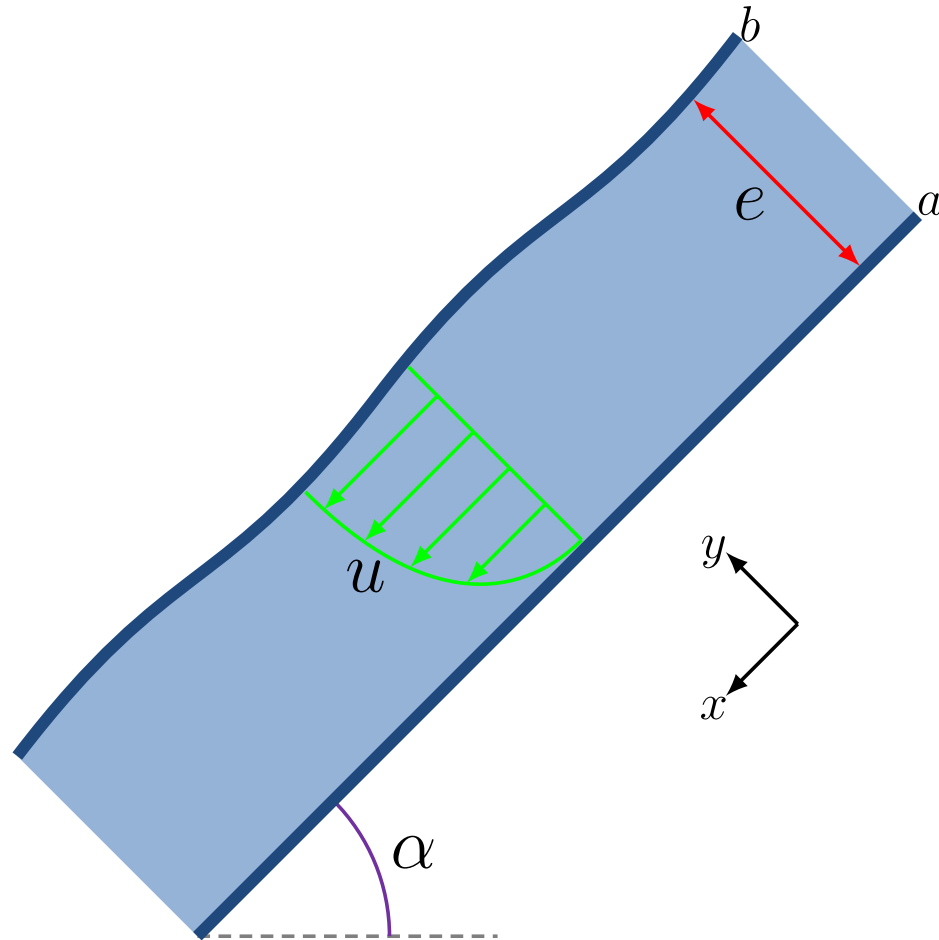


Figura 4.6: Esquematización del flujo en película delgada

Las ecuaciones de conservación de masa y momentum lineal para un fluido incompresible $\rho = \text{cte}$ y newtoniano $\mu = \text{cte}$ son:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho g \quad (4.8)$$

Dado el flujo en película delgada suponemos:

- 2 Dimensiones $\vec{v} = (u, v)$
- Flujo estacionario $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0$
- Flujo desarrollado $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

- Gradiente de presión nulo $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$
- Espesor constante $e = cte$
- Aceleración de gravedad $\vec{g} = (g \sin \alpha, g \cos \alpha)$

La ecuación de conservación de masa se simplifica:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.9)$$

Por lo tanto se trata de un flujo uni-direccional en x con $v = 0$:

$$\vec{v} = (u, 0) \quad (4.10)$$

Al aplicar las simplificaciones a la ecuación de conservación de momentum se obtiene:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \quad (4.11)$$

El resultado es una ecuación diferencial ordinaria de segundo grado lineal que se puede resolver para la velocidad u en la dirección x usando el método de integración:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha y + k_1 \quad (4.12)$$

$$u = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \frac{y^2}{2} + k_1 y + k_2 \quad (4.13)$$

4.2. Flujo de drenado para 3 casos distintos

Esta sección muestra el resultado de la Ecuación 4.13 aplicado a las burbujas superficiales para 3 condiciones de frontera distintas. Una vez resuelta la ecuación para la velocidad u , se puede integrar y resolver para el gasto volumétrico Q .

4.2.1. Primera condición de frontera: Superficie Libre

Según el flujo de la Figura 4.6, si se considera que en la superficie a se tiene una condición de no deslizamiento y en b una condición de superficie libre, entonces se puede resolver el sistema de ecuaciones siguiente:

$$u = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \frac{y^2}{2} + k_1 y + k_2 \quad (4.14)$$

$$y = 0 \rightarrow u = 0 \quad (4.15)$$

$$y = e \rightarrow \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (4.16)$$

Resolviendo el sistema para las constantes incógnitas k_1 y k_2 :

$$k_2 = 0 \quad (4.17)$$

$$k_1 = \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha e \quad (4.18)$$

Por tanto, el perfil de velocidades resulta:

$$u = \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \left(ey - \frac{y^2}{2} \right) \quad (4.19)$$

