



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“Importancia de la viscosidad y
modelos reológicos en elaboración
de chocolate”**

P R E S E N T A:

CAMPOS MARRUFO FELIPE ALDAIR

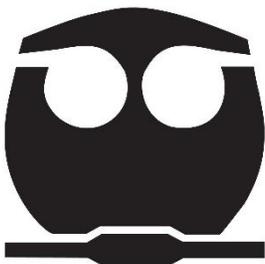
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN INGENIERIA QUIMICA

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. RUIZ TREJO RODOLFO

CIUDAD UNIVERSITARIA. CD.MX. 2022





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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente

RUIZ TREJO RODOLFO

Vocal

RIVERA TORRES FILIBERTO

Secretario

RODRIGUEZ CASTAÑEDA ILEANA

1er Suplente

PIMENTEL ALARCON MIGUEL ANGEL

2do Suplente

MANRIQUEZ TOLSA URSULA

ASESOR:

M.I. Ruiz Trejo Rodolfo

SUSTENTANTE:

Campos Marrufo Felipe Aldair

Índice de Contenido

Justificación	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Particulares.	2
Metodología de trabajo.....	2
1. Introducción.....	3
2. Concepto de viscosidad y las diferentes formas de definir y/o reportar la viscosidad de un fluido.....	9
2.1 Viscosidad de un fluido ⁵ :.....	9
2.2 Como reportar la viscosidad de un fluido:	11
2.3 Relaciones entre los conceptos anteriores:.....	12
3. Antecedentes sobre el cacao	12
3.1 El árbol del cacao.....	13
3.2 Las tres grandes variedades de cacao	14
3.3 Descubrimiento del cacao por los Olmecas	15
3.4 El comercio del cacao	16
3.5 Algunos años claves.....	19
3.6 Diferentes tipos de chocolate	20
3.7 Pautas para degustar el chocolate ²	21
3.8 El chocolate y la salud ²	21
4. Etapas del procesamiento de cacao y su relación con la viscosidad.....	22
4.1 Cultivo y cosecha ²	22
4.2 Desgrane ²	26
4.3 Fermentación ²	27
4.4 Secado ²	30
4.5 Criterios de selección y calidad de los granos de cacao ²	33
4.5 Ensacado y transporte ²	36
4.7 Limpieza de los granos ²	37
4.8 Trituración ²	39
4.9 Torrefacción ²	40

4.10 Molienda ²	51
4.11 Mezclado ²	62
4.12 Refinación ²	63
4.13 Conchado ²	72
4.14 Templado ²	85
4.15 Moldeo y embalaje.....	97
5. Principales parámetros que describen el flujo del chocolate fundido.	104
5.1 Viscosidad ¹⁴ :.....	106
5.2 Tamaño de partícula ² :	106
5.3 Efecto de las adiciones de grasa sobre la viscosidad ⁸ :.....	113
5.4 Flujo de humedad y chocolate ¹⁰ :	115
5.5 Emulsificadores y viscosidad de chocolate ⁶	117
5.5.1 Lecitina ⁵ :	119
5.5.2 Polirricinoleato de poliglicerol ² :	123
5.5.3 Otros emulsificantes ⁶ :	124
5.6 Grado de mezcla ² :	124
6. Definición de reología y los conceptos reológicos relacionados a un flujo controlado.....	126
6.1 Reología:.....	126
6.2 Fluido:.....	127
6.3 El tensor de esfuerzos:.....	128
6.4 Deformación y tasa de deformación:.....	128
7. Técnicas más frecuentes en investigación y control de calidad para determinar el comportamiento viscométrico-reológico del chocolate fundido.	128
7.1 Medición del tamaño de partículas ¹	128
7.1.1 Medición del tamaño de partículas: Sistema basado en la conductividad eléctrica ¹	129
7.1.2 Medición del tamaño de partículas: Sistema basado en la dispersión de la luz laser ¹	130
7.2 Determinación de la humedad ¹	131
7.3 Medición del contenido de grasa ¹	133
7.4.1 Determinación de la viscosidad: técnicas simples de fábrica ²	134

7.4.2 Determinación de la viscosidad: el método estándar ²	136
7.4.3 Determinación de la viscosidad: método actual por Resonador Torsional	139
8. Modelos reológicos más frecuentemente empleados para describir el comportamiento al flujo del chocolate fundido.²	143
9. Análisis de que un modelo reológico describa de manera más adecuada el comportamiento al flujo del chocolate.	145
10. Caso de estudio (referencia monográfica).	146
10.1 Obtención de pasta de Cacao.....	146
10.1.1 Adquisición de materia prima.....	146
10.1.2 Estableciendo criterio de tiempo y temperatura de tostado.....	147
10.1.3 Selección	153
10.1.4 Tostado	154
10.1.5 Descascarillado.....	156
10.1.6 Molturación de la haba o molienda	158
10.2. Caracterización de la pasta de cacao	161
10.3 Selección y caracterización de la manteca de cacao	164
10.4 Selección de las formulaciones y elaboración de chocolate-sésamo.....	164
10.5 Conchado de las formulaciones.....	168
10.6 Caracterización viscométrica de las mezclas	169
10.7 Procesamiento de los datos y análisis de resultados	171
Conclusiones	177
Referencias Bibliográficas.....	178
Referencias de Imágenes	181

Justificación

En la actualidad la mejora constante ha sido el reto de todas las empresas para lograr un desarrollo y una evolución en sus productos y procesos, la industria chocolatera no es una excepción. De esta manera, el control adecuado de calidad en la elaboración y confección de chocolates es y seguirá siendo una ventaja competitiva en el mercado del chocolate. El chocolate puede describirse como una suspensión que consiste en partículas sin grasa consistentes en azúcar y sólidos de cacao dispersadas en manteca de cacao como una fase continua. Los chocolates fundidos representan una mezcla densa de partículas de sacarosa y cacao recubiertas con grasa líquida. El tamaño de partícula y el mencionado recubrimiento de estas partículas por grasa son parámetros importantes para lograr las características deseables del producto final, influyen así mismo en el comportamiento al flujo del chocolate, por lo que estos parámetros pueden ser monitoreados durante el procesamiento del chocolate, mediante determinaciones reológicas, particularmente viscométricas.

En el presente estudio, se identificará el papel que desempeña la viscosidad del chocolate en las diferentes etapas del procesamiento de cacao y los modelos reológicos frecuentemente empleados para describir su comportamiento al flujo. A fin de manejar adecuadamente los conceptos relacionados a la viscosidad, se investigará el punto de vista reológico del fenómeno, se identificarán las diferentes definiciones o formas de reportar viscosidad y la relación entre ellas. Se identificarán las técnicas de caracterización reológica-viscométrica, se analizarán desde el punto de vista práctico y de aplicación funcional a fin de efectuar una comparación entre ellas. Los resultados de las determinaciones reológicas, particularmente las viscométricas deben ser interpretadas a la luz de los modelos reológicos aplicables al chocolate fundido, por lo que se realizará una comparación entre ellos.

Objetivo General.

Identificar el papel que desempeña la viscosidad del chocolate en las diferentes etapas del procesamiento de cacao y los modelos reológicos frecuentemente empleados para describir su comportamiento al flujo.

Objetivos Particulares.

- Realizar una revisión bibliográfica de inicio, para familiarizarse con las diferentes etapas del procesamiento del cacao, para la elaboración de chocolate.
- Investigar el punto de vista reológico del fenómeno, identificando las diferentes definiciones o formas de reportar la viscosidad y la relación entre ellas, a fin de manejar adecuadamente los conceptos relacionados a la viscosidad.
- Describir las etapas de procesamiento de cacao, con objeto de identificar los aspectos relativos a la viscosidad, el papel que tiene la misma en cada etapa, y las causas que le afectan.
- Identificar los principales parámetros que describen el comportamiento al flujo del chocolate y la manera de afectarlos en beneficio de las propiedades deseables del producto final.
- Identificar las técnicas de caracterización reológica-viscométrica, analizar desde el punto de vista práctico y de aplicación funcional a fin de efectuar una comparación entre ellas.
- Identificar los modelos reológicos típicos que se aplican a la descripción del comportamiento al flujo del chocolate fundido, para establecer una diferenciación entre ellos.

Metodología de trabajo

Se revisarán tesis, artículos de revistas, libros y páginas web que describan: cada una de las etapas del procesamiento del cacao, el concepto de viscosidad, los parámetros que describen el flujo del chocolate fundido, la definición funcional de la reología, las técnicas más frecuentes en investigación y control de calidad, y los modelos reológicos más frecuentemente empleados para describir el comportamiento al flujo del chocolate fundido.

1. Introducción

La industria nacional se encuentra en desventaja tecnológica frente a las grandes empresas del comercio de cacao y de la producción de chocolate. La investigación intensiva que realizan las empresas transnacionales no siempre está disponible para su consulta, por lo que es importante el desarrollar investigación accesible a las empresas emergentes que desean trascender de la producción artesanal.

Durante el procesamiento de cacao se hace necesario mover, transportar los materiales, inyectarlos para moldear, espumarlos, o depositarlos simplemente para recubrir. Por esta razón es necesario describir el comportamiento al flujo de estos productos; de igual manera es posible relacionar las características de producto final, tal como la vida de anaquel, y aquellas sensoriales, que tienen conexión con las propiedades de flujo.

Las propiedades reológicas del chocolate fundido son importantes durante el procesamiento y para fines de aseguramiento de calidad. El chocolate fundido se comporta al flujo como un líquido no-Newtoniano, presentando un comportamiento plástico no ideal, acompañado de un esfuerzo umbral, relacionado a la cantidad de energía requerida para iniciar el flujo del fluido, y una viscosidad plástica, energía requerida para mantener el fluido en movimiento.

En el presente trabajo se busca principalmente recopilar de forma monográfica toda información confiable y precisa sobre la producción de chocolate así como la descripción del comportamiento viscoso de formulaciones de chocolate fundido durante todo el proceso de elaboración de manera comercial, los modelos reológicos que rigen dicho comportamiento y una demostración experimental que soporte todo lo anterior, siendo así poniendo como antecedentes lo siguiente.

“En su Boletín Trimestral de Estadísticas del Cacao, la Organización Internacional del Cacao (ICCO, 2021) estima que la producción total a nivel mundial se ha incrementado ligeramente en casi 1% durante la campaña 2019/20, pues de 4 697 miles de toneladas

creció a 4 726 miles de toneladas. A ese respecto, los ajustes correspondieron, principalmente, a Perú (incremento de 28 miles de toneladas), Costa de Marfil (aumento de 5 miles de toneladas) y Papúa Nueva Guinea (descenso de 4 miles de toneladas).

Para la campaña 2020/21, se prevé que la producción mundial de cacao aumente en 2,5%, es decir, se situaría en 4 843 miles de toneladas, en virtud de que se presentarían mejores condiciones climatológicas en las principales regiones productoras, tales como África, que incrementaría en 3% y se situaría en 3,684 millones de toneladas; asimismo, Asia y Oceanía crecerían en 2%, esto es, se elevaría a 278 miles de toneladas. En cambio, es previsible que la producción de las Américas disminuya ligeramente en 1%, vale decir, a 881 miles de toneladas.

En términos de cuota de la producción mundial total, África es la mayor región productora, con un 76% de la producción total; las Américas y Asia y Oceanía se estiman en 18% y 6%, respectivamente.”¹⁷

	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020*	2020/2021**
Total Mundo	4 252	3 994	4 768	4 648	4 697	4 726	4 843
1 Costa de Marfil	1 796	1 581	2 020	1 964	2 154	2 105	2 150
2 Ghana	740	778	970	905	812	800	850
3 Ecuador	261	232	290	287	322	328	340
4 Camerún	232	211	246	250	280	280	280
5 Nigeria	195	200	245	250	270	250	270
6 Indonesia	325	320	270	240	220	200	200
7 Brasil	230	141	174	204	176	201	180
8 Perú	92	105	115	134	136	153	150
9 República Dominicana	82	80	57	85	75	75	75
10 Colombia	51	53	55	55	59	64	65
Subtotal	4 004	3 700	4 441	4 373	4 504	4 456	4 560
Otros	248	294	327	275	193	270	283

Fuente: ICCO

Elaboración: MIDAGRI/DGPA-DEE

* Estimado revisada a marzo 2021

** Previsiones

Tabla 1.1. Principales Productores de Cacao (miles de Toneladas)

“México ocupa el decimotercer lugar en producción a nivel mundial con 28 mil toneladas con una superficie de 117,000 ha, pero necesita cerca 120 mil toneladas para cubrir su demanda interna. En Tabasco 10 de los 17 municipios que comprenden el estado se dedican al cultivo del cacao, siendo los más destacados Comalcalco, Cárdenas, Cunduacán y Huimanguillo los cuales producen en conjunto el 87% de la producción de dicho estado.

Tabasco, aporta el 66.9% del volumen de producción nacional con 17 mil 281 toneladas cosechadas en una superficie de 41 mil hectáreas; le sigue Chiapas con el 32.9%, en 9 mil 346 toneladas y Guerrero solamente con 236 toneladas, lo que representa el 0.2%. Son pocos los estados productores en nuestro país, pero por sus climas y tipo de suelos Veracruz y Nayarit tienen gran potencial para el cultivo del cacao.”¹¹

“Durante las últimas campañas de 2013/14 a 2019/20, las importaciones mundiales de cacao en grano crecieron de manera sostenida a una tasa promedio anual de 2,0%. Cabe mencionar que la demanda del cacao en grano proviene de la industria que produce chocolates, confites, alimentos procesados, entre otros. De esta manera, los principales países importadores son la Unión Europea (Países Bajos, Alemania, Bélgica, Francia, España y Reino Unido) y los Estados Unidos.

En la campaña 2019/20, las importaciones mundiales de cacao en grano disminuyeron en 13,4% respecto a la campaña anterior. Esto es explicado por el descenso de las importaciones de Indonesia, con una caída del 29,2%; Países Bajos, con 28,8%; España, con 21,0%; y Alemania, con 16,1%, entre los más importantes.

En tanto, los principales países importadores han sido Países Bajos (24,1% de participación), Alemania (11,1%), Estados Unidos (10,5%), Malasia (9,7%) y Bélgica (8,7%).”¹⁷

Los importadores de chocolate en las campañas de 2013/14 a 2019/20 como producto terminado se observan en la siguiente imagen:

Importadores	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
Mundo	3 094	3 021	3 252	3 892	3 472	4 031	3 491
1 Países Bajos	651	703	819	906	827	1 182	842
2 Alemania	245	301	343	555	411	462	387
3 Estados Unidos	437	479	421	503	340	373	365
4 Malasia	299	222	214	302	314	364	340
5 Bélgica	264	246	304	301	211	317	303
6 Indonesia	109	53	61	190	260	259	183
7 Francia	138	133	149	147	153	139	130
8 Turquía	91	85	87	97	94	111	120
9 España	109	106	111	121	104	104	82
10 Reino Unido	60	58	43	88	50	86	88
52 Perú	0	0	1	0	0	2	2
SUBTOTAL	2 403	2 386	2 553	3 211	2 764	3 399	2 843
Otros	691	635	699	681	708	632	648

Fuente: ICCO

Elaboración: DGPA-DEE

Tabla 1.2. Importadores de cacao en granos (en miles de toneladas)

“Con relación a las exportaciones mundiales de cacao en grano de las campañas del 2013/14 al 2019/20, se mantuvo un dinamismo creciente con un 1,5% de aumento promedio anual. Así, entre los principales países exportadores que destacaron con su creciente comportamiento, se considera a Ecuador (7,9%), Costa de Marfil (5,4%) y Camerún (3,0%) Durante la campaña 2019/20, la exportación mundial de cacao en grano mostró un volumen de 3 095 miles de toneladas que, sumadas a las reexportaciones realizadas básicamente por la Unión Europea, suman un total de 3 491 miles de toneladas. Si se compara con el mismo periodo del año anterior, se observa una caída del 13,4% (3 621 mil toneladas más 410 mil toneladas, hacen un total de 2 159 mil toneladas). Esto se explicaría por los menores envíos de los países como Republica Dominicana (67,4%), Malasia (29,4%), Ghana (19,6%) y Países Bajos (17,0%). Cabe precisar que las exportaciones que realizan los países de la Unión Europea (Bélgica y Países Bajos) responden a una reexportación del cacao proveniente de distintos países productores.