Integrando la velocidad u a lo largo de la altura e se puede obtener el gasto volumétrico Q_{libre} :

$$\begin{aligned} Q_{libre} &= \int_0^e u dy = \\ &= \int_0^e \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \left(ey - \frac{y^2}{2} \right) dy = \\ &= \frac{\rho g}{3\mu} \sin \alpha e^3 \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.2.2. Segunda condición de frontera: Superficie Rígida

Según el flujo de la Figura 4.6, si se considera que tanto en la superficie a como en la b se tienen condiciones de no deslizamiento, se puede resolver el sistema de ecuaciones siguiente:

$$u = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \frac{y^2}{2} + k_1 y + k_2 \quad (4.21)$$

$$y = 0 \rightarrow u = 0 \quad (4.22)$$

$$y = e \rightarrow u = 0 \quad (4.23)$$

Resolviendo el sistema para las constantes incógnitas k_1 y k_2 :

$$k_2 = 0 \quad (4.24)$$

$$k_1 = \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \frac{e}{2} \quad (4.25)$$

Por tanto, el perfil de velocidades resulta:

$$u = \frac{\rho g}{2\mu} \sin \alpha \left(\frac{ey}{2} - \frac{y^2}{2} \right) \quad (4.26)$$

Integrando la velocidad u a lo largo de la altura e se puede obtener el gasto volumétrico Q_{rigido} :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{rigido}} &= \int_0^e u dy = \\
&= \int_0^e \frac{\rho g}{2\mu} \sin \alpha \left(\frac{ey}{2} - \frac{y^2}{2} \right) dy = \\
&= \frac{\rho g}{12\mu} \sin \alpha e^3
\end{aligned} \tag{4.27}$$

4.2.3. Tercera condición de frontera: Gradiente de evaporación

Según el flujo de la Figura 4.6, si se considera que en la superficie a se tiene una condición de no deslizamiento y que en b existe un gradiente de evaporación que genera un esfuerzo cortante τ_{evap} con dirección opuesta a la dirección del flujo, se puede decir lo siguiente respecto al flujo en $y = e$:

$$\tau = -\tau_{\text{evap}} \tag{4.28}$$

Empleando la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{4.29}$$

Por tanto:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=e} = -\frac{\tau_{\text{evap}}}{\mu} \tag{4.30}$$

Entonces se puede resolver el sistema de ecuaciones siguiente:

$$u = -\frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \frac{y^2}{2} + k_1 y + k_2 \tag{4.31}$$

$$y = 0 \rightarrow u = 0 \tag{4.32}$$

$$y = e \rightarrow \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\tau_{\text{evap}}}{\mu} \tag{4.33}$$

Resolviendo el sistema para las constantes incógnitas k_1 y k_2 :

$$k_2 = 0 \tag{4.34}$$

$$k_1 = \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha e - \frac{\tau_{\text{evap}}}{\mu} \tag{4.35}$$

Por tanto, el perfil de velocidades resulta:

$$u = \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \left(ey - \frac{y^2}{2} \right) - \frac{\tau_{\text{evap}}}{\mu} y \tag{4.36}$$

Integrando la velocidad u a lo largo de la altura e se puede obtener el gasto volumétrico Q_{evap} :

$$\begin{aligned}
Q_{evap} &= \int_0^e u dy = \\
&= \int_0^e \frac{\rho g}{\mu} \sin \alpha \left(ey - \frac{y^2}{2} \right) - \frac{\tau_{evap}}{\mu} y dy = \\
&= \frac{\rho g}{3\mu} \sin \alpha e^3 - \frac{\tau_{evap} e^2}{2\mu}
\end{aligned} \tag{4.37}$$

4.3. Solución del T_p del modelo de drenado

En una primera aproximación para definir el tiempo de vida de las perlas, es válido suponer que el tiempo de vida T_p equivale al volumen original de fluido que forma a las paredes de la burbuja V_p dividido entre el gasto volumétrico constante del drenado del fluido que forma a las paredes Q .

$$T_p = \frac{V_p}{Q} \tag{4.38}$$

Esta suposición implica lo siguiente:

- El drenado es homogéneo y estacionario a lo largo de toda la pared, lo que resulta en un espesor e idéntico en todas las posiciones en todos los momentos.
- No toma en cuenta la nucleación de fracturas debido a impurezas en la película delgada, resultando en un tiempo de vida mayor al experimental.
- Considera que la muerte de la burbuja ocurre exactamente en el instante en que una cantidad de líquido igual al volumen original de la pared V_p ha sido drenado.

El modelo de drenado planteado parte de una simplificación geométrica que permite unificar el modelo de flujo en pared delgada con el modelo geométrico de la burbuja: el modelo de flujo en pared delgada modela un líquido cayendo sobre un plano inclinado, es decir, no considera la curvatura de la burbuja. Para unificar el modelo geométrico con el de flujo se elige, en este último, un ángulo característico α adecuado, como se muestra en la Figura 4.7. La simplificación se considera aceptable en una primera aproximación al problema:

$$\tan \alpha = c \frac{h}{R_e} \tag{4.39}$$

El resultado de tiempo de vida T_p del modelo planteado estará dado por el volumen V_p , definido en secciones anteriores, y el flujo de drenado en película delgada Q , para el cual se estudiaron 3 casos en secciones anteriores;

$$T_p = \frac{2\pi (eR_e - e^2) h}{Q} \tag{4.40}$$

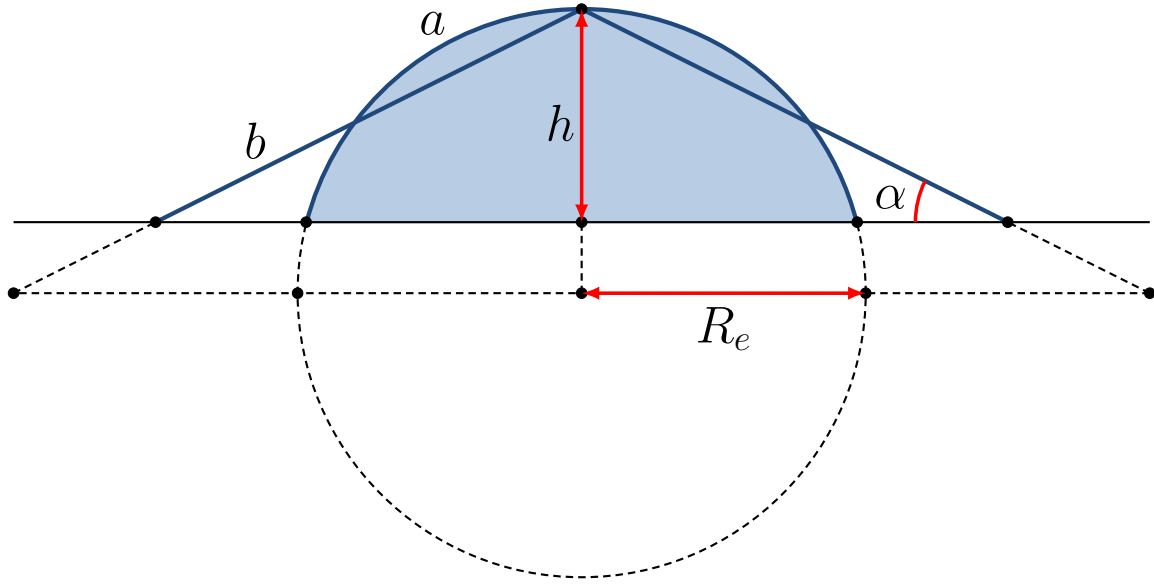


Figura 4.7: Simplificación geométrica del flujo

4.3.1. Tiempo de vida para tres casos

A continuación se resuelve el tiempo de vida T_p para los 3 casos de Q (Q_{Libre} , Q_{Rigido} y Q_{Evap}), tomando la constante $c = 1$:

$$\begin{aligned}
 T_{p_{Libre}} &= \frac{2\pi (eR_e - e^2) h}{\frac{\rho g}{3\mu} \sin \alpha e^3} = \\
 &= 6\pi \frac{\mu}{\rho g} \frac{h}{e^2} (R_e - e) \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p_{Rigido}} &= \frac{2\pi (eR_e - e^2) h}{\frac{\rho g}{12\mu} \sin \alpha e^3} = \\
 &= 24\pi \frac{\mu}{\rho g} \frac{h}{e^2} (R_e - e) \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)
 \end{aligned} \tag{4.42}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p_{Evap}} &= \frac{2\pi (eR_e - e^2) h}{\frac{\rho g}{3\mu} \sin \alpha e^3 - \frac{\tau_{evap} e^2}{2\mu}} = \\
 &= T_{p_{Libre}} \left(\frac{1}{1 - \frac{3}{2} \frac{1}{\rho g} \tau_{evap} \frac{1}{e} \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)} \right)
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

El tiempo de vida obtenido para burbujas en una superficie libre ($T_{p_{Libre}}$) es una función de la viscosidad (μ), la densidad (ρ) y la geometría de la burbuja definida por el radio (R_e), el espesor (e), y la altura (h). El modelo no considera la influencia de la tensión superficial en el tiempo de vida. El tiempo de vida para burbujas con ambas superficies rígidas ($T_{p_{Rigido}}$) se puede expresar en función del $T_{p_{Libre}}$ multiplicado por una constante ($c = 4$). Esto demuestra que al tener una superficie rígida, el drenado de la película de la burbuja es más lento y por tanto el tiempo de vida

es mayor. El tiempo de vida para burbujas superficiales con un gradiente de evaporación en su superficie (T_{pEvap}) también se puede expresar en función del T_{pLibre} multiplicado por una función de la densidad (ρ), la geometría y el esfuerzo cortante de evaporación (τ_{evap}). El termino del denominador de dicha función debe ser menor a uno dado que el esfuerzo es una cantidad positiva al igual que el resto de la función. Por lo tanto el tiempo de vida para este tipo de burbujas debe ser mayor al de burbujas en superficies libres. Este resultado demuestra que la presencia de efectos de Marangoni que provoca un flujo vertical en la pared de la burbuja alarga su tiempo de vida.