No obstante, la UE es el más grande centro de molienda para los países en desarrollo y el mercado mundial más grande para los productos de cacao procesado.”¹⁷

Exportadores	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20
Mundo	3 188	2 626	2 980	3 892	3 472	4 032	3 491
1 Costa de Marfil	1 117	1 286	1 056	1 562	1 530	1 567	1 530
2 Ghana	-	-	581	611	525	649	522
3 Ecuador	199	236	227	285	288	314	314
4 Camerún	193	238	264	236	178	273	230
5 Bélgica	135	161	187	97	114	168	170
6 Países Bajos	197	172	139	222	110	193	160
7 Malasia	94	71	91	90	104	109	77
8 Perú	47	59	62	78	66	64	54
9 República Dominicana	68	80	74	66	82	65	21
10 Sierra Leona	0	4	10	23	15	14	20
Subtotal	2 051	2 308	2 691	3 270	3 012	3 417	3 098
Otros	1 137	318	289	622	460	615	393

Fuente: ICCO

Elaboración: DGPA-DEE

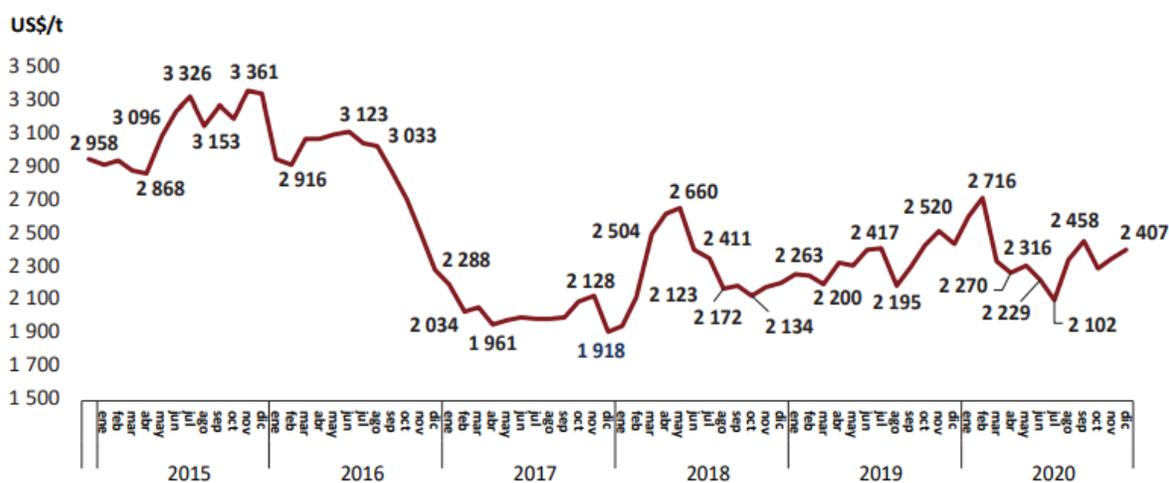
Tabla 1.3. Exportadores de cacao en grano (en miles de toneladas).

“A partir del mes de marzo, debido a la COVID-19, la cuarentena en Italia, España, Francia, Gran Bretaña, otros países europeos y los Estados Unidos ha reducido el consumo, lo cual ha afectado fuertemente la demanda europea de chocolate y otros insumos de cacao por parte de las plantas de procesamiento. En los siguientes meses, el precio del cacao en grano mantuvo una tendencia decreciente, aunque con ligeras variaciones; por lo que, en mayo, se alcanzó la cifra de USD \$ 2,325 por tonelada; en julio, cayó a un precio piso de USD \$ 2,101 por tonelada; a partir de agosto, se observó una ligera recuperación de los precios en la medida que la economía mundial tiende a mejorar y los países a flexibilizar sus medidas de confinamiento, de ahí que el precio mostró un incremento a un valor de USD \$ 2,349 y USD \$ 2,458 por tonelada en los meses de agosto y septiembre, respectivamente.

Durante los meses octubre-diciembre 2020, los precios de cacao registraron distintos comportamientos. Durante octubre, los precios descendieron a USD \$ 2,292 por tonelada, pero experimentaron una notable recuperación durante noviembre y diciembre, pues oscilaron en USD \$ 2,358 y USD \$ 2,407 por tonelada,

respectivamente. El comportamiento de los precios se atribuía a la expectativa de una cosecha abundante en Costa de Marfil para el año cacaotero 2020/21 y a la perspectiva de cierta disminución de la demanda de productos de cacao y chocolate.

Los precios del contrato de futuros de cacao de próximo vencimiento (MAR-21) se situaron en una media de USD \$ 2,299 por tonelada, fluctuando entre USD \$ 2,261 y USD \$ 2,374 por tonelada en Londres. En Nueva York, se situaron en una media de USD \$ 2,561 por tonelada, oscilando entre USD \$ 2,502 y USD \$ 2,665 por tonelada. Durante el mismo período, las llegadas acumuladas de cacao en grano en los puertos de Costa de Marfil al 27 de diciembre registraban una caída interanual del 3,3%, disminuyendo de 1,09 miles de toneladas a 1,06 miles de toneladas, y en las regiones cacaoteras de África Occidental, se reportó una disminución inferior a la media. Cabe señalar que las bajas llegadas se debieron a la acumulación de granos de cacao en el interior del país.”¹⁷



Fuente: ICCO

Elaboración: DGPA-DEE

Figura 1.1. Precios mensual internacional (Cacao en grano ICCO).

2. Concepto de viscosidad y las diferentes formas de definir y/o reportar la viscosidad de un fluido

2.1 Viscosidad de un fluido⁵:

- Esta propiedad es una de las más importantes en el estudio de los fluidos y se pone de manifiesto cuando los fluidos están en movimiento. La viscosidad de un fluido se define como su resistencia al corte. Se puede decir que es equivalente a la fricción entre dos sólidos en movimiento relativo.
- La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales y se debe a las fuerzas de cohesión moleculares. Todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal.
- La viscosidad solo se manifiesta en líquidos en movimiento. Se ha definido la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. Generalmente se representa por la letra griega μ .

La viscosidad se ha descrito como "la resistencia al movimiento cuando se agita o se vierte". Sin embargo, no se describe necesariamente con un solo número. La pintura que no gotea o el ketchup de tomate son ejemplos cotidianos de materiales con propiedades de flujo complejas. La lata de pintura o el frasco de ketchup se pueden volcar con cuidado y quitarles la tapa, y el contenido permanecerá inicialmente en su sitio. Si, por el contrario, se agitan con fuerza justo antes de darles la vuelta, se verterán como líquidos bastante finos. Podemos considerar la viscosidad o la consistencia como una fricción interna al movimiento⁵. Cuando el movimiento es fácil (es decir, los materiales fluidos) hay poca fricción, pero para los materiales espesos la fricción es alta. Para ello es útil reconsiderar la idea de cizallamiento (Figura 2.1).

Si el líquido tiene dos superficies planas, cada una de ellas con un área A y una distancia h , que se mueven a velocidades v_1 y v_2 , entonces, a partir de la definición anterior, tenemos una tasa de cizallamiento (D) de $(v_1+v_2)/h$. Como la velocidad tiene las unidades de longitud dividida por el tiempo y estamos dividiendo esto por una

longitud, h , la tasa de cizallamiento debe tener las unidades de 1/tiempo y normalmente se mide en s^{-1} (segundos recíprocos).

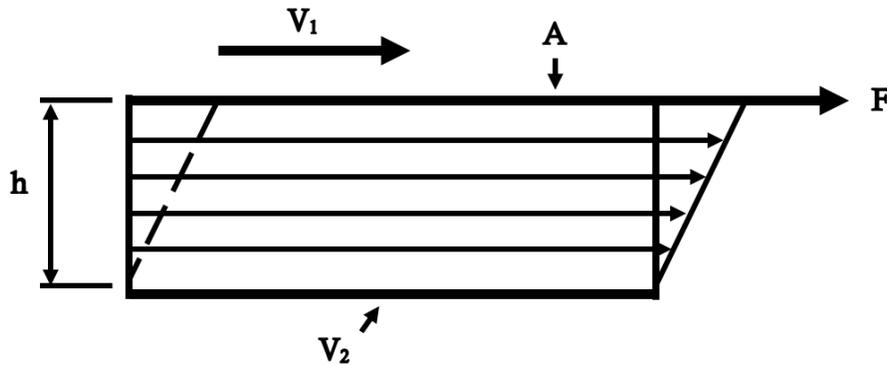


Figura 2.1. Diagrama que ilustra el cizallamiento. v_1 = velocidad ($cm\ s^{-1}$); v_2 = velocidad en el plano inferior; A = superficie del plano (cm^2); F = fuerza; h = distancia entre los planos (cm).

La fuerza necesaria para desplazar el plano superior con respecto al inferior se denomina esfuerzo cortante (τ). Si representamos la velocidad de corte frente al esfuerzo cortante, es decir, la velocidad a la que se mueve el líquido a medida que diferentes fuerzas lo empujan, se obtienen diferentes curvas, dependiendo del tipo de material que se esté midiendo.

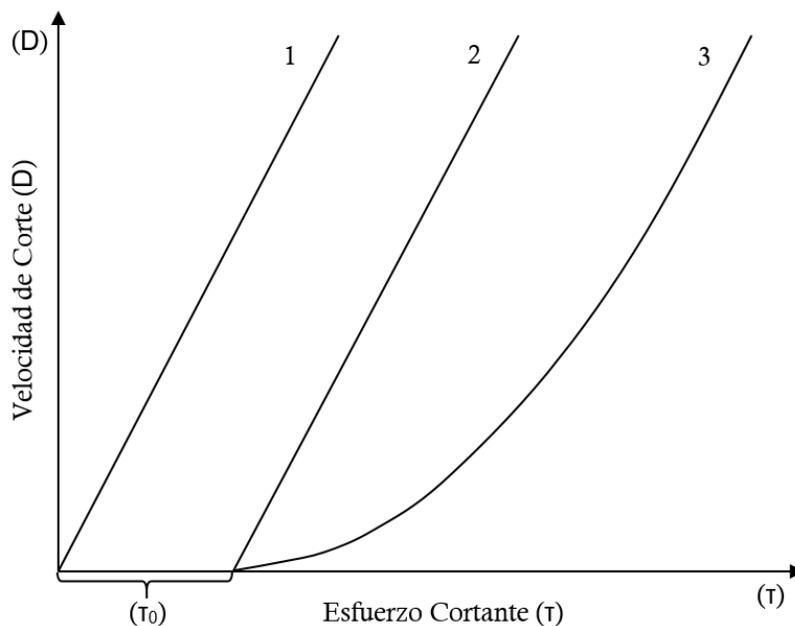


Figura 2.2. Diferentes tipos de curva de flujo (1) Newtoniano; (2) Bingham; (3) pseudoplástico (por ejemplo, chocolate).

Como se ilustra en la figura 2.2, la viscosidad es el gradiente de la línea, que para el líquido mostrado en la curva 1 es el mismo para todas las velocidades de cizallamiento. Por tanto, si duplicamos la fuerza sobre este líquido, se moverá el doble de rápido. Esto se conoce como un líquido newtoniano, ya que fue descrito matemáticamente por primera vez por Sir Isaac Newton. Las sustancias como el jarabe de oro son newtonianas, pero la gran mayoría de los alimentos no son newtonianos y siguen una gran variedad de otras curvas. La curva 2 muestra una sustancia que no se mueve cuando se le aplican fuerzas menores, como ocurrió al invertir la pintura o el ketchup. Sin embargo, una vez que empieza a moverse, se comporta como un líquido newtoniano. Estas sustancias se conocen como líquidos de Bingham. ⁸

2.2 Como reportar la viscosidad de un fluido:

La viscosidad puede ser reportada de dos maneras:

La viscosidad dinámica o simplemente viscosidad (η) que se define como la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte (D), es decir:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (2.1)$$

Las unidades de viscosidad son los Pascales-segundo (Pa*s), aunque también se siguen utilizando las antiguas unidades de Poise (0,1 Pa*s), que es definido como la fuerza (medida en dinas) necesaria para mover un centímetro cuadrado sobre una superficie paralela a la primera a la velocidad de 1 cm por segundo, con las superficies separadas por una película lubricante de 1 cm de espesor.

La viscosidad cinemática (ν) que relaciona la viscosidad dinámica (η) con la densidad del líquido (ρ). Teniendo el valor de la viscosidad dinámica se puede calcular la viscosidad cinemática:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

En esta medida, la viscosidad es la resistencia de un fluido al deslizamiento, y la densidad es el peso específico (masa/volumen) dividido por la gravedad. Las unidades de la viscosidad cinemática utiliza la unidad específica en el Sistema Cegesimal de Unidades (CGS) Stoke (St), que es definido como la fuerza necesaria para mover un centímetro cuadrado por segundo.

2.3 Relaciones entre los conceptos anteriores:

Básicamente, la relación es mutua debido a que el hecho de medir como fluye o “resbala” un fluido correspondiente a fuerzas externas que se aplican para poder desplazar las fuerzas que mantienen en reposo a un fluido y que este logre moverse, pueda reportarse en la literatura para consultas a futuro. Correspondiente al tiempo que las partículas sólidas del chocolate tardan en llegar a los receptores depende de la viscosidad, por ejemplo, un aceite de motor viscoso se desliza lentamente por un tubo, pero continuará siendo menos denso que el agua al flotar sobre ella. En este caso, el agua es menos viscosa, pero más densa que el aceite, esto significa que dos chocolates hechos con ingredientes idénticos, pero procesados para dar diferentes viscosidades, tendrán un sabor muy diferente. ¹⁴

3. Antecedentes sobre el cacao

El chocolate es un producto sorprendente, tan aplicable en su consumo, que no hay casa que no tenga chocolate en reserva para alguna ocasión que se presente. Sin embargo a pesar de su popularidad, de estar presente en la vida cotidiana, a pesar de lo común que se ha venido a hacer su uso, lejos de desmerecer por la generalidad de su costumbre, aumenta progresivamente de día en día su aprecio y popularidad, encontrándole nuevas aplicaciones y bondades para el ser humano, quien a través de los tiempos lo sigue venerando.



Figura 3.1. El cacao y el chocolate

3.1 El árbol del cacao

Su nombre viene del griego (*Theobroma Cacao*, que significa literalmente, alimento de los dioses), es un árbol tropical que crece solo en climas calientes y húmedos. Es por eso que su cultura está limitada a las regiones que se sitúan a 20 grados de latitud Norte y 20 grados de latitud Sur. Es un árbol delicado y exigente: le hacen falta una temperatura constante de cerca de 24-26 grados centígrados, lluvias abundantes y regulares, y un suelo rico en potasa, en nitrógeno y en oligo-elementos. Cuando es joven el árbol del cacao es muy sensible al sol y al viento, por lo que necesita desarrollarse a la sombra de otras plantas a las que llaman “madres del cacao” tales como el banano el algodón o el caucho. A los tres años ya mide cerca de 5 metros y puede alcanzar 8 a la edad de 10 años. Un árbol puede vivir hasta treinta o cuarenta años, pero en las plantaciones los árboles de cacao son reemplazados por otros jóvenes a partir de 25 años.¹³



Figura 3.2. Árboles del cacao

3.2 Las tres grandes variedades de cacao

El cacao produce millares de flores todo el año y su polinización se asegura solamente por pequeñas moscas del género *Forcipomyia*. Solamente un 5 a un 10% de las flores son fecundadas por lo que habrá que esperar del orden de 5 meses para que un fruto, bajo la forma de una mazorca se forme. Aunque existe gran variedad en clases de cacao, comercialmente son conocidas tres grandes variedades: Criollo, Forastero y Trinitario.¹²



Figura 3.3. Tipos de cacao (izquierda a derecha); Criollo, Forastero y Trinitario

- **Los criollos:** esta variedad representa los cacaos originales, las plantaciones más antiguas se remontan al siglo XVII. Al principio se cultivaba en Venezuela, América Central y en México, hoy la podemos encontrar también en Ecuador, Nicaragua,

Guatemala y en Sri Lanka. Está considerado como el “príncipe de los cacaos”, esta variedad es famosa por su finura y sus aromas, pero solo representa el 5% de la producción mundial debido a que es muy frágil ante las enfermedades y frente a los insectos. Principalmente se destina a la chocolatería de alta gama.