Las soluciones obtenidas se pueden transformar a tiempo de vida adimensional T_p^* empleando la definición vista en el Capítulo 3:

$$T_p^* = \frac{T_p \sigma}{\mu D} \quad (4.44)$$

En la Tabla 4.1 se resumen las soluciones del T_p^* para los 3 gastos volumétricos tomados en cuenta:

Caso	T_p
Superficie Libre	$T_{pLibre}^* = Bo^{-1} \quad 12\pi \frac{hR_e}{e^2} (R_e - e) \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)$
Superficie Rígida	$T_{pRigido}^* = 4 * T_{pLibre}^*$
Gradiente de Evaporación	$T_{pEvap}^* = \frac{1}{1 - \frac{3}{2} \frac{1}{\rho g} \tau_{evap} \frac{1}{e} \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)} T_{pLibre}^*$

Tabla 4.1: Soluciones del modelo para el tiempo de vida de perlas en 3 escenarios

Los resultados de tiempo de vida obtenidos se multiplican por la tensión superficial σ y se dividen por la viscosidad μ y el diámetro característico D para expresarlos de manera adimensional. En los 3 casos, al reacomodar las expresiones se obtiene que el tiempo de vida adimensional T_p^* es una función inversa del número de Bond Bo . Por ejemplo, en el caso de las condiciones de frontera de superficie libre, el T_{pLibre}^* es una multiplicación del Bo^{-1} , una constante 12π y un término que expresa las características geométricas de la burbuja $\frac{hR_e}{e^2} (R_e - e) \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)$. Llama la atención la ausencia en la expresión de la viscosidad μ y la aparición en cambio de la tensión superficial σ en comparación con la expresión no adimensional.

El número de Bond Bo compara las fuerzas gravitacionales con las de tensión superficial; la fuerza gravitacional depende de la densidad del fluido y el tamaño característico de la burbuja: $\uparrow \rho = \uparrow Bo$, $\uparrow D^2 = \uparrow Bo$ y $\downarrow \sigma = \downarrow Bo$. Esto implica que el tamaño de las burbujas afecta al Bo por un factor a la segunda potencia; las burbujas pequeñas tienen una tensión superficial relativamente más grande que las fuerzas gravitacionales. Por otro lado, mientras menor sea la tensión superficial y mayor la densidad del fluido el Bo aumenta monotonícamente.

La expresión incluye un factor geométrico caracterizado por 3 variables: h la altura de la burbuja, R_e su radio externo y e el espesor de la película delgada. Con fines ilustrativos se puede

tomar una burbuja esférica con $h = R_e = \frac{D}{2}$ y reducir el factor geométrico a las siguiente expresión: $\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{e}\right)^2 (D - 2e)$. Al examinar término por término se observa que el D^2 se cancela con el mismo término contenido en el Bo , por lo que el tiempo de vida adimensional se podría expresar de la siguiente manera: $T_{pLibre}^* = \frac{12}{\sqrt{2}} \pi \frac{\sigma}{\rho g} \left(\frac{D}{e^2} - \frac{2}{e}\right)$. En esta forma se aprecia la dependencia del tiempo de vida adimensional de cada una de las variables relevantes del problema. Se observa que el tiempo de vida adimensional aumenta con el diámetro de la burbuja, y que disminuye con el aumento del espesor de la pared.

Los resultados para las otras dos condiciones de frontera se pueden expresar en función del resultado para la superficie libre. El tiempo de vida adimensional de una burbuja con superficie rígida es 4 veces el tiempo de vida con superficie libre. El tiempo de vida de una burbuja con la presencia de gradientes de evaporación es igual al T_{pLibre}^* dividido por una expresión que caracteriza el nuevo comportamiento. Dicha expresión es la siguiente: $1 - \frac{3}{2} \frac{1}{\rho g} \tau_{evap} \frac{1}{e} \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right)$. Es relevante notar que cuando τ_{evap} es cero el tiempo de vida adimensional es idéntico al T_{pLibre}^* , fuera de este caso la expresión solamente debe adoptar valores positivos menores a uno para tener un sentido físico, y de esta manera el T_{pEvap}^* es forzosamente mayor al T_{pLibre}^* . Se observa que la expresión adopta el valor de cero cuando $\frac{3}{2} \frac{1}{\rho g} \tau_{evap} \frac{1}{e} \csc \left(\tan^{-1} \frac{h}{R_e} \right) = 1$, lo cual implica un tiempo de vida T_{pEvap}^* infinito. Al tomar una burbuja esférica como se hizo anteriormente se puede expresar la ecuación de la siguiente manera: $\frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{1}{\rho g} \tau_{evap} \frac{1}{e} = 1$. Dicha expresión implica que el efecto de los gradientes de evaporación en el tiempo de vida de las burbujas es proporcional al esfuerzo cortante que generan e inversamente proporcional a la densidad del fluido y al espesor de la pared. Por tanto, el tiempo de vida adimensional puede tender a infinito cuando $\tau_{evap} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \rho g e$.

Capítulo 5

Conclusión

En el presente capítulo se resumen los resultados obtenidos en la investigación y sus implicaciones para explicar el fenómeno de las perlas de mezcal. Los resultados experimentales y teóricos se comparan con las hipótesis planteadas al inicio de la investigación y se concluye sobre su validez. Finalmente se discute sobre la relevancia de los resultados y los próximos pasos de investigación.

5.1. Resultados de la investigación

Las perlas de mezcal son tanto un fenómeno físico como uno cultural, descubiertas e inventadas al mismo tiempo por los maestros mezcaleros de tradición artesanal en México. Debido a su origen el fenómeno presenta varias facetas abiertas a investigación desde diferentes puntos de vista científicos y sociales. El papel de la mecánica de fluidos en su estudio se limita a la explicación del fenómeno físico, su observación y documentación detallada, la identificación de las causas que lo originan y la generalización del fenómeno en el contexto de cualquier fluido. Sin embargo, los resultados de tal investigación pueden influir positivamente en su componente cultural al acreditar la veracidad del conocimiento tradicional que comúnmente es desestimado. Los resultados de la presente investigación demuestran que la prueba empírica para determinar el contenido de alcohol del mezcal es certera, el fenómeno de las perlas de mezcal es real.

El método de investigación empleado resultó adecuado para el fenómeno porque permitió reproducirlo fielmente y observarlo minuciosamente en el laboratorio. La medición por visualización con cámaras rápidas tiene la ventaja de revelar detalles pequeños y rápidos difíciles de observar de otra manera, por ejemplo, las ondas del efecto Marangoni en las paredes de las perlas. Además, permitió tomar medidas en el orden de milésimas de segundo en el T_p y centésimas de milímetros en el D , y reproducir los resultados cuantas veces fuera necesario, con el inconveniente de tener que tomar estas medidas manualmente para cada burbuja desde un archivo de vídeo. El sistema para contener los fluidos de ensayo y la inyección de burbujas resultaron un método análogo efectivo al de inyección de un chorro líquido para generar las perlas porque no afecta al T_p y en cambio brinda una gran versatilidad y control de los experimentos a un bajo costo. El sistema solamente es funcional debido al uso del menisco convexo para centrar las perlas; el menisco es la pieza clave del desarrollo experimental. Por otra parte, el arreglo experimental permitió capturar imágenes de perlas en situaciones diversas muy atractivas y a gran detalle que generan un impacto visual favorable para el trabajo de investigación.

Las series experimentales fueron diseñadas para corroborar o descartar posibles explicaciones del largo tiempo de vida de las perlas. La primera serie empleada, los mezcales adulterados, cumplió

el objetivo de verificar la existencia del fenómeno difundido por los maestros mezcaleros. Al mismo tiempo funcionó para cuantificar las magnitudes del T_p y el D , y abrió paso para las siguientes series. La serie con mezclas de agua con etanol demostró que el tiempo de vida de las burbujas superficiales es afectado por las proporciones de la mezcla y la manera en que altera las propiedades físicas del fluido, específicamente la viscosidad. A pesar de brindar una explicación plausible del fenómeno, los datos de la serie muestran un desfase en contenido de alcohol respecto al mezcal, abriendo paso a la existencia de otras causas. La serie experimental de mezcales con agentes químicos diluidos investiga la hipótesis de que el mezcal contiene pequeñas cantidades de surfactantes que inmovilizan la pared de las perlas extendiendo su T_p . Los resultados de esta serie son contundentes: al reducir el contenido de agentes químicos el T_p se redujo drásticamente. El resto de las series experimentales funcionaron para dimensionar las magnitudes del fenómeno y corroborar su presencia en otros fluidos y sustancias puras. En el transcurso de estos experimentos las imágenes capturadas revelaron la presencia de otro fenómeno, el efecto Marangoni. La serie experimental de mezcales sirvió para la búsqueda de ondas de Marangoni más potentes que ocuparan una mayor proporción de la superficie de la perla, que se movieran más rápido y se observaran mejor. Uno de los mezcales puros, “El Amate” *Espadín*, presentó el efecto más marcado entre los observados, abriendo paso a una nueva hipótesis de la extensión del T_p en las perlas: la existencia de flujo en dirección contraria al drenado en las paredes de las perlas.

El análisis dimensional logró generalizar los resultados de tiempo de vida de burbujas superficiales para cualquier fluido en función de sus propiedades físicas y su tamaño característico representado por D . En conjunto con los resultados de las series experimentales permite identificar una zona de valores del número de Bo para la cual el tiempo de vida es relativamente extenso. Es decir, el análisis predice cuáles son las propiedades del fluido y las características de la burbuja necesarias para obtener un tiempo de vida largo.

El modelo físico busca predecir con métodos deterministas (mecanicistas) el tiempo de vida de burbujas superficiales. El argumento central es el drenado de la pared delgada actuando como mecanismo de ruptura de las burbujas; el gradual adelgazamiento de las paredes de la burbuja debido al drenado de su contenido la llevan a la inestabilidad y eventual ruptura por nucleación de una fractura. Simplificaciones de las ecuaciones generales de Navier-Stokes permiten resolver el flujo para una geometría aproximada de la burbuja. Empleando condiciones de frontera distintas se modela el posible efecto que los surfactantes y los flujos de Marangoni pueden tener en el drenado de la pared y por tanto en el T_p . Los resultados demuestran analíticamente que el tiempo de vida con surfactantes y Marangoni es al menos 4 veces más extenso que el escenario base.

5.2. Relevancia y pasos futuros

Los resultados de esta investigación acreditan que el método de las perlas para determinar el contenido de alcohol del mezcal es certero en la medida en que éstas reflejan indirectamente las propiedades del fluido que las forma. Con ello se demuestra que es posible para la ciencia estudiar fenómenos inspirados en tradiciones culturales y aportar un beneficio para su conservación y correcta estimación. Esta investigación brinda un nuevo entendimiento sobre el alcance del conocimiento tradicional que existe alrededor del mezcal y obliga a buscar su protección. Las conclusiones derivadas de ella deben tomarse en cuenta en la implementación de políticas de producción y la redacción de normas de regulación de la industria, cuyo objetivo debe ser preservar la tradición artesanal del mezcal a través del conocimiento empírico de los maestros mezcaleros y promover su explotación económica sustentable.