- **Los forasteros:** este grupo es muy diversificado y su variedad es mucho más resistente y productiva que el criollo. Al principio se cultivaba solo en la Alta Amazonia, hoy, constituye la producción principal de África del oeste y es el 80% de la producción total mundial. Su calidad es ordinaria, (su aroma es poco pronunciado y su amargura es fuerte y corta), se usa para la fabricación de los chocolates corrientes.
- **Los Trinitarios:** provienen de Trinidad y es un híbrido biológico natural entre criollos y forasteros. No tiene atributo puro a su especie y la calidad de su cacao varía de media a superior, con un contenido fuerte en manteca de cacao. Representa el 15% de la producción mundial.

3.3 Descubrimiento del cacao por los Olmecas

Los Olmecas (1500 a 400 A.C.) fueron los primeros humanos en saborear¹⁹, en forma de bebida, las habas de cacao molidas, mezcladas con agua y con aditivos de especias, principalmente guindillas, y ellos fueron quienes comenzaron a cultivar el cacao en México. Con el paso de los siglos, la cultura del cacao se extendió a las poblaciones Mayas (600 A.C) y aztecas (1400 A.C). El haba era utilizada entonces como unidad monetaria y como unidad de medida y así, 400 habas valían lo mismo que un zontli¹.

1. Conforme al sistema numeral de los mexicanos, la base para contar los cacaos era el número 20: así, 400 cacaos formaban un zontli; Zontli quiere decir en mexicano "cuatrocientos" y hasta hoy es costumbre vender la leña por zontles de cuatrocientas rajas veinte zontles, ó sean 8000, un xiquipilli, y tres xiquipilli una carga, la cual, por consiguiente, tenía 24000 granos.¹³

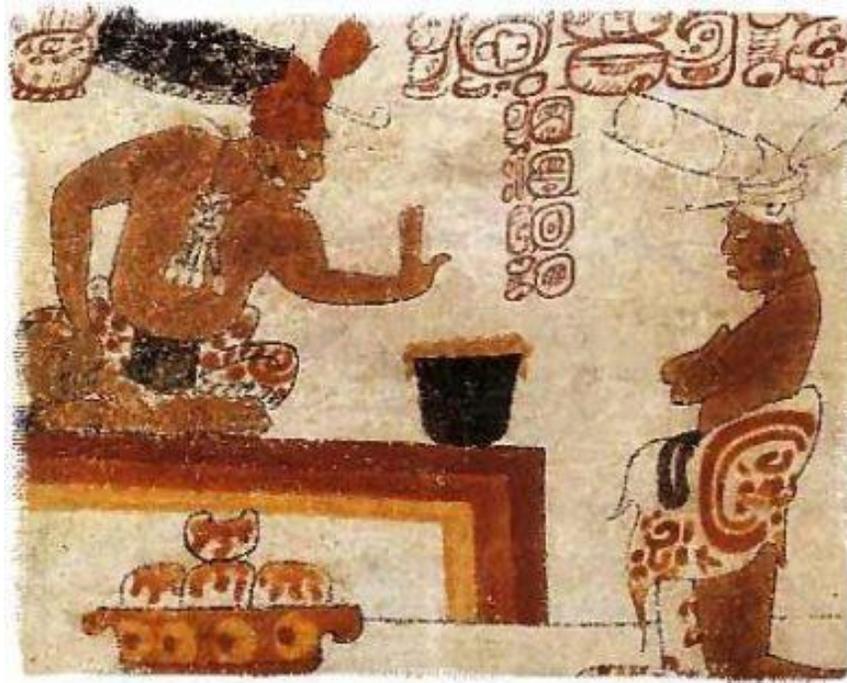


Figura 3.4. Imagen que ilustra el cacao en la vida diaria de los mayas con un par de cazuelas llenas de granos de cacao.

En tiempo de guerra entre Aztecas y Mayas, se utilizaba el haba como impuesto en las zonas conquistadas. Para estas civilizaciones el cacao era un símbolo de abundancia que era empleado en el momento de rituales religiosos dedicados a Kukulcán, dios azteca portador del cacao a los hombres. La cultura del cacao a través de las migraciones, se fue extendiendo a Meso-América, pero el consumo de la bebida quedó como un privilegio solo reservado a las clases superiores y los soldados durante las batallas, por sus virtudes revitalizantes y tonificantes.¹³

3.4 El comercio del cacao

En 1502, en una escala en Nicaragua, Cristóbal Colón ve las habas de cacao a bordo de una piragua indígena, pero no le da importancia. El verdadero valor de este “Oro moreno” lo revela Hernán Cortés, quien después de haberlo saboreado al lado del emperador azteca Moctezuma, lo trae a la corte de España en 1528 con los accesorios necesarios para fabricar el delicioso brebaje. Es Hernán Cortés quien después de las victorias contra los aztecas y de anulación total de aquella civilización, empieza la

intensificación de la cultura del cacao sobre las tierras de la Nueva España con el fin de establecer un comercio lucrativo con la vieja Europa.⁷

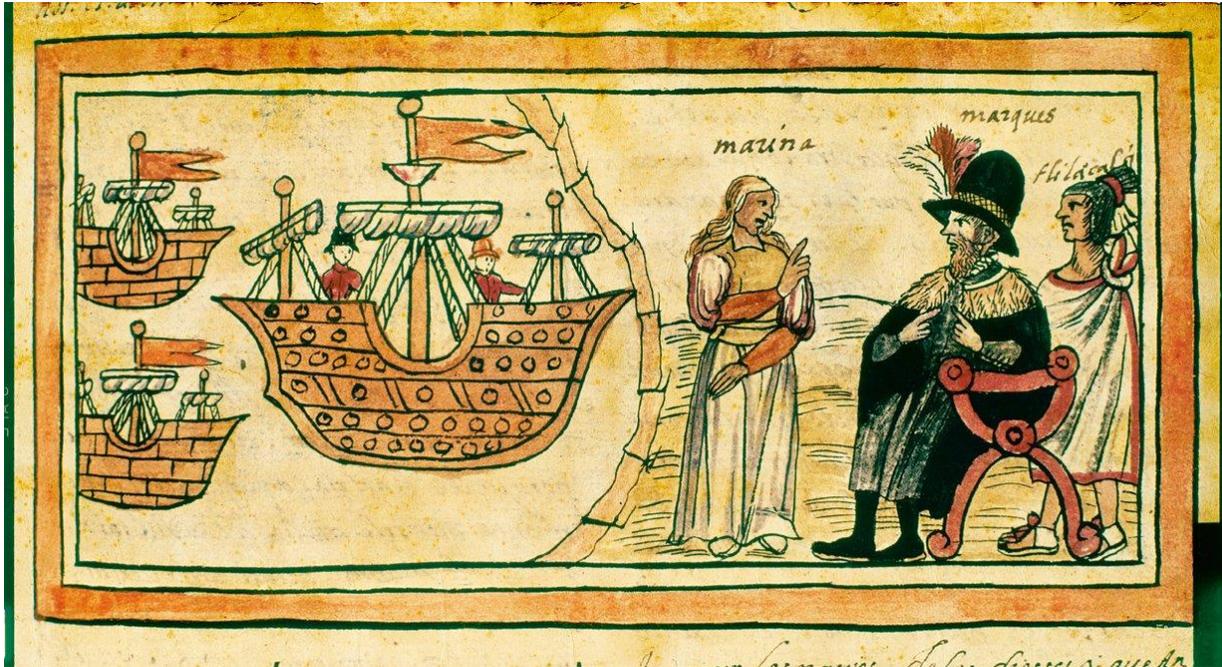


Figura 3.5. Malinche y Hernán Cortes, según el Códice Durán

La Corte Española se rinde a los sabores exóticos de esta bebida y empiezan a añadir otros condimentos al gusto como el azúcar, canela, anís o vainilla. En 1585, el comercio del cacao comienza a desarrollarse en La Península Ibérica con un cargamento oficial que llega de Nueva España y las buenas chocolaterías se distinguen por ofrecer este maravilloso néctar. Los españoles, que controlaron la oferta de cacao hasta finales del siglo XVII, mantuvieron en secreto su manufactura durante casi un siglo.

Durante el siglo XVII, el cacao se revela al resto de Europa y conquista sobradamente todos los palacios. La princesa española Ana de Austria, casada con Luis XIII de Francia es quien introduce el cacao en ese país en forma de bebida chocolateada, que no faltaba en la Corte. En 1650, el chocolate emerge en Inglaterra en forma de bebida, al tiempo que se sirven té de China o café de Oriente, aunque la bebida del cacao queda reservada para las clases acomodadas.¹³

En 1659 abre sus puertas la primera fábrica de chocolate en París, en 1720 las chocolaterías italianas son famosas por la calidad de sus productos. El chocolate conoce una expansión creciente a través de Europa, por todo el mundo. Las primeras pastillas de chocolate son inglesas (1674), el primer cacao en polvo es holandés (1828), la tableta es una creación británica (1830) y más tarde Suiza presenta sus creaciones de chocolate con leche y luego con avellanas. La era industrial trajo consigo cambios fundamentales para el chocolate. España, el primer exportador de chocolate abre su primera fábrica en 1780 en Barcelona, luego en Alemania y Suiza.



Figura 3.6. Primera fábrica de chocolates “Menier” en Noisiel-Sur-Marne

Con la colonización creciente de África por los europeos, el cacao se introdujo en ese continente y con tanto éxito desde entonces, que desde principios del siglo XX África es el productor más grande de cacao. Gracias a este desarrollo industrial, el chocolate comienza lentamente su divulgación y se generaliza el consumo haciéndolo accesible en todos los hogares.¹³

3.5 Algunos años claves

- **1776**, El francés Doret inventa una máquina hidráulica que puede moler las habas de cacao en una pasta que favorece así la producción de chocolate en grandes cantidades.
- **1826**, Philippe Suchard inventa una batidora para la mezcla del azúcar con el cacao en polvo.
- **1828**, En los Países Bajos, el químico Coenraad Van Houten inventa un procedimiento para extraer la manteca de cacao y también permitir la extracción del polvo de cacao. Esto va a permitir fabricar un chocolate más homogéneo y menos costoso de producir.
- **1840**, El suizo Rudolf Lindt, mezcla la manteca de cacao con la pasta de cacao, obteniendo un chocolate más dulce que es el que usamos actualmente, su chocolate era mucho más fino y blando que el de sus rivales, además, tenía la propiedad de fundirse, por lo que inventó una máquina a la que llamó “Concha”, por su forma, a partir de aquí el chocolate podía tomar la forma del molde que se eligiera.
- **1842**, el inglés John Cadbury fabrica por primera vez el chocolate para comer, ya que la mayor parte se venía haciendo para beber. Para lograrlo al cacao le añadió vainilla y azúcar consiguiendo así un producto muy comercial y exquisito.
- **1847**, El inglés Joseph Frey crea un nuevo producto, la manteca de cacao y logra el primer chocolate en tableta, que además de manteca de cacao contenía azúcar y licor.
- **1850**, El Suizo Charles-Amédée Kohler, inventó el chocolate con avellanas.
- **1875**, Daniel Peter inventa el método para hacer chocolate con leche, gracias a la combinación del cacao con la leche condensada, inventada siete años antes por Henry Nestlé.
- **1883**, Tuvo lugar el gran descubrimiento de los hermanos Stollwerck, su laminadora de cinco cilindros, consiguiendo así chocolate en finas láminas.
- **1903**, Ludwig Stollwerck y Thomas A. Edison (el inventor de la bombilla), desarrollaron un gramófono que podía tocar con discos LP hechos de chocolate, se llegaron a lanzar más de trescientos discos distintos y con ellos siempre existía la posibilidad de comérselos una vez escuchada su música.

- **1901**, Se fabrica en Austria el primer chocolate Milka (de milk, leche y de kakao, cacao).
- **1908**, Theodor Tobler y su primo Emil Baumann fabrican en Berna, la primera tableta triangular del famoso chocolate Toblerone, con leche, miel y turrón.

3.6 Diferentes tipos de chocolate

Existe una gran variedad de chocolates y sus nombres están relacionados de alguna manera con los productos que se mezclan con la pasta de cacao. Pero en realidad esta casi infinita variedad, parte de tres o cuatro materias primas básicas que deben su nombre a su contenido de cacao; los más conocidos son²:

- **Negro**: es crema de cacao con azúcar. Todas las presentaciones existentes dependen de su contenido de crema de cacao. Que puede llegar hasta el 70%.
- **Blanco**: es el que no utiliza la pasta de cacao en su fabricación, sino solamente la manteca de cacao combinada con azúcar en polvo y leche.
- **De cobertura**: es un chocolate muy rico en manteca de cacao (sobre un 32%), por lo que se deshace con facilidad. Se utiliza para la parte superior de muchos pasteles dada la facilidad con que se trabaja. Una vez se enfría, forma capas muy resistentes en estado sólido. La construcción de figuras de chocolate se realiza a partir de este tipo. Puede ser blanco o negro.
- **Con leche**: contiene normalmente, sobre un 35% de pasta de cacao. La proporción mayor la tiene la leche que se le añade en polvo o condensada: Se le suele añadir azúcar, que a veces se introduce caramelizado y vainilla.
- **Deshecho**: también conocido como chocolate a la taza, está elaborado a partir de la pasta de cacao y algún espesante que suele ser alguna fécula como la harina de maíz, de arroz o de trigo.
- **Relleno**: viene siendo una cobertura de chocolate que recubre: frutos secos como avellanas, licores, frutas escarchadas o galletas.
- **De desecho**: es el chocolate con una proporción de cacao inferior al 50%.
- **De frutas**: propio para la confección de postres con frutas, también llamado Fondant.

- **Sin azúcar:** se elabora con la pasta de cacao y edulcorantes (fructosa o sorbitol). Es un chocolate que se presenta como alternativa para los que quieren hacer regímenes o para personas que tienen problemas con el azúcar.
- **En polvo:** contiene alrededor de un 30% de cacao que se obtiene prensando la pasta de Cacao para extraer parte de la grasa. Contiene azúcares o edulcorantes.

3.7 Pautas para degustar el chocolate²

1. **Para hacer una buena cata** es necesario tener la boca limpia, por lo tanto no conviene efectuarla después de tomar café u otro alimento muy aromatizado. El chocolate además debe estar a temperatura ambiente.
2. **Análisis visual.** Una tableta bien templada es brillante y luminosa, sin grumos ni agujeros. El color depende del porcentaje de cacao que tenga; cuanto mayor sea, más oscuro será.
3. **Análisis táctil.** Al tacto, la barra debe ser suave. Una vez que el chocolate está en la boca, presionando el paladar con la lengua puede comprobar su textura. Debe ser suave, aterciopelada, nunca granulosa.
4. **Análisis auditivo.** La barra de chocolate debe quebrarse con un sonido seco y con un corte limpio.
5. **Análisis olfativo.** Algunos catadores frotan el chocolate con los dedos a fin de calentarlo, para que las grasas se fundan y el cacao desprenda todo su aroma.
6. **Análisis gustativo.** El chocolate tiene sabor dulce y amargo, pero degustándolo con atención también pueden percibirse notas agrias, tostadas, ahumadas y de moho.

3.8 El chocolate y la salud²

- **Es rico en polifenoles-flavonoides**, como la epicatequina, potentes antioxidantes que protegen el sistema circulatorio, en especial al corazón, el chocolate negro es particularmente rico en polifenoles que entre otros efectos benéficos previene o reduce los efectos del SFC (Síndrome de Fatiga Crónica) y encefalomiелitis miálgica.