Apéndices

Apéndice 1: Componentes químicos secundarios del mezcal

Tiempo de retención	Compuesto	Tipo de mezcal
	Alcoholes	
1.51	Metanol	1, 2, 3, 4, 5
3.66	2-butanol	1, 2, 3, 4, 5
4.06	Propanol	1, 2, 3, 4, 5
5.88	2-metil-propanol	1, 2, 3, 4, 5
8.72	Butanol	3, 4, 5
10.26	2/3-metil-1-butanol	1, 2, 3, 4, 5
37.04	Alcohol fenilfílico	3, 4, 5
42.11	6,9-pentadecadieno-1-ol	2, 4
42.75	3-hexeno-1-ol	2, 4
	Esteres	
1.19	Acetato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
3.88	Butanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
6.66	Pentanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
10.4	Hexanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
13.9	Butanoato de pentilo	1, 2, 3, 4, 5
15.9	Etil-2-hidroxi-propanoato	1, 2, 3, 4, 5
19.28	Octanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
27.81	Decanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
35.1	Dodecanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
39.77	Hexadecanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
43.43	Octadecanoato de etilo	1, 2, 3, 4, 5
	Aldehídos y cetonas	
1.22	Acetoaldehído	1, 2, 3, 4, 5
13.07	3-hidroxi-2-butanona	1, 2, 3, 4, 5
	Ácidos	
20.1	Ácido acético	1, 2, 3, 4, 5
24.2	Ácido propiónico	1, 2, 3, 4, 5
32.12	Ácido pentanóico	2, 5
35.44	Ácido hexanóico	1, 2, 3, 4, 5
	Furanos	
10.02	2-pentilfuranol	1, 4
21.20	Furfural	1, 2, 4, 5
25.66	5-metil-furfuraldehído	1, 2, 4
	Terpenos	
8.15	Limoneno	1, 2, 3, 4, 5
29.96	α -terpineno	1, 2, 3, 4, 5
30.2	α -terpinol	1, 2, 3, 4, 5
	Otros	
11.5	4-etil-1,2-dimetil benzeno	1, 2, 3, 4, 5
22.79	Metil-2-penteno	1, 2, 3, 5
31.73	Naftaleno	1, 3, 5
43.1	1,8-nonadieno	2, 4
43.7	1-dodecino	2, 4

Compuestos secundarios encontrados por [40] en distintos tipos de mezcal: (1) Joven, (2) Joven con gusano, (3) Reposado, (4) Reposado con gusano y (5) Añejo

Apéndice 2: Series y propiedades de fluidos experimentales

Serie experimental	Muestra	Agua destilada (%vol.)	Etanol puro (%vol.)	Glicerina pura (%vol.)	Mezcal (%vol.)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad* (mPa · s)	Tensión superficial (mN/m)	Etanol total (%vol.)
Mezcales	1	0	0	0	100	919.00	3.0791	30.60	55
Mezcales	2	0	0	0	100	914.42	3.0791	28.70	48
Mezcales	3	0	0	0	100	926.86	3.0791	29.60	58
Mezcales	4	0	0	0	100	912.64	3.0791	29.20	41
Mezcales	5	0	0	0	100	933.75	3.0791	32.70	31
Mezcales	6	0	0	0	100	928.33	3.0791	29.90	52
Mezcales	7	0	0	0	100	949.11	3.0791	34.00	39
Sustancias puras	1	100	0	0	0	997.00	1.00	72.50	0
Sustancias puras	2	0	100	0	0	791.00	1.19	22.20	100
Sustancias puras	3	0	0	100	0	1,261.00	900.00	63.40	0
Mezcal adulterado	1	0	2	0	98	916.44	3.04	30.60	56
Mezcal adulterado	2	2	0	0	98	920.56	3.04	30.80	54
Mezcal adulterado	3	0	4	0	96	913.88	3.00	30.20	57
Mezcal adulterado	4	4	0	0	96	922.12	3.00	31.10	53
Mezcal adulterado	5	0	10	0	90	906.20	2.89	28.30	60
Mezcal adulterado	6	10	0	0	90	926.80	2.87	30.40	50
Mezcal adulterado	7	0	20	0	80	893.40	2.70	27.40	64
Mezcal adulterado	8	20	0	0	80	934.60	2.66	31.70	44
Mezcal adulterado	9	0	40	0	60	867.80	2.32	26.15	73
Mezcal adulterado	10	40	0	0	60	950.20	2.25	35.53	33
Mezcal adulterado	11	0	60	0	40	842.20	1.95	25.10	82
Mezcal adulterado	12	60	0	0	40	965.80	1.83	41.60	22
Mezcal surfactantes diluidos	1	23	28	0	50	901.35	2.09	28.70	55
Mezcal surfactantes diluidos	2	22	29	0	50	899.29	2.09	28.50	56
Mezcal surfactantes diluidos	3	24	27	0	50	903.41	2.09	28.80	54
Mezcal surfactantes diluidos	4	21	30	0	50	897.23	2.10	28.40	57
Mezcal surfactantes diluidos	5	25	26	0	50	905.47	2.09	29.10	53
Mezcla agua-etanol	1	97	3	0	0	990.82	1.09	66.78	3
Mezcla agua-etanol	2	91	9	0	0	978.46	1.26	55.34	9
Mezcla agua-etanol	3	90	10	0	0	976.40	1.29	53.43	10
Mezcla agua-etanol	4	83	17	0	0	961.98	1.65	46.63	17
Mezcla agua-etanol	5	80	20	0	0	955.80	1.81	43.71	20
Mezcla agua-etanol	6	70	30	0	0	935.20	2.31	37.16	30
Mezcla agua-etanol	7	62	38	0	0	918.72	2.56	34.54	38
Mezcla agua-etanol	8	60	40	0	0	914.60	2.62	33.88	40
Mezcla agua-etanol	9	32	68	0	0	856.92	2.78	27.87	68
Mezcla agua-etanol	10	30	70	0	0	852.80	2.79	27.45	70
Mezcla agua-glicerina	1	78	0	22	0	1,055.08	1.49	71.30	0
Mezcla agua-glicerina	2	58	0	42	0	1,107.88	2.76	69.40	0
Mezcla agua-glicerina	3	45	0	55	0	1,142.20	4.88	68.60	0

Tabla con las 6 series y 40 fluidos experimentales ensayados. Incluye para cada fluido las proporciones de mezcla que lo componen (agua destilada, etanol puro, glicerina pura y mezcal), las propiedades físicas obtenidas o estimadas (*) y el contenido total de etanol. Las muestras de la serie “Mezcales” corresponden a las mismas de la Tabla 2.2, del Capítulo 2. Las series “Mezcal adulterado” y “Mezcal surfactantes diluidos” se llevaron a cabo con el mismo mezcal “Los Sánchez” Espadín, que corresponde a la muestra 1 de la serie “Mezcales”.

APS Division of Fluid Dynamics Meeting 2016



Un avance del trabajo se presentó oralmente en el congreso anual 2016 de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Americana de Física

Abstract Submitted
for the DFD16 Meeting of
The American Physical Society

Long-life of a bubble on the surface of a water-alcohol mixture GIBRAN RAGE, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, J. FEDERICO HERNANDEZ-SANCHEZ, King Abdullah University of Science and Technology, MONICA M. WILHELMUS, University of California - Riverside, ROBERTO ZENIT, Universidad Nacional Autonoma de Mexico — The lifetime of superficial bubbles has been used traditionally to determine the alcohol content in distilled beverages and spirits. With the proper alcohol content, the bubbles, known as pearls, have a particularly long life which is much longer than that in either pure water or pure ethanol. To understand this peculiar behavior, we conducted controlled experiments in water-ethanol mixtures and in samples of mezcal, an artisanal agave spirit. We assess the effect of the changes in viscosity, surface tension and density of the liquids. Also, we analyzed the effects of surfactants and evaporation rate differences, which lead to Marangoni convection in the draining film.

Roberto Zenit
Universidad Nacional Autonoma de Mexico

Date submitted: 26 Jul 2016

Electronic form version 1.4

Bibliografía

- [1] D. B. Heath. *Drinking Occasions: Comparative Perspectives on Alcohol and Culture*. ICAP Series on Alcohol in Society. Routledge; 1 edition, 2000.
- [2] T. M. Wilson (editor). *Drinking Cultures: Alcohol and Identity*. BERG. Bloomsbury Academic, 1st edition, 2005.
- [3] M. P. Holt (editor). *Alcohol: A Social and Cultural History*. BERG. Bloomsbury Academic, 1st edition, 2006.
- [4] Adam Rogers. *Proof. The Science of Booze*. First Mariner Books Edition, 2015.
- [5] World Health Organization. *Global status report on alcohol and health 2014*. WHO, 2014.
- [6] Mari C. Serra Puche and Jesús C. Lazcano Arce. *El mezcal: una bebida prehispánica: estudio etnoarqueológicos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas, primera edición, 2016.
- [7] Mezcales Tradicionales de los Pueblos de México. *Los mezcales tradicionales de los pueblos de México: herencia cultural y biodiversidad*, 2005.
- [8] <http://turismo.mexplora.com>. Visitado: julio 2017.
- [9] www.taringa.net. Visitado: julio 2017.
- [10] Consejo Regulador del Mezcal. Dr. en C. Hipócrates Nolasco Cancino. Informe anual, 2017.
- [11] Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Secretaría de Economía (CCONNSE). Nom-070-scfi-2016, bebidas alcohólicas-mezcal-especificaciones, publicada en el DOF el 18 de agosto de 2016.
- [12] Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). Resolución mediante la cual se otorga la protección prevista a la denominación de origen mezcal, para ser aplicada a la bebida alcohólica del mismo nombre, publicado en el DOF el 10 de noviembre de 1994 con modificaciones en 2001, 2003, 2012 y 2015.
- [13] www.oronoticias.com.mx. Visitado: julio 2017.
- [14] realminero.com.mx. Visitado: julio 2017.
- [15] 2.bp.blogspot.com. Visitado: julio 2017.
- [16] alipususa.com. Visitado: julio 2017.