- **Es un gran promotor de serotonina** gracias al triptófano, un aminoácido muy importante en nuestro organismo regulador de neurotransmisores y buena dosis de anandamida, ambos psicotrópicos que existen de manera natural en el ser humano y obtenidos en dosis suficientes (mínimas) al consumir chocolate.
- **El chocolate “negro”** es el que se considera actualmente más benéfico, por ser más rico en cacao. Se aconsejan hasta 100g de chocolate negro por día, ya que esto disminuirá el riesgo de accidentes vasculares y de hipertensión. A inicios de 2007, se publicaron estudios de investigadores que señalan que el solo consumo de una barra pequeña de chocolate negro por día, ya reduce la presión sistólica en un 8% o 9%.
- **El cacao o el chocolate negro** tiene un efecto anticanceroso, estimulador cerebral, antitusígeno, y antidiarreico.

4. Etapas del procesamiento de cacao y su relación con la viscosidad

4.1 Cultivo y cosecha²

El cultivo del cacao requiere un clima adecuado que se encuentra principalmente en la zona delimitada por los trópicos de Cáncer y Capricornio. El cacao se cultiva en una franja que se extiende a 10 grados al norte y 10 grados al sur del Ecuador, y se adapta mejor al nivel del mar hasta un máximo de unos 1000 m, aunque la mayor parte del cacao mundial crece a una altitud inferior a 300 m. Hay tres regiones principales de cultivo de cacao: África Occidental, Sudeste Asiático y América del Sur. Estos se muestran en la Figura 4.1.

El cultivo requiere temperaturas generalmente entre 18-32 °C (65-90 °F) y una precipitación bien distribuida a lo largo del año, con un rango entre 1000 y 4000 mm por año, pero preferiblemente entre 1500 y 2500 mm.

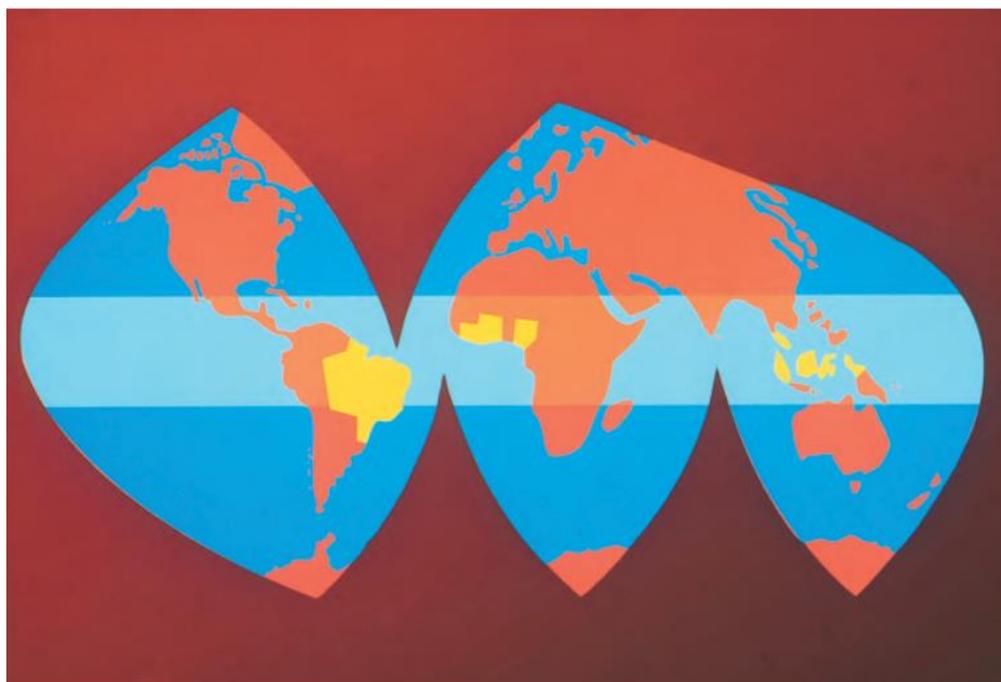


Figura 4.1. Mapa que muestra los principales países productores de cacao del mundo.

Durante el cultivo, el cacao prefiere una humedad elevada, que suele oscilar entre el 70-80% durante el día y el 90-100% por la noche. Los árboles de cacao suelen plantarse para alcanzar una densidad final de 600-1200 árboles/ha (1500-3000 árboles/acre) y se intercalan con cultivos alimentarios. Debido a la fragilidad de los árboles de cacao durante las primeras fases de crecimiento, la mayoría de las veces se protegen de los fuertes vientos mediante cultivos alimentarios; por ejemplo, los plátanos se utilizan como escudo contra el viento en las plantaciones de Ghana⁷.

Los árboles crecen bien en la mayoría de los suelos, pero preferiblemente en suelos bien aireados con buen drenaje y un pH de neutro a ligeramente ácido (5,0-7,5), y con plagas y enfermedades cuidadosamente controladas. Los árboles de cacao solían crecer hasta una altura de aproximadamente 10 m en la madurez, preferiblemente bajo la sombra de otros árboles. Sin embargo, los métodos modernos de cultivo han permitido desarrollar árboles de aproximadamente 3 m de altura para facilitar la cosecha.



Figura 4.2. Plantación de cacao intercalado con árboles de plátano.

El 70% la producción mundial viene de África del Oeste, siendo Costa de Marfil y Ghana los principales productores de cacao, aunque entre los más preciados se encuentran los de Ecuador y Venezuela. En las regiones productoras de cacao se hacen dos cosechas al año pues las mazorcas maduran cada 4-6 meses⁹.

La recolección de los frutos del cacao consiste en retirar las vainas de los árboles y extraer los granos y la pulpa del interior de la vaina. El proceso de maduración dura entre 7 y 10 días, las vainas pueden dejarse en los árboles hasta 2 semanas antes de la cosecha. Por lo tanto, existe una ventana de 3 semanas durante la cual el cacao puede considerarse apto para la cosecha. El agricultor las recoge del árbol seccionándolas por el tallo cuidadosamente. Se recolectan los frutos del cacao, unas bayas alargadas de hasta 30 centímetros, casi el mismo tamaño de un balón de fútbol americano.

Durante la recolección, normalmente se utiliza un cuchillo o un alfanje para retirar la vaina del árbol, pero existe una herramienta especial de mango largo para retirar las vainas que están más arriba del árbol (Fig. 4.3).



Figura 4.3. Cuchilla para cortar cacao.

Después de arrancar las vainas de los árboles, pueden recogerse en montones y abrirse inmediatamente o dejarse reposar unos días antes de abrirlas, técnica conocida como almacenamiento de las vainas, que se ha señalado que tiene efectos benéficos significativos en la calidad del sabor del grano durante la posterior fermentación y procesamiento. Hay dos preocupaciones que determinan la rapidez de la cosecha: la posibilidad de enfermedades de la mazorca (Figura 4.4) y la posibilidad de que los granos germinen, si se retrasa demasiado.



Figura 4.4. Mazorca de cacao con enfermedad (Mazorca negra).

4.2 Desgrane²

Gran parte de esto depende de las prácticas geográficas e históricas que se encuentran en las distintas regiones de cultivo. El corte propiamente dicho de las vainas se realiza por diversos medios, según el lugar, entre ellos el uso de alfanjes o machetes, o el rajado con un tocho o garrote de madera. La práctica del corte con alfanjes o machetes requiere una considerable destreza, ya que los granos pueden dañarse fácilmente durante el proceso y la posterior penetración del moho y de las plagas del producto almacenado, lo que los convierte en defectos. Las figuras 3.5 y 3.6 muestran las mazorcas de cacao maduras y abiertas con sus disposiciones transversales y longitudinales de los granos, respectivamente



Figura 4.5.Mazorca de cacao (corte transversal).

En el interior de la vaina hay entre 30 y 40 granos o semillas unidos a una placenta central. Los granos son ovalados y están envueltos en una pulpa mucilaginosa blanca y dulce. Tras romper la vaina, se separan los granos con la mano y se extrae la placenta.



Figura 4.6.Mazorca de cacao (corte longitudinal).

La capa de la semilla o testa separa los cotiledones de la pulpa. Los granos extraídos directamente de la vaina y sometidos a condiciones de secado controladas no desarrollan prácticamente ningún sabor a chocolate después de su procesamiento, y los granos frescos carecen de los compuestos necesarios para el desarrollo del sabor a chocolate. Por lo tanto, el proceso de fermentación es necesario para la formación de constituyentes o precursores del sabor que se desarrollan durante el proceso de tostado. Así, el cacao maduro en grano está formado por tres componentes: pulpa, testa y cotiledones.

4.3 Fermentación²

La fermentación es esencial para el desarrollo de sabores adecuados a partir de los precursores. Tras la recolección de las vainas, los granos y la pulpa adherida se trasladan a montones, cajas o cestas para realizar fermentaciones que duran de 5 a 6 días en el caso de los granos injertados, pero de 1 a 3 días en el caso de los criollos.



Figura 4.7. Granos de cacao en proceso de fermentación.

Se conocen como precursores del sabor, ya que dan lugar al sabor, pero no lo son en sí mismos. Los granos no fermentados pueden prensarse para producir manteca de cacao, pero el material de cacao sólido restante no normalmente se utiliza para hacer chocolate.

El primer día, la pulpa adherida se licua y escurre, con un aumento constante de la temperatura. En condiciones anaeróbicas, los microorganismos producen ácido acético y etanol que inhiben la germinación y contribuyen a los cambios estructurales, como la eliminación de la compartimentación de las enzimas y los sustratos, con movimientos de los componentes citoplasmáticos a través del cotiledón del cacao, generalmente entre 24 y 48 horas de fermentación del grano. Sin embargo, el proceso es mucho más complicado que esto, ya que un proceso de fermentación más habitual tiene lugar fuera del grano. Este etanol activa otras bacterias, como las del ácido etanoico (acético) y las del ácido láctico, que lo convierten en sus respectivos ácidos. El etanol y los ácidos son capaces de atravesar la cáscara hasta llegar al grano. Este cambio de acidez (pH) acelera la muerte del grano. Al tercer día, la masa de la haba se habrá calentado normalmente en torno a los 45 °C, permaneciendo a 45-50 °C hasta que se complete la fermentación.

Durante la fermentación, la velocidad de difusión de los ácidos orgánicos en los cotiledones, el momento de la entrada inicial, la duración del pH óptimo y el pH final son cruciales para la formación óptima del sabor. Los granos de cacao con un pH más alto (5,5-5,8) se consideran no fermentados, con un índice de fermentación y una puntuación de prueba de corte bajos; y las de pH más bajo (4,75-5,19), bien fermentados.

Las técnicas de fermentación pueden reducir las notas ácidas y maximizar los sabores del chocolate en comparación con los extractos de cacao natural ácido (pH 5,5-6,5) y alcalino (pH 8,0) obtenidos por extracción directa: los primeros poseían un aroma más intenso y achocolatado que los segundos, atribuido a los altos contenidos de ácidos aromáticos y productos de degradación del azúcar con notas aromáticas dulces y de caramelo persistentes. Los granos de cacao con un pH más bajo (4,75-5,19) y más alto (5,50-5,80) recibieron una puntuación más baja en cuanto al sabor a chocolate y más alta en cuanto a las notas de mal sabor, respectivamente, y el chocolate procedente de habas con un pH intermedio (5,20-5,49) recibió una puntuación más alta en cuanto al sabor a chocolate.

La sacarosa y los componentes proteicos se hidrolizan parcialmente, los compuestos fenólicos se oxidan y la glucosa se convierte en alcoholes, que se oxidan a ácidos acético y láctico durante la fermentación. A continuación, los granos sufren una fase hidrolítica anaeróbica, seguida de una condensación aeróbica. El tiempo, la secuencia de eventos y el grado de hidrólisis y oxidación varían entre las fermentaciones. La concentración de los precursores del sabor depende de los mecanismos enzimáticos. También se producen cambios de color con la hidrólisis de los componentes fenólicos por parte de las glucosidasas, acompañada de un blanqueo, lo que influye en el carácter final del sabor.

El método de fermentación determina la calidad final de los productos elaborados, especialmente el sabor. Estudios anteriores sobre el almacenamiento de las vainas después de la cosecha y el esparcimiento de los granos habían demostrado una notable mejora del sabor del chocolate y una reducción del sabor agrio, el amargor y la astringencia. En la producción comercial, se obtuvieron efectos similares mediante de almacenamiento de las vainas, el prensado y el soplado de aire. Los granos inmaduros y sin fermentar desarrollan poco sabor a chocolate cuando se tuestan, y una fermentación excesiva produce sabores indeseados y pútridos.

4.4 Secado²

Tras la fermentación, las habas deben secarse antes de ser transportadas a las fábricas de chocolate exponiéndose al sol para su secado, necesario para disminuir la humedad del haba para permitir la conservación de sus cualidades. El desarrollo del sabor de los precursores del cacao continúa durante el secado con el desarrollo del color marrón característico.

Los granos de cacao se ponen a secar al sol, o en una máquina de secado, o en el suelo hasta que se secan completamente en 7-8 días soleados, si no se hace así, los granos se llenan de moho. Estos mohos dan al chocolate un sabor fuerte y desagradable, por lo que no se puede utilizar. Las habas tampoco deben secarse en exceso. Las que tienen un contenido de humedad inferior al 6% se vuelven muy quebradizas, lo que dificulta mucho su manipulación y procesamiento posterior.

Cuando el clima lo permite, las judías suelen secarse al sol. Se extienden durante el día en capas de unos 100 mm de grosor sobre esteras, bandejas o terrazas. Se rastrillan a intervalos y se amontonan y protegen por la noche o cuando llueve. En este caso, las judías suelen tardar una semana en secarse hasta alcanzar el nivel de humedad necesario del 7%, que es demasiado bajo

para que crezcan los mohos. En otras zonas, las habas se secan en mesas móviles que pueden ponerse a cubierto cuando es necesario (Figura 4.8).



Figura 4.8. Granos de cacao en proceso de secado.

Uno de los principales problemas del secado al sol es el riesgo de contaminación del entorno y de los animales de granja y salvajes que se pasean entre las judías. Esto significa que hay que tomar precauciones al manipularlas cuando llegan a la fábrica de chocolate.

En otros países, sobre todo en Asia, el clima puede ser demasiado húmedo y se requiere un secado artificial. A veces se encienden fuegos de madera en una cámara situada debajo de la zona de secado, y el gas caliente se conduce a través de un conducto de humos situado debajo de la plataforma de secado y luego sale por una chimenea vertical. Un problema importante en este caso es el de las fugas de humo por la chimenea.

Esto, al igual que el moho, da a los granos un sabor desagradable y áspero e impide que se utilicen para la fabricación de chocolate. Los secadores de aire forzado son mejores, así como los intercambiadores de calor eficientes que impiden que los contaminantes ahumados lleguen a las habas. Si el secado es

demasiado rápido, las habas tendrán un sabor muy ácido y es mejor secarlas a temperaturas más bajas o de forma intermitente durante un periodo más largo.

Durante el proceso, las principales reacciones de oxidación de los polifenoles son catalizadas por las polifenoloxidasas, dando lugar a nuevos componentes de sabor, y a la pérdida de la integridad de la membrana, induciendo la formación de color marrón. El uso del secado artificial puede aumentar la temperatura de los cotiledones, provocando el endurecimiento de la caja.

Tras la fermentación y el secado, el objetivo para los granos de cacao es un contenido de humedad de aproximadamente 6-8%. Para el almacenamiento y el transporte, el contenido de humedad debe ser inferior al 8%, ya que de lo contrario es posible la aparición de moho.

Los indicadores de calidad de las habas bien secadas son un buen color marrón y una baja astringencia y amargor, así como la ausencia de sabores extraños, como notas ahumadas y una acidez excesiva. La evaluación sensorial de las habas de cacao secadas mediante diferentes estrategias, es decir, secado al sol, soplado al aire, secado a la sombra y secado al horno, sugirió que las habas secadas al sol (Figura 4.9) obtuvieron una mayor calificación en el desarrollo del chocolate, con menos notas desagradables.



Figura 4.9. Granos de cacao secados al sol.

Frauendorfer y Schieberle (2006) identificaron compuestos aromáticos similares en el cacao en polvo utilizando correlaciones sensoriales moleculares. Las notas desagradables procedentes del secado incompleto o del remojo por la lluvia pueden dar lugar a altos niveles de actividad del agua y de contaminación por moho, produciendo altas concentraciones de carbonilos fuertemente aromatizados, lo que conduce a alteraciones del sabor del grano, produciendo fuertes sabores desagradables, lo que también se correlaciona con la sobrefermentación.

4.5 Criterios de selección y calidad de los granos de cacao²

Los fabricantes de chocolate deben seguir una serie de directrices y criterios de calidad si quieren producir productos que mantengan la fidelidad de los consumidores a sus productos. Antes de la elaboración la calidad de los granos se evalúa mediante dos métodos diferentes. Con la primera técnica, se evalúan las alubias según los siguientes indicadores:

1. Grado de fermentación
2. Contenido de humedad (máximo 6%)
3. Número de defectos
4. Número de granos rotos
5. Número de judías (número por 100 g)
6. Grado de enmohecimiento
7. Perfil de sabor
8. Color
9. Contenido de grasa (mínimo 52%)
10. Calidad de la grasa en relación con el porcentaje de ácidos grasos libres (como ácido oleico)
11. Contenido de cáscara (10-12%)
12. Uniformidad del tamaño de los granos
13. Infestación de insectos y roedores

La segunda técnica se evalúa en función del tamaño de los granos utilizando el recuento de granos (número de granos por 100 g) o el peso en gramos de 100 granos. En el mercado internacional del cacao, los distintos tamaños de grano tienen precios diferentes. Los granos de menor tamaño suelen contener contienen una cantidad proporcionalmente menor de pepitas, un mayor contenido de cáscara y un menor contenido de grasa, y atraen precios más bajos. Las habas de origen asiático suelen tener más cáscara que las de África Occidental.

La prueba de corte del grano se utiliza para evaluar los defectos y el grado de fermentación. En este proceso, se selecciona al azar una muestra de 300 judías y se abre longitudinalmente. A continuación, se examinan las superficies cortadas y se evalúan en función de los siguientes criterios

1. Granos planos y encogidos
2. Granos enmohecidos
3. Granos pizarrosos
4. Granos germinados
5. Grado de infestación por insectos y roedores

Todos estos factores afectan al sabor y al gusto de los productos acabados, para los que se utilizarán las habas. Un buen cacao en grano debe estar bien fermentado, seco y libre de plagas de insectos y roedores, olores anormales y contaminaciones/adulteraciones.

Otro criterio clave es la calidad del sabor. A este respecto, hay que tener en cuenta la calidad deseada del chocolate acabado y/o de los productos en los que se utilizará el chocolate. Es importante tener en cuenta que el hecho de que un grano proceda de una cepa de grado alto en sabor no significa que vaya a mejorar automáticamente el perfil de un producto. Hay que evaluar cuidadosamente el impacto global que tiene una determinada cepa en su inclusión en la mezcla. También hay que tener en cuenta que, aunque las habas

tienen un tipo característico, la calidad del sabor puede variar de un año a otro, de una cosecha a otra, etc., por lo que es necesario evaluar continuamente la disponibilidad de las alubias antes de utilizarlas en las fórmulas de las recetas. A continuación, se presentan cinco ejemplos de la variada selección de mezclas de granos en diversos tipos de productos y explicaciones del razonamiento que se ha seguido para su selección. Para la producción industrial de⁷:

- Chocolate con leche: Se aconseja el uso de granos de África Occidental de tueste medio con granos ecuatorianos. Esta mezcla proporcionaría una buena nota de cacao limpio con matices de nuez y ligeramente afrutados. Es importante señalar que la adición de los granos brasileños (que son muy ácidos) y los granos de Malasia, contrastaría negativamente con las notas lácteas deseadas.
- Chocolate con leche ligero: Este producto puede elaborarse con habas tostadas, conocidas por su color claro y su sabor general muy suave con matices distintivos de nuez. Esto ayudaría a conseguir un buen nivel de identidad para el chocolate con leche, ya que la cobertura sería varios tonos más clara que la de un grano 100% de África Occidental. Podría utilizarse mejor para complementar centros de sabor muy delicado.
- Chocolate semidulce de alta calidad: Se aconseja el uso de reservas predominantemente de África Occidental por su carácter de cacao y sus matices ligeramente de nuez (tueste ligero a medio) para realzar las notas deseables y limitar las notas quemadas/amargas. Esta mezcla, complementada con granos de Caracas y Trinidad, aportaría notas florales y ligeramente picantes para crear un perfil equilibrado y único.
- Chocolate agridulce duro: Este producto está diseñado principalmente para su uso en centros de crema muy dulces y muy aromatizados, ya que produce coberturas muy duras y amargas. Si se come sola, esta cobertura puede ser

lo suficientemente dura como para ser objetable para muchos consumidores. Sin embargo, en una pieza acabada como la descrita, complementa y equilibra el sabor del producto. Los grados de sabor delicados se desperdiciarían en un producto así, ya que quedarían totalmente anulados por el amargor, la astringencia y la acidez de la mezcla.

- Gota de galleta semidulce: Se aconseja el uso de los granos dominantes de África Occidental en este producto para proporcionar un buen impacto de cacao. Los fuertes perfiles de los componentes “Brasileño” y “Sánchez” complementan y contrastan el componente de África Occidental. En esta aplicación, es deseable un sabor robusto para el contraste en las galletas horneadas.

4.5 Ensacado y transporte²

Las habas de cacao, ya fermentadas, secas y enfriadas serán almacenadas en sacos para ser transportadas a las fábricas de chocolate de destino. Las habas deben almacenarse de forma que no cojan agua, ya que se enmohecen cuando su nivel de humedad supera el 8%. Tradicionalmente se almacenan en sacos de yute de 60 a 65 kg (Figura 4.10).



Figura 4.10. Granos de cacao almacenados.

Son fuertes, apilables y permiten el paso de la humedad. También son biodegradables. Como el chocolate tiene un sabor muy delicado, los granos deben almacenarse bien alejados de otros productos, como las especias, que podrían dar lugar a sabores extraños en el chocolate.

Las habas suelen transportarse en las bodegas de los barcos. En el punto de carga la temperatura será de unos 30 °C, pero muy pronto la temperatura en el Atlántico Norte se acercará al punto de congelación. Si las habas tienen un contenido de humedad del 8%, su humedad relativa de equilibrio es de aproximadamente el 75%. En otras palabras, si la humedad relativa es inferior al 75%, las judías se secarán y cogerán humedad con humedades superiores.

El nivel de humedad no debe superar el 8%, por lo que las habas no deben almacenarse nunca con humedades más altas. Sin embargo, en los barcos esto es difícil. La humedad ya es alta cuando se cargan los sacos y el descenso de la temperatura provoca un rápido aumento de la humedad relativa hasta el 100% (el punto de rocío).

La humedad se condensa en la estructura de la nave y a veces se introduce en los sacos, haciendo que las habas se enmohezcan. Por ello, los sacos no deben estar nunca en contacto con las superficies frías y las esteras absorbentes colocadas encima. También hay que ventilar la bodega del barco para eliminar el aire húmedo.

4.7 Limpieza de los granos²

Una vez que llegan a la fábrica las habas de cacao pasan por un proceso de limpieza. Como muchos de los granos se secan en el suelo, suelen contener arena, piedras, hierro, material vegetal, etc. Estos elementos deben eliminarse por dos razones. En primer lugar, muchas de estas impurezas son muy duras y dañan la maquinaria que se utiliza para moler los granos. En segundo lugar, los contaminantes orgánicos se quemarán durante el proceso de tostado y

desprenden gases que pueden estropear el sabor del cacao. Por ello, la limpieza se realiza al principio del proceso de elaboración del chocolate (Figura 4.11).



Figura 4.11. Granos de cacao siendo limpiados y seleccionados.

Normalmente hay varios procedimientos diferentes, que se combinan para eliminar los distintos tipos de material de desecho. El hierro se retira mediante imanes, mientras que el polvo puede extraerse por succión. Las piedras pueden tener un tamaño similar al de los granos, pero tienen una densidad diferente. Se pueden separar haciéndolas vibrar juntas en una rejilla colocada en ángulo con respecto a la horizontal. El aire pasa a través de la rejilla y empuja los granos más arriba que las piedras. A medida que se acercan a la rejilla vibratoria, las piedras se desplazan hacia la parte superior, donde caen en una bolsa colectora. El aire transporta las habas hacia la parte inferior de la rejilla, desde donde pasan a la siguiente fase de procesamiento (Figura 4.12).

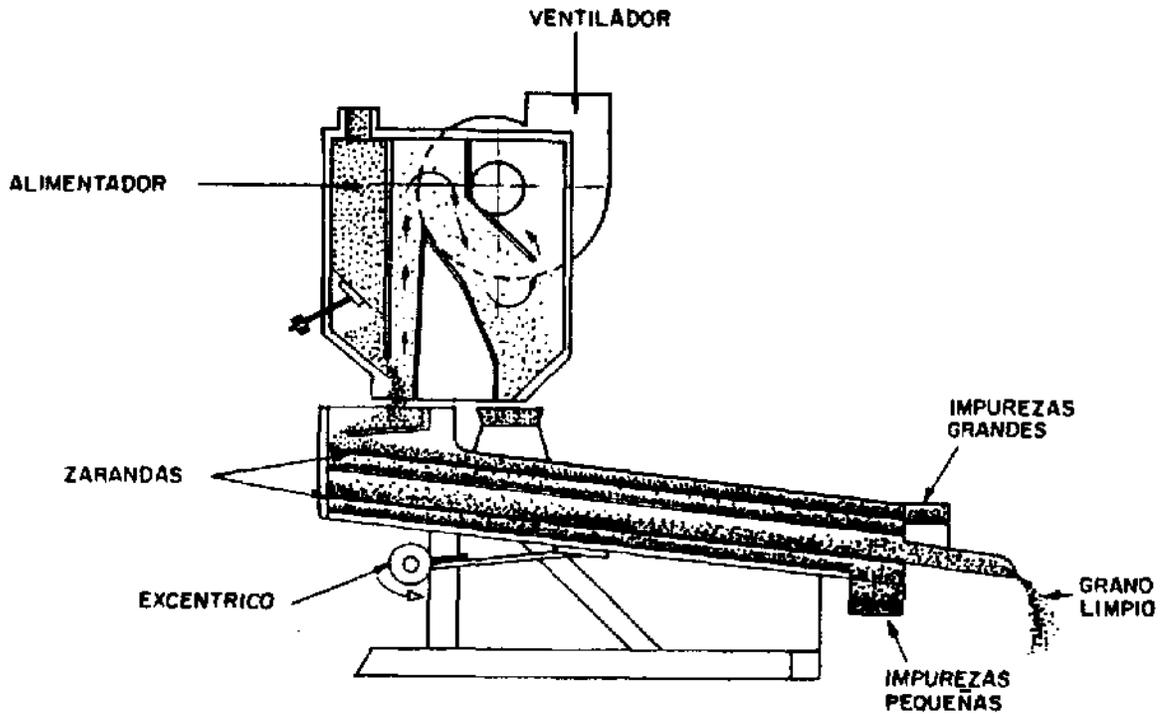


Figura 4.12. Granos de cacao siendo limpiado de impurezas en máquina de aire y rejillas (zarandas).

4.8 Trituración²

Una vez limpias, las habas son trituradas, partiéndose en trocitos más pequeños. Las habas de cacao son de un tamaño similar a una almendra y también tienen una ligera cáscara. La trituración es el proceso de separación de la cáscara y parte del germen del resto del grano.

Como su nombre indica, se basa en los mismos principios que se utilizan para separar el maíz de la paja durante la recolección del grano. Es conveniente mantener los cotiledones centrales (plumillas) en trozos lo más grandes posible para que puedan separarse más fácilmente de la cáscara. Los trozos pequeños que se queden con la cáscara se tirarán con ella, por lo que económicamente es muy importante realizar la trituración correctamente. Los granos rotos se separan inicialmente, para evitar que se rompan más, y pasan directamente al proceso de separación. Las restantes se rompen, a menudo enviándolas individualmente a alta velocidad contra las placas de impacto. Estas también pasan a los tamices vibratorios.

La cáscara es en gran parte material fibroso y tiene normalmente la forma de una plaqueta plana. El plumín, en cambio, suele ser mucho más esférico y, al ser más de la mitad de la grasa, es mucho más densa. Cuando los dos se hacen vibrar juntos, la cáscara más ligera subirá a la parte superior. Si el aire es arrastrado hacia arriba a través de esta mezcla, la cáscara más ligera, con su mayor superficie, se elevará, mientras que el plumín más pesado caerá para su posterior procesamiento (Figura 4.13).

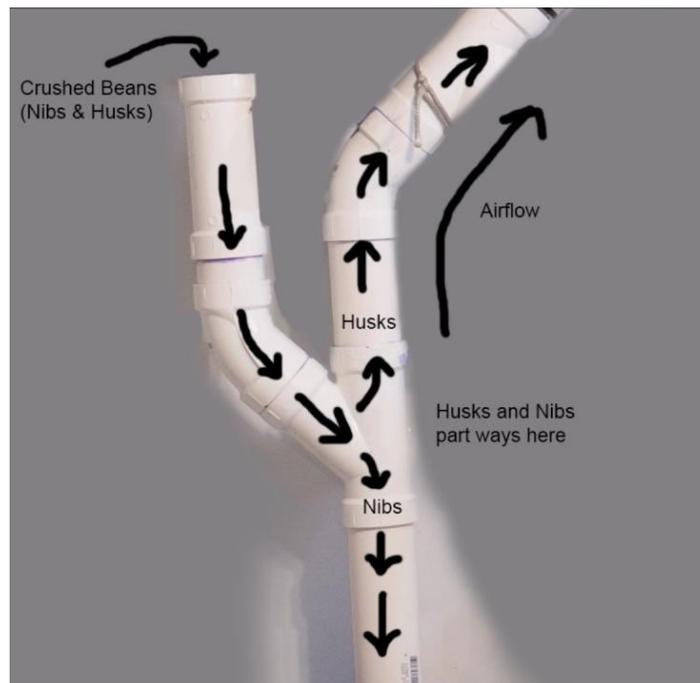


Figura 4.13. Sistema de separación de cascara y plumín.

Por ello, una vez trituradas se separa la cáscara de haba de cacao a través de unos aspiradores, gracias a que pesa menos. El haba ya limpia y triturada, llamada "grué" pasará a ser tostada en el proceso de torrefacción.

4.9 Torrefacción²

Torrefacción es un delicado proceso que impacta el color, el aroma y el sabor del producto, pues es en este proceso donde el haba de cacao desarrolla más de 400 aromas. Los cotiledones (plumillas) deben tostarse antes de convertirse en chocolate. El objetivo es transformar los precursores del sabor en las

sustancias químicas que realmente saben a chocolate. Además, la alta temperatura, junto con la humedad restante en los granos, matará cualquier contaminante microbiológico, como la salmonela, que pueda estar presente en los granos desde que se secaron en el suelo.

Conseguir el punto exacto de torrefacción es clave para obtener después el mejor chocolate. El grado de cambios para obtener entre un sabor y otro del chocolate está relacionado con el tiempo y la temperatura de tostado y la tasa de pérdida de humedad durante el proceso. La temperatura de tostado varía entre 90 y 170 °C durante un tiempo variable que puede llegar a 25 minutos dependiendo del tipo de tueste adoptado, siendo éste seco o húmedo.

El proceso puede ser por lotes o continuo. Se suele utilizar un tostador de tambor (Figura 4.14). Estos pueden procesar hasta 3 toneladas de granos en un solo lote. El calor puede aplicarse externamente a través de las paredes o haciendo pasar aire caliente por el tambor.