- [17] www.todomezcal.com. Visitado: julio 2017.
- [18] mezecologia.mx. Visitado: julio 2017.
- [19] ww2.revistappetit.com. Visitado: julio 2017.
- [20] Sarah Bowen. *Divided Spirits. Tequila, Mezcal, and the Politics of Production*. California Studies in Food and Culture. University of California Press, 1st edition, 2015.
- [21] Y. Zhu, H. N. Oguz, and A. Prosperetti. On the mechanism of air entrainment by liquid jets at a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 404:151–177, 2000.
- [22] A. K. Bin. Gas entrainment by plunging liquid jets. *Chemical Engineering Science. Pergamon Press*, 48(21):3585–3630, 1993.
- [23] R. M. Destsch and R. N. Sharma. The critical angle for gas bubble entrainment by plunging liquid jets. *The Chemical Engineering Journal*, 44:157–166, 1990.
- [24] H. Chanson, S. Aoki, and A. Hoque. Bubble entrainment and dispersion in plunging jet flows: Freshwater vs. seawater. *Journal of Coastal Research*, 22(3):664–677, 2006.
- [25] A. G. Bick, W. D. Ristenpart, E. A. van Nierop, and H. A. Stone. Bubble formation via multidrop impacts. *Physics of Fluids*, 22(042105), 2010.
- [26] B. Kersten, C. D. Ohl, and A. Prosperetti. Transient impact of a liquid column on a miscible liquid surface. *Physics of Fluids*, 15(3):821–824, 2003.
- [27] C. D. Ohl, H. N. Oguz, and A. Prosperetti. Mechanism of air entrainment by a disturbed liquid jet. *Physics of Fluids*, 12(7):1710–1714, 2000.
- [28] N. Q. Lu, H. N. Oguz, and A. Prosperetti. The oscillations of a small floating bubble. *Physics of Fluids*, 1(2):252–260, 1989.
- [29] L. Doubliez. The drainage and rupture of a non-foaming liquid film formed upon bubble impact with a free surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 17(6):783–803, 1991.
- [30] P. D. Howell. The drainage of a two-dimensional bubble. *Journal of Engineering Mathematics*, (35):251–272, 1999.
- [31] S. Sayantan and P. Ghosh. Coalescence of air bubbles in aqueous solutions of alcohols and nonionic surfactants. *Chemical Engineering Science*, (66):4824–4837, 2011.
- [32] W. D. Garrett. Stabilization of air bubbles at the air-sea interface by surface-active material. *Deep Sea Research*, 14:661–672, 1967.
- [33] Q. A. Zheng, V. Klemas, and Y. H. L. Hsu. Laboratory measurements of water surface bubble life time. *Journal of Geophysical Research*, 88(C1):701–706, 1983.
- [34] L. Duchemin, S. Popinet, C. Josserand, and S. Zaleski. Jet formation in bubbles bursting at a free surface.
- [35] J. M. Boulton-Stone and J. R. Blake. Gas bubbles bursting at a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 254:437–466, 1993.

- [36] J. S. Lee, B. M. Weon, S. J. Park, J. H. Je, K. Fezzaa, and W. Lee. Size limits the formation of liquid jets during bubble bursting. *Nature communications*, (1369), 2011.
- [37] <https://www.wpiinc.com/products/laboratory-supplies/>. Visitado: octubre 2017.
- [38] <https://www.slrlounge.com/samyangrokinon-100mm-f2-8-macro-lens-announced-600/>. Visitado: octubre 2017.
- [39] <http://www.kenrockwell.com/nikon/60mm-afd.htm>. Visitado: octubre 2017.
- [40] A. De León-Rodríguez, L. González-Hernández, A. P. Barba De La Rosa, P. Escalante-Minakata, and M. G. López. Characterization of volatile compounds of mezcal, an ethnic alcoholic beverage obtained from agave salmiana. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4):1337–1341, 2006.
- [41] A. M. Vera-Guzmán, R. I. Guzmán-Gerónimo, and M. G. López. Major and minor compounds in a mexican spirit, young mezcal coming from two agave species. *Czech Journal of Food Sciences*, 28(2):127–132, 2010.
- [42] I. Sadek Khattab, F. Bandarkar, M. A. Abolghassemi Fakhree, and A. Jouyban. Density, viscosity, and surface tension of water+etanol mixtures from 293 to 323 k. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29(6):812–817, 2012.
- [43] S. Cerimovic, R. Beigelbeck, H. Antlinger, J. Schalko, B. Jakoby, and F. Keplinger. Sensing viscosity and density of glycerol-water mixtures utilizing a suspended plate mems resonator. *Microsystem Technologies*, 18:1045–1056, 2012.
- [44] <http://www.test-mart.com/upLoad/Pro/2011-2/2011219104047110.jpg>. Visitado: noviembre 2017.
- [45] <http://www.technex.nl/nl/producten/52-nl/77/>. Visitado: noviembre 2017.
- [46] International Organisation of Legal Metrology. *International Alcoholometric Tables*. OIML, 1973.
- [47] J. A. Davidson. Foam stability as an historic measure of the alcohol concentration in distilled alcoholic beverages. *Journal of Colloid and Interface Science*, 81(2):540–542, 1981.
- [48] M. Ahmed and E. Dickinson. Effect of ethanol content on foaming of alcoholic beverages. *Food Hydrocolloids*, 4(1):77–82, 1990.
- [49] J. W. M. Bush. <https://ocw.mit.edu>. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare. License: Creative Commons BY-NC-SA. 18.357 Interfacial Phenomena. Fall 2010. Visitado: julio 2017.
- [50] J. W. M. Bush. <http://math.mit.edu/~bush/?p=87>. The dynamics of wine tears. Visitado: julio 2017.
- [51] <https://i.ytimg.com/vi/tgrTbvSnE50/hqdefault.jpg>. Why Does Wine Cry? Visitado: julio 2017.

- [52] A. E. Hosoi and J. W. M. Bush. Evaporative instabilities in climbing films. *Journal of Fluid Mechanics*, 442:217–239, 2001.
- [53] C. Cohen, B. Darbois Texier, E. Reyssat, J. H. Snoeijer, D. Quéré, and C. Clanet. On the shape of giant soap bubbles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 114(10):2515–2519, 2017.