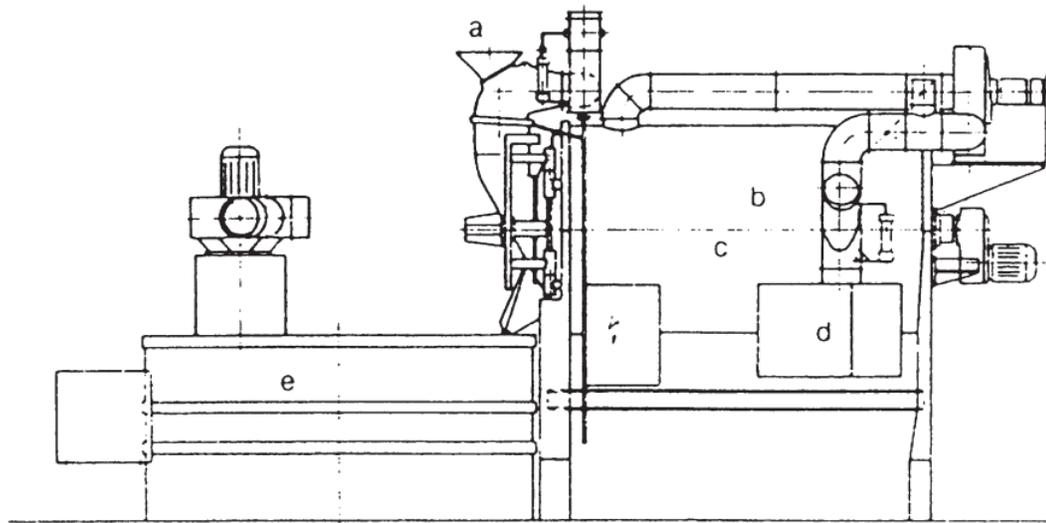


Figura 4.14. Representación esquemática de una unidad de tostado por lotes (Barth Ludwigsburg GmbH & Co., Alemania). (a) Tubo de embudo; (b) tambor de reacción; (c) tubo perforado para transportar la solución para alcalinizar; (d) calefacción de gas o aceite; (e) bandeja de enfriamiento.

Para eliminar los contaminantes microbiológicos, se necesita tanto agua como calor. Estos tostadores están diseñados para añadir agua o vapor a fin de aumentar la eficacia de la eliminación. Sin embargo, hay que tener cuidado de volver a secar los granos antes de que se produzca el tueste adecuado, ya que un exceso de agua puede eliminar tanto los componentes de sabor deseables como los indeseables. Como se ha mencionado anteriormente, los granos demasiado secos tampoco son deseables. Normalmente, la temperatura se eleva a su nivel de tostado, entre 110 °C y 140 °C, cuando el nivel de humedad se ha reducido por debajo del 3%. El procedimiento de tostado total suele durar entre 45 minutos y 1 hora. Tras el tostado, el producto suele enfriarse en un refrigerador externo. Cuando es necesario procesar grandes cantidades de granos o plumillas, se suele utilizar un proceso continuo.

En la figura 4.15 se ilustra un típico sistema de tostado continuo. Aquí los granos se introducen por lotes a través de la parte superior en un sistema de estantes. Este estante está formado por una serie de listones, a través de los cuales sopla el aire caliente. Al cabo de un tiempo predeterminado, las lamas se inclinan sucesivamente, empezando por la inferior, hasta que la superior ha vuelto a su posición y se ha introducido un nuevo lote en la parte superior. De este modo, los granos caen sobre el estante inferior y a través del tostador. Los estantes inferiores se utilizan para proporcionar un rápido enfriamiento. Por estos tostadores pasan volúmenes muy grandes de aire caliente y hay que tener cuidado de que no se lleve consigo algunos de los sabores más volátiles, junto con la humedad que se evapora durante el proceso de tostado.

El tostado del licor se realiza en un equipo especialmente diseñado que esparce el licor de cacao caliente y líquido sobre la superficie de un largo cilindro caliente con una columna central que gira rápidamente. Rotores y palas, fijadas a la columna, remueven continuamente el líquido y rascan la superficie para evitar que el cacao se caliente demasiado. Este proceso de proceso puede durar tan solo 1 o 2 minutos.

Las habas sin tostar suelen tener un sabor muy astringente y amargo. Las altas temperaturas y el secado durante el tostado eliminan muchos de los ácidos volátiles, especialmente el ácido etanoico, y hacen que las plumillas, o granos, tengan un sabor menos ácido. Los ácidos menos volátiles, como el etanodioico (oxálico) y láctico, permanecen en gran medida inalterados por el proceso de tostado.

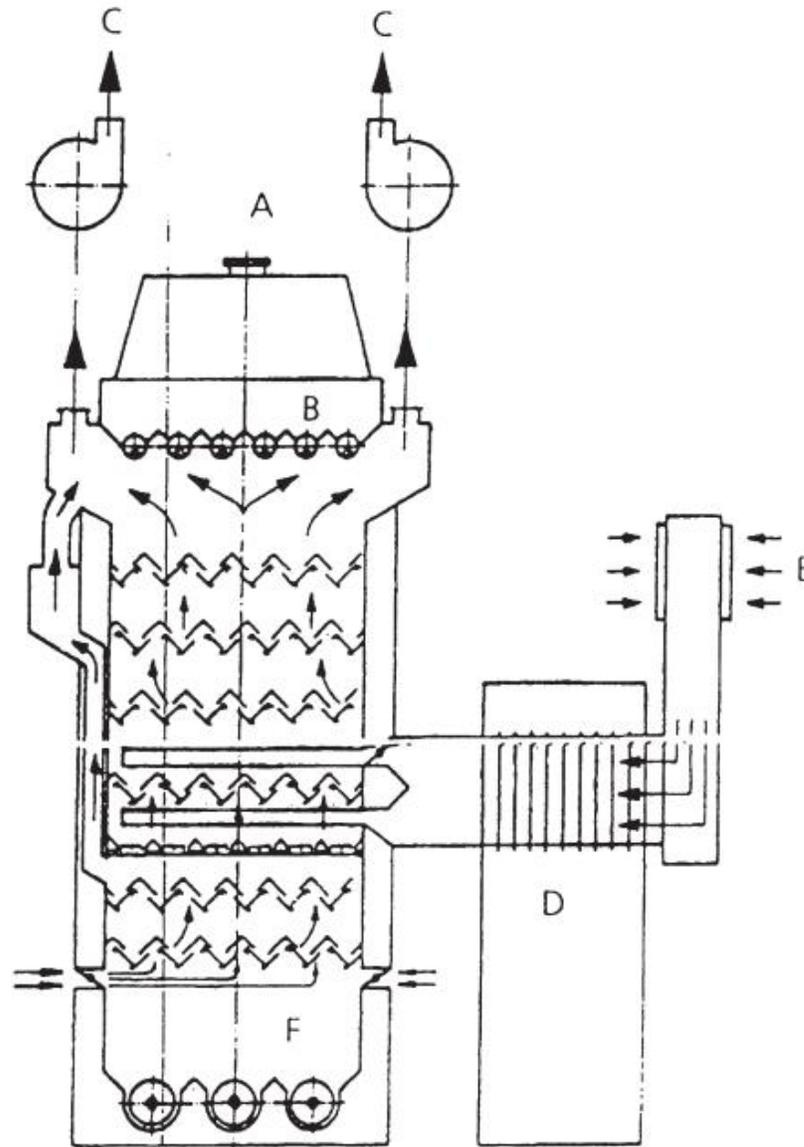


Figura 4.15. Esquema del sistema de tostado continuo de habas y picos (Lehmann Maschinenfabrik GmbH, Alemania). (A) Alimentación del producto; (B) rodillos de alimentación; (C) ventilador de aire de salida; (D) calentador de aire; (E) filtro de aire; (F) tornillo de extracción.

Los granos de cacao se tuestan para desarrollar aún más el sabor original del cacao que existe en forma de precursores generados durante los procesos de fermentación y secado de los granos. Durante el tostado de los granos secos fermentados, se producen varios cambios físicos y químicos que incluyen los siguientes:

- El aflojamiento de las cáscaras.
- Pérdida de humedad de los granos hasta aproximadamente un 2% de contenido final.
- Los granos (cotiledones) se vuelven más friables y generalmente se oscurecen.
- Reducción adicional del número de microorganismos presentes en las judías. Esto ayuda a obtener productos de calidad alimentaria, como la manteca de cacao, el cacao en polvo y el licor de cacao, que tienen estrictas especificaciones microbiológicas.
- Se produce la degradación de los aminoácidos y las proteínas que se desnaturalizan parcialmente. Los azúcares reductores naturales son casi destruidos durante la degradación de los aminoácidos.
- Pérdidas de ácidos volátiles y otras sustancias que contribuyen a la acidez y al amargor. En los compuestos volátiles se ha detectado un gran número de compuestos, como aldehídos, cetonas, pirazinas, alcoholes y ésteres. Las sustancias que sólo sufren cambios mínimos son las grasas, los polifenoles y los alcaloides.

Dentro de estos cambios químicos, encontramos la reacción de Maillard, esta reacción, también llamada pardeamiento no enzimático, es importante para la calidad de los alimentos en toda la industria alimentaria y da a los productos sus colores y sabores cuando se hornean, se tuestan o se asan. Es una reacción extremadamente complicada en la que intervienen muchos componentes de bajo peso molecular con cientos de reacciones y productos intermedios

diferentes. Estos productos intermedios pueden tener o no sabor propio. Algunos actúan como catalizadores de otras reacciones, mientras que otros pueden impedir que se produzca una determinada serie de reacciones. Se necesita calor para que la reacción se produzca a una velocidad significativa. Sus productos se pueden ver y saborear cuando se queman los alimentos en una sartén cuyo contenido no se ha removido lo suficiente. El agua también debe estar presente junto con un azúcar reductor, como la glucosa, y un aminoácido, péptido o proteína. En el caso del cacao, antes de la fermentación hay alrededor de un 12-15% de proteínas. Pero el calor y las condiciones ácidas durante este tratamiento descomponen gran parte de ésta en aminoácidos, formando así algunos de los precursores, que se convierten mediante el tostado en el sabor del chocolate.

Las principales vías de la reacción de Maillard³ se muestran en la figura 3.16. Todas las reacciones tienen lugar a cualquier $\text{pH} > 3$, pero el pH real altera la probabilidad de que tengan lugar. Las reacciones del lado izquierdo son en gran medida rutas de formación de aromas. El azúcar se divide en cadenas de carbono más pequeñas. (C_1 , C_2 , etc. denotan la longitud de las cadenas). Los intermedios clave 1DH, 3DH y 4DH son 1-, 3- y 4-desoxihexosulosas respectivamente y son compuestos dicarbonílicos. Las vías de la derecha suelen estar implicadas en la producción de color y no de sabor.

La reacción de Strecker³ implica la formación de aldehídos, algunos de los cuales forman parte del sabor del chocolate, a partir de los aminoácidos, que son en gran medida insípidos e inodoros. Una de estas reacciones consiste en la reacción de un aminoácido llamado glicina con el glioxal (un compuesto 1,2-dioxo). Al final se forman pirazinas, que son compuestos heterocíclicos con dos átomos de nitrógeno en un anillo de seis miembros. Las cantidades de las distintas pirazinas formadas dependen en gran medida de la temperatura y el tiempo de la reacción de tostado. De hecho, su medición se ha utilizado como método para determinar el grado de tueste del licor de cacao. El olor

característico del chocolate también puede producirse por la reacción de aminoácidos como la leucina, la treonina y la glutamina con la glucosa, cuando se calienta a unos 100 °C. Las temperaturas más altas producirán un olor mucho más penetrante/punzante.

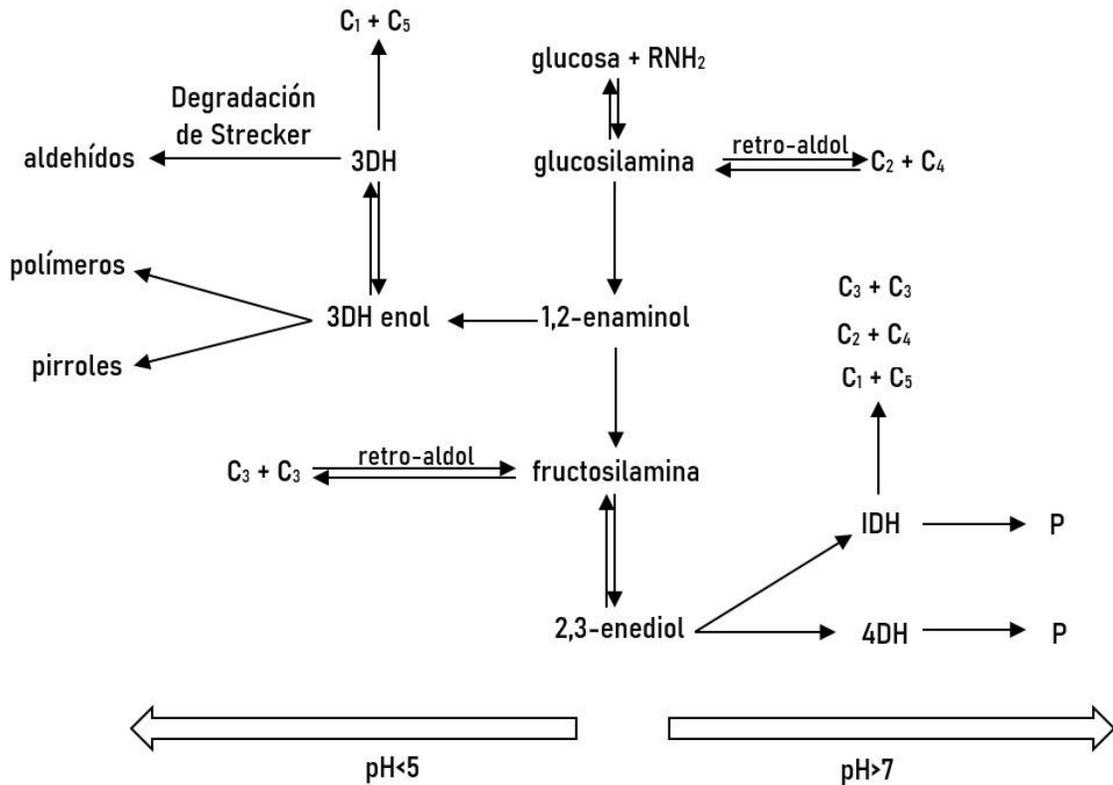


Figura 4.16. Modelo de la reacción de Maillard.

Los granos de cacao tienen distintos tamaños, según el país de origen, las condiciones climáticas, la estación del año en que se recogió la vaina y otros muchos factores. Tradicionalmente, los granos se tostaban en pequeños lotes de unos pocos cientos de kilogramos, a menudo en tostadores con forma de bola (véase la Figura 4.17). El operario podía sacar unos cuantos granos del tostador o de la bandeja de enfriamiento adjunta, y a partir del olor de los granos era capaz de ajustar la temperatura y los tiempos para asegurarse de que se había desarrollado el sabor correcto.



Figura 4.17. Tostador de granos de cacao en forma de bola.

Los granos también podían separarse para que tuvieran un tamaño similar dentro de cada lote. Con las fábricas modernas, que necesitan procesar varias toneladas de habas por hora, esto ya no es posible.

En la figura 4.18 se ilustra el problema causado por la variedad de tamaños de los granos. Aquí puede verse que cuando las condiciones de tostado se establecen para el tamaño medio del grano, los más pequeños se tuestan en exceso, mientras que los centros de los granos más grandes no se tuestan lo suficiente. Esto significa que en este último caso no se habrán convertido todos los precursores del sabor, por lo que el sabor a chocolate será bajo. En el caso de las habas pequeñas, pueden haberse producido otros compuestos, que no son necesariamente del sabor deseado.

Para superar esto, se han desarrollado dos métodos alternativos. En el primero sólo se tuesta el centro del grano, por lo que los trozos son mucho más pequeños y el calor puede llegar más fácilmente al centro. Este proceso se conoce como tueste del plumín. En el segundo, el plumín está finamente molido y se convierte en licor de cacao (también conocido como masa).

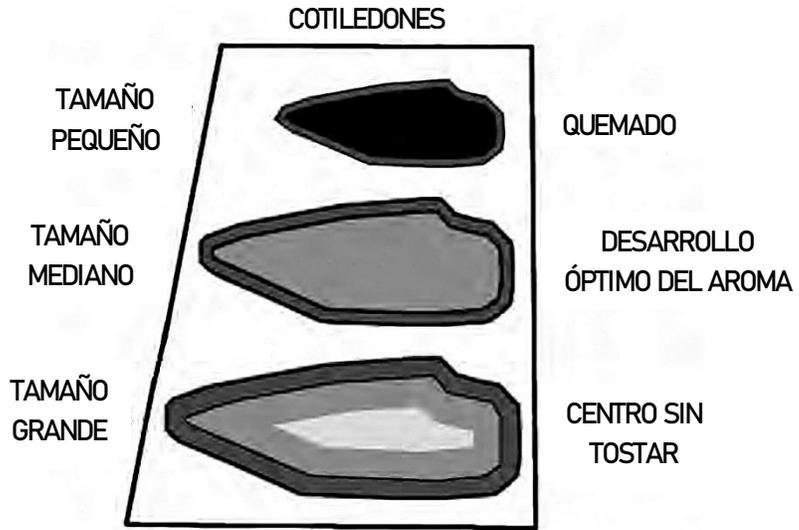


Figura 4.18. Efecto del tamaño del grano en el grado de tueste.

En este caso, la manteca de cacao ha sido liberada de las células del grano, de modo que cuando se calienta se convierte en un líquido. Este líquido puede ser calentado en un proceso llamado tueste de licor.

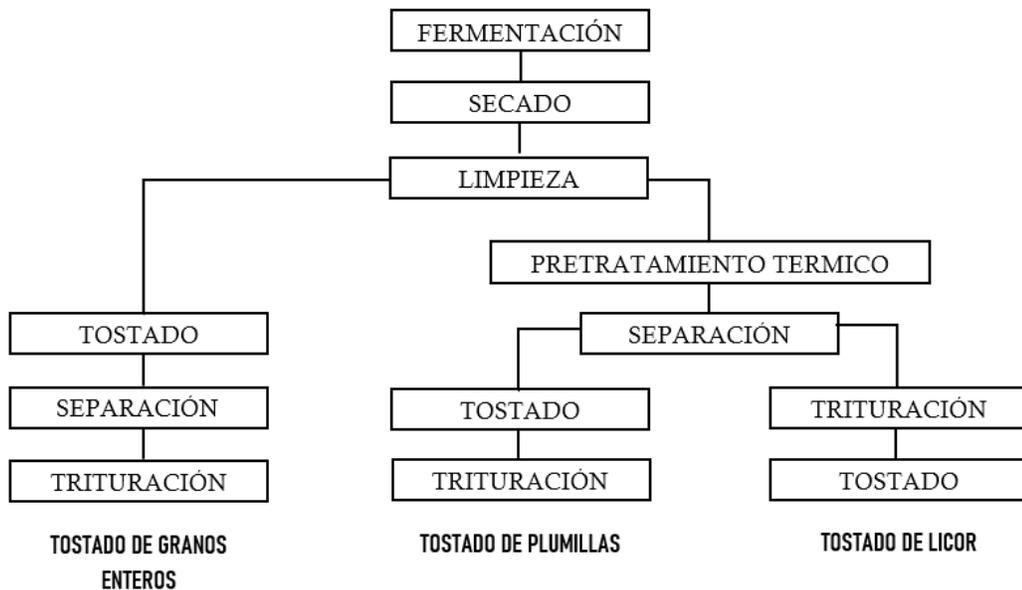


Figura 4.19. Diagrama de flujo que ilustra los 3 diferentes métodos para tostar granos de cacao.

En la figura 4.19 se muestra un diagrama de flujo esquemático de los diferentes métodos de tostado. En la industria del cacao se emplean tres métodos principales de tostado, que son los siguientes tres métodos principales de tostado en la industria del cacao:

- Tostado de granos enteros

El tostado de los granos enteros suele ser la forma tradicional de producir licor de cacao. En este proceso, los granos se tuestan primero antes de ser aventados para facilitar la eliminación de las cáscaras, que se rompen mediante un impacto a alta velocidad contra placas metálicas. Durante el proceso, el calor hace que parte de la grasa migre hacia las cáscaras, lo que provoca la pérdida de parte de la manteca de cacao. Esto es especialmente importante en el caso de las habas rotas o aplastadas.

- Tostado de plumillas

El tueste de las plumillas se realiza retirando primero las cáscaras antes del tueste, con lo que se superan muchas de las limitaciones del tueste de los granos enteros. Esto también permite tratar las plumillas con una solución alcalina o azucarada durante el tostado para ayudar a mejorar el desarrollo del sabor en ciertos tipos de cacao.

- Tostado de licor

En el tostado de licor, a menudo se utiliza un pretratamiento térmico antes del aventado para el tostado de licor. A continuación, el plumín se convierte en licor antes de la torrefacción. La principal desventaja del tostado de plumilla y de licor es que la cáscara debe retirarse antes de que se haya desprendido de la plumilla mediante el calentamiento, y esto puede dar lugar a una mala separación, especialmente con algunos tipos de cacao. Por ello, se han desarrollado diversas máquinas para pre tratar térmicamente los granos. Éstas desarrollan una alta temperatura superficial y evaporan la humedad interna, lo que a su vez

genera una presión dentro del grano, haciendo que la cáscara se desprenda del plumín.

Sin embargo, hay otros dos inconvenientes, además del problema de los granos de diferente tamaño. Al aplicar el calor, la manteca de cacao se funde. Parte de ella queda libre y pasa a la cáscara, donde permanece y se desecha tras el triturado. Se calcula que hasta un 0,5% de la manteca de cacao se pierde de este modo. Además, se requiere energía adicional para calentar el plumín a través de la cáscara. Toda la energía utilizada para calentar la cáscara también se desperdicia totalmente. Se calcula que se necesita hasta un 44% de energía extra en comparación con las otras formas de tostado.

Dado que la cáscara está relativamente unida a los cotiledones hasta que el haba se ha calentado, normalmente se requiere algún tipo de tratamiento previo antes del triturado. Este tratamiento consiste normalmente en exponer las habas a una fuente de calor intenso proporcionada por vapor saturado o radiación infrarroja. Esto calienta la superficie, pero el centro permanece mucho más frío y no se producen reacciones que cambien el sabor. El agua del interior del grano se evapora e hincha la cáscara, lo que hace que se separe mucho más fácilmente cuando el grano se rompe durante el procedimiento de craqueo.

En el caso del tueste de plumillas, las máquinas utilizadas son muy similares a las del tueste de granos. Sin embargo, para el tueste de licor, el plumín debe molerse finamente para convertirlo en líquido. Esto requiere un control muy cuidadoso de la humedad. Si el contenido de humedad es demasiado alto, el licor de cacao será una pasta espesa y no un líquido. Incluso pequeñas cantidades de agua reaccionan fuertemente con este sistema celulosa-proteína-grasa, y un contenido de humedad de alrededor del 10% produciría un material casi sólido que sería muy difícil de moler. Por otro lado, un contenido de humedad muy bajo produciría un chocolate con poco sabor. Durante el tostado, los precursores del sabor pueden reaccionar de diferentes maneras,

dependiendo de la cantidad de humedad presente. Con humedades muy bajas no pueden producir los compuestos de reacción deseados.

4.10 Molienda²

Una vez tostadas las habas son molidas de nuevo. En el molido las habas alcanzan mayor temperatura, y gracias a que el grano de cacao tiene un alto contenido en materia grasa (manteca) el “grué” se convierte, después de molido, en una masa líquida llamada pasta o licor de cacao que irá directamente al mezclado. La masa se somete a presión para extraerle la grasa, llamada aceite o manteca de cacao. Ahora si los dos principales ingredientes (masa y manteca de cacao), están listos para convertirse en chocolate.

La molienda de los plumines consiste en moler los granos de cacao para formar el licor de cacao. El objetivo es producir una viscosidad lo más baja posible para obtener un polvo de cacao suave y un sabor a chocolate durante el uso posterior del licor.

El objetivo de la molienda de la pluma de cacao es doble. El primero es hacer que las partículas de cacao sean lo suficientemente pequeñas para que puedan convertirse en chocolate. En el proceso posterior de elaboración del chocolate, se molerá más, por lo que no es necesario moler el plumín muy fino en esta fase. La segunda razón más importante es eliminar la mayor cantidad posible de grasa de las células de los cotiledones. La grasa es necesaria para ayudar a que el chocolate fluya, tanto al hacer los dulces como al derretirse en la boca. La grasa es también el ingrediente principal más caro del chocolate, por lo que económicamente es necesario aprovechar al máximo toda la grasa presente. El plumín tiene una estructura celular que contiene aproximadamente un 55% de manteca de cacao en forma sólida encerrada en las células. La grasa está contenida en células que tienen una media de entre 20 y 30 micras de largo y de 5-10 micras de ancho/alto, por lo que la molienda fina es particularmente importante.

La figura 4.20 muestra secciones de dos habas vistas desde el microscopio. La grasa se ha teñido para que aparezca oscura. Cuando la humedad está presente con la grasa, ambas no pueden mezclarse, pero pueden existir juntas en dos formas: es decir, una emulsión de agua en aceite, con aceite/grasa rodeando gotas de agua; o una emulsión de aceite en agua en la que el aceite/grasa está en pequeñas gotas.

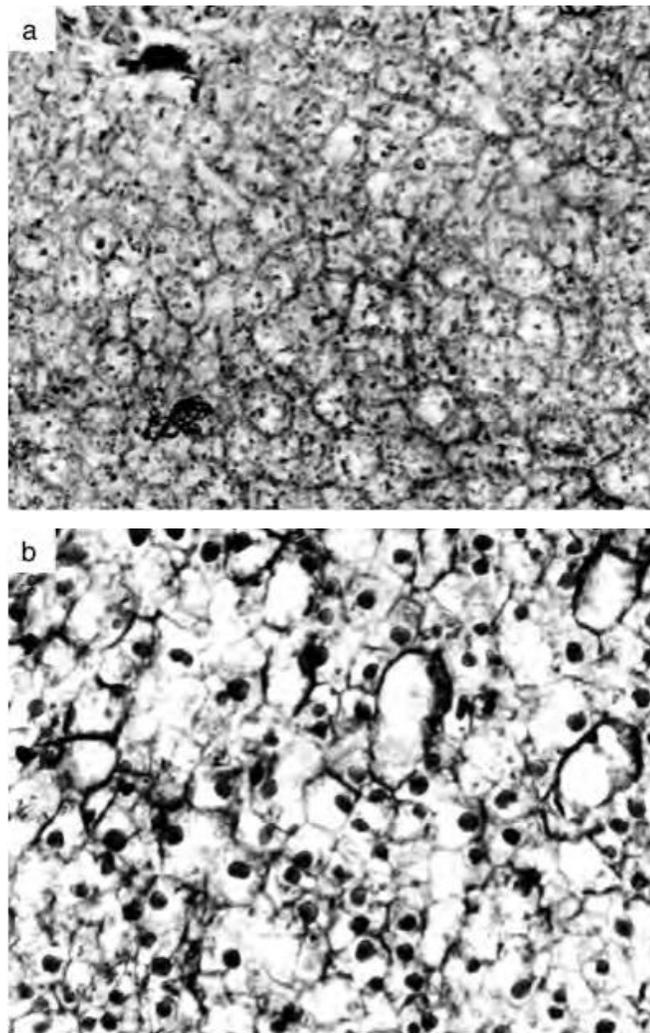


Figura 4.20. Secciones de granos de cacao vistas al microscopio (la grasa se tiñe de negro). (a) Emulsión de aceite en agua; (b) principalmente emulsión de agua en aceite.

La estabilidad de estas pequeñas gotas se ve favorecida por ciertos tipos de fosfoglicéridos (también conocidos como fosfolípidos), que forman una superficie entre el agua y la grasa. Son los llamados emulsionantes. Dentro del cacao hay un emulsionante llamado lecitina. Los dos tipos de emulsión pueden existir dentro de las células del cacao. La figura 4.20a muestra una emulsión mayoritariamente de aceite en agua y la figura 4.20b la fase inversa.

El objetivo de la molienda es sacar la grasa del interior de las células, para que pueda recubrir las partículas sólidas no grasas del chocolate. La grasa puede liberarse rompiendo las células. Hay más grasa dentro de la célula que la necesaria para recubrir las nuevas superficies creadas al romper las células. Esto significa que, a medida que la molienda reduce el tamaño de las células, el licor de cacao producido se vuelve más fino: hay más grasa libre. A la larga, ya no hay más grasa que liberar, y la molienda posterior sólo crea nuevas superficies que se recubren de grasa al desgarrar las células. Esto hace que el licor de cacao vuelva a ser espeso. En la figura 4.21 se muestran algunas figuras experimentales que ilustran esto.

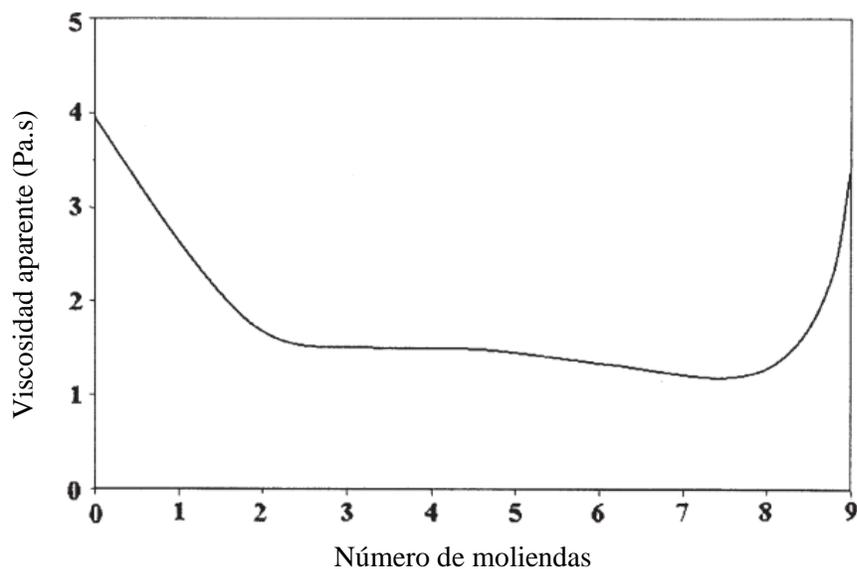


Figura 4.21. Viscosidad del licor de cacao molido a diferentes grosores.

Las paredes celulares están compuestas en gran parte por celulosa. La velocidad a la que la grasa puede atravesar la celulosa depende de la cantidad de humedad presente. Cuando se exprime la grasa del cacao para la producción de cacao en polvo, esta extracción puede verse favorecida por la adición de algo de humedad al licor. Sin embargo, cuando se muele, como se ha señalado para el tostado del licor, es mejor tener una humedad menor para permitir que el licor de cacao fluya más fácilmente.

La viscosidad del licor está relacionada con el grado de tostado que precede a la molienda y con el contenido de humedad del plumín. Se utilizan muchas máquinas para reducir los plumines a licor, entre las que se encuentran los molinos de piedra, molinos de discos, molinos de pernos o martillos y molinos de bolas.

Molinos de impacto. Los molinos de impacto funcionan golpeando las pepitas de cacao con pasadores o martillos de movimiento rápido. A veces las partículas se golpean contra tamices o cribas. La manteca de cacao se funde debido al calor del impacto y del propio molino y toda la grasa libre, junto con las partículas más pequeñas, pasa a través del tamiz. Las partículas más grandes permanecen en el interior hasta que las rompe la siguiente serie de pernos o martillos.

Molinos de disco. Los molinos de disco suelen constar de tres pares de discos de carborundo (véase la Figura 4.22). El licor de cacao o las pepitas se introducen en el centro del conjunto superior de discos, donde un disco gira pero el otro está inmóvil. Los discos se presionan entre sí y la masa de cacao es forzada a través de ellos hacia el exterior por la fuerza centrífuga. El alto cizallamiento destruye muchas de las partículas liberando gran parte de la grasa. El licor de cacao desciende por un conducto hasta el centro del juego de discos central y, finalmente, hasta el tercer juego.

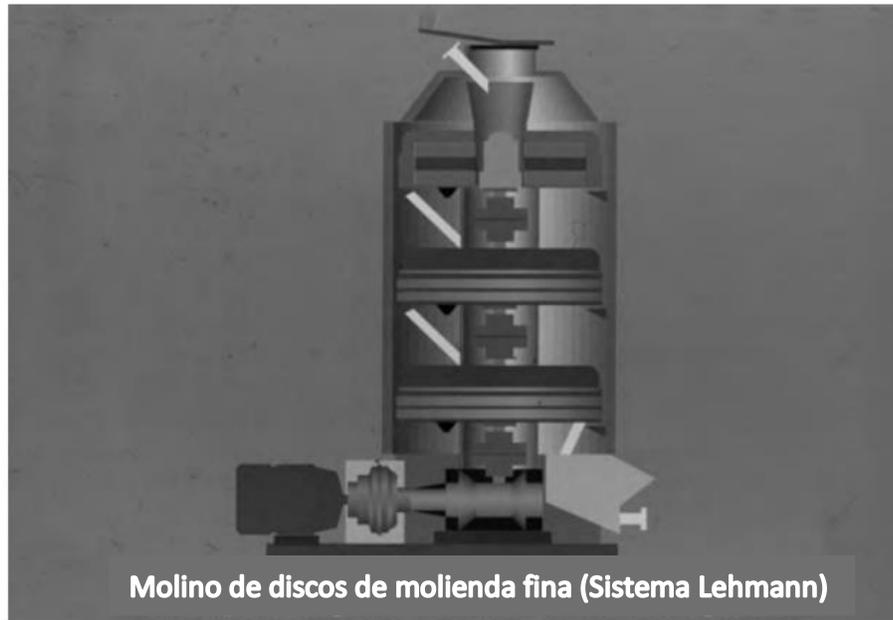


Figura 4.22. Esquema de un molino de triple disco (Lehmann Maschinenfabrik GmbH, Alemania).

Molinos de bolas. La mayor parte del cacao del mundo se muele con molinos de bolas, que sólo pueden moler líquidos y, por tanto, suelen ir precedidos de molinos de impacto. Los molinos contienen un gran número de bolas, que se hacen rebotar unas contra otras, ya sea haciéndolas girar mediante la rotación de la pared de su recipiente o mediante un eje de rotación central con varillas colocadas a intervalos en ángulo recto, como se ilustra en la figura 4.23 Las bolas impactan y giran (Figura 4.24) y cualquier partícula atrapada entre ellas se rompe por el aplastamiento o se separa debido al cizallamiento de la acción giratoria.

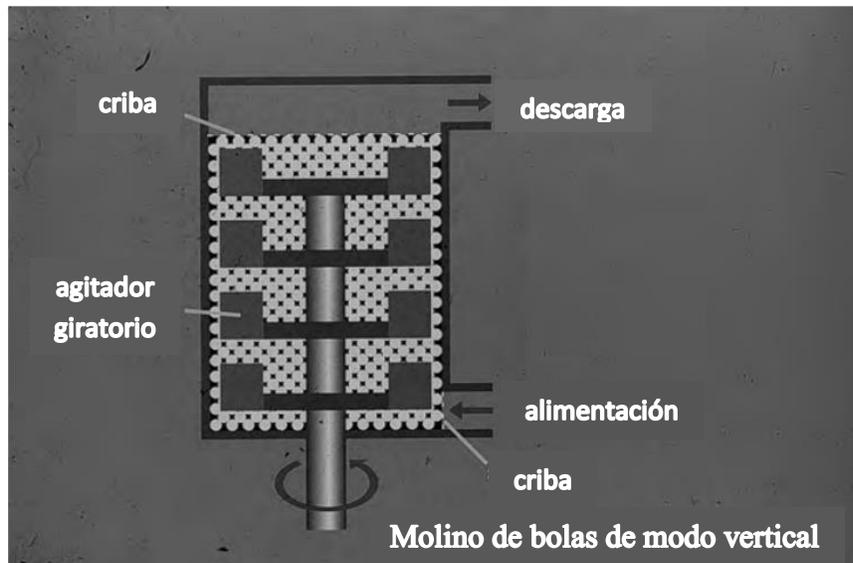


Figura 4.23. Diagrama esquemático de un molino de bolas agitado.

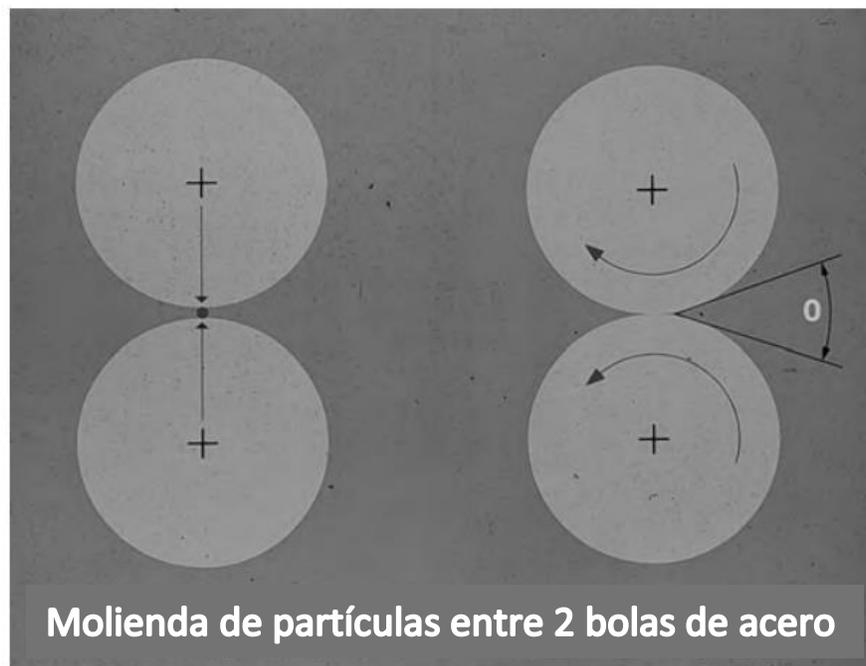


Figura 4.24. Ilustración de la acción de molienda entre bolas en un molino de bolas.

Las partículas más pequeñas se mueven más rápidamente en la grasa al ser empujadas por las bolas en movimiento, pero las más grandes tienen más posibilidades de ser molidas al moverse más lentamente. Con un licor de cacao grueso que contenga partículas de varios cientos de micras de diámetro, las

bolas pueden ser de hasta 15 mm. Cuando se desea obtener un licor más fino, se puede utilizar una serie de molinos de bolas, cada uno de los cuales contiene bolas más pequeñas, de hasta 2 mm.

En el mismo espacio caben más bolas pequeñas, por lo que aumenta mucho la posibilidad de que una partícula quede atrapada entre dos de ellas. La velocidad del agitador también aumenta con las bolas más pequeñas. Se utilizan tamices en la salida de los molinos para evitar que las bolas dañen la maquinaria durante las siguientes etapas de la elaboración del chocolate. Las bolas se desgastan y se sustituyen a intervalos regulares. Los imanes de los tubos de salida atrapan los trozos de metal que salen del molino.

Es necesario moler el plumín desde un tamaño máximo de partícula de unos 0,5 cm hasta menos de 30 micras. Esto significa que las partículas deben reducirse 100 veces. La mayoría de las fresadoras sólo pueden funcionar eficazmente si la reducción es de 10 veces, por lo que se necesitan al menos dos etapas de molienda. Además, algunos molinos funcionan mejor con materiales duros, mientras que otros sólo funcionan con líquidos. Esto significa que el cacao se muele normalmente dos veces, inicialmente mediante un molino de impacto que funde la grasa y produce un líquido que contiene grandes partículas de varios cientos de micras de diámetro. El segundo molino suele ser un molino de bolas, que sólo funcionará con un líquido, o un molino de discos, basado en los molinos de maíz originales, que funcionará con material líquido o sólido. Las partículas de cacao molido incluyen el cacao almidón, que constituye aproximadamente el 7% en peso del licor de cacao. Este tiene un tamaño de partícula de entre 2 y 12,5 micras, por lo que no se destruye en el proceso de molienda. Aproximadamente el 10% del licor está compuesto por celulosa y un porcentaje ligeramente mayor por proteínas.

Si la fábrica va a prensar el licor de cacao para hacer cacao en polvo, el licor de cacao no suele molerse tan finamente como cuando se utiliza para el chocolate.

Esto se debe a que las partículas de licor de cacao muy finamente molidas bloquearán los filtros de las prensas de cacao y dificultarán la extracción de la manteca de cacao. Sin embargo, en la fabricación de chocolate es ventajoso que se libere la mayor cantidad posible de manteca de cacao de las células.

La molienda se realiza en un proceso de varias etapas. El tratamiento térmico generado durante el proceso de molienda hace que la manteca de cacao de la pluma se derrita, formando el licor de cacao. El licor de cacao refinado se calienta en tanques de almacenamiento a una temperatura de unos 90-100 °C para su envejecimiento y destrucción microbiana, tras lo cual el licor se envasa para su venta. Normalmente, se recoge aproximadamente el 78-90% de la manteca de cacao mediante prensado; los lípidos residuales pueden eliminarse mediante extracción con fluidos supercríticos.

La manteca de cacao constituye aproximadamente la mitad del peso del cacao en grano. Esta grasa se extrae parcialmente del licor de cacao mediante prensas hidráulicas que aplican presiones de hasta 520 kg/cm², y las prensas más grandes admiten una carga de hasta 113,4 kg por ciclo de prensado.

La manteca de cacao de mayor calidad se obtiene prensando el licor de cacao en una prensa horizontal del tipo mostrado en la figura 4.25. La sección superior (4) consta de una serie de ollas, cuya base es una malla de acero inoxidable. El licor de cacao caliente se introduce en la olla, que es prensada por un pistón de acero que funciona a una presión de unos 40-50MPa. El plumín contiene inicialmente alrededor de un 55% de manteca de cacao y esta presión es capaz de empujar más de la mitad de esta grasa a través del tamiz, donde fluye por un tubo hasta el punto de pesaje. La presión se aplica inicialmente de forma lenta, para evitar la formación de capas duras que impedirían la salida de más grasa.

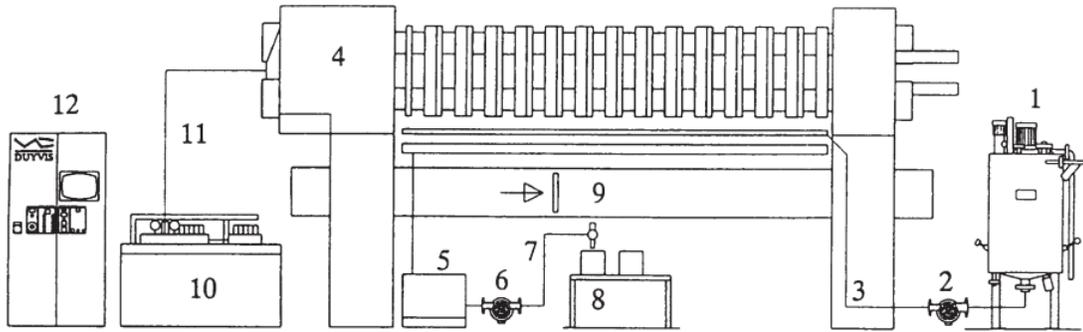


Figura 4.25. Representación esquemática de los principios de funcionamiento de una prensa horizontal de manteca de cacao. (1) Depósito de acondicionamiento del licor de cacao; (2) bomba; (3) tubería para el licor de cacao; (4) prensa hidráulica de cacao; (5) balanzas de manteca de cacao; (6) bomba de manteca de cacao; (7) tubería de manteca de cacao; (8) bloqueo de la manteca de cacao; (9) transportador de empuje de la masa de cacao; (10) unidad de bombeo hidráulico; (11) tubería hidráulica; (12) panel de control.

El operador puede aumentar la presión hasta que se haya eliminado la cantidad necesaria de manteca de cacao. Esto deja un material duro en los botes, que contiene entre un 8% y un 24% de grasa, dependiendo del tipo de polvo que se produzca. Los discos duros y redondos de material se conocen como torta de prensado de cacao. Cuando se abren los botes, éstos son expulsados automáticamente y caen sobre una cinta transportadora (9).

La mantequilla de menor calidad se obtiene mediante un proceso de expulsión continua que extrae la grasa de los granos de cacao enteros, lo que incluye la cáscara. Muy a menudo, estas habas no tienen el nivel adecuado para hacer chocolate, ya que pueden no estar bien fermentadas o tener un sabor demasiado ácido. La cáscara contiene algunas grasas que no son manteca de cacao. Éstas también se exprimen y se mezclan con la manteca de cacao. Esto es perjudicial para la dureza y las propiedades de fraguado de la manteca de cacao debido a su efecto eutéctico. A menudo, esta manteca de cacao es turbia y debe filtrarse. Cuando la torta de prensado se produce a partir de granos enteros o de calidad inferior, tiene poco valor y normalmente se utiliza como alimento para animales.

Como alternativa, la grasa restante puede eliminarse mediante la extracción con disolventes o con fluidos supercríticos.

Al comprar manteca de cacao, se dan una serie de especificaciones al productor. Entre ellas se encuentra un contenido máximo de ácidos grasos libres (normalmente 1,75%). En este caso, los ácidos se han desprendido de la "columna vertebral" de glicerol del triglicérido. Estos ácidos alteran las propiedades de fraguado del chocolate. También existe un valor máximo de saponificación (0,5%), para garantizar que no se produzca un sabor jabonoso. (El valor de saponificación es el número de mg de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para reaccionar con 1 g de manteca de cacao). La manteca de cacao pura prensada tiene un sabor, que pasará a formar parte del conjunto del chocolate. Para algunos productos, en particular el chocolate blanco, este sabor se considera desagradable. En este caso se utiliza manteca de cacao desodorizada. A menudo se produce mediante la destilación destilando la manteca de cacao al vacío.

Dependiendo del tiempo de prensado y de los ajustes de la prensa, la torta resultante puede tener un contenido de grasa entre el 10 y el 24%. Se pueden obtener dos tipos de torta de cacao mediante el proceso:

- Masa con alto contenido de grasa que contiene entre 22% y 24% de grasa residual en la torta prensada.
- Masa baja en grasa que contiene entre un 10 y un 12% de grasa residual en la torta prensada.

La manteca de cacao extraída se descarga en receptáculos desde los que se bombea a un tanque intermedio para su posterior procesamiento. Tras el prensado, las masas liberadas son bastante grandes para manipularlas y, por lo tanto, se pasan por máquinas trituradoras para dividir las en trozos más pequeños, conocidos como triturada de masa. La masa triturada obtenida se

almacena por su contenido en grasa y su grado de alcalinización, y puede mezclarse antes de la pulverización para obtener el tipo de cacao en polvo deseado.

Las líneas de molienda de polvo suelen incluir molinos de martillos y discos o de agujas, que pulverizan las partículas de la masa de cacao hasta alcanzar el nivel de finura definido para el polvo de cacao. Tras la pulverización, el polvo se enfría para que la grasa del cacao en polvo cristalice en su forma estable. Así se evita la decoloración (flor de grasa) y la formación de grumos en las bolsas después del envasado, fenómeno que se produce por la insuficiente cristalización de la grasa en el momento del llenado. El polvo que fluye libremente se hace pasar por tamices y por imanes antes de envasarlo en contenedores a granel o en bolsas de papel de cuatro capas forradas de polietileno.

El cacao en polvo se produce moliendo la torta de la prensa de cacao. Una vez que ésta sale de las prensas, se rompe en trozos de menos de 3 cm de diámetro entre dos rodillos con púas que giran en direcciones opuestas. A continuación, se utiliza un molino de púas refrigerado para moler finamente el polvo. A continuación, debe enfriarse fuertemente mientras se transporta en una corriente de aire a través de un largo tubo hasta la zona de envasado. La mayor parte de la grasa sigue siendo líquida después del molino y debe solidificarse antes del envasado para evitar que el polvo se pegue. A continuación, se recoge en un separador ciclónico y las partículas más finas se eliminan mediante un sistema de filtros. La mayor parte del polvo se produce con un contenido de grasa del 20-22%. También se pueden fabricar con un contenido de grasa inferior, por ejemplo, del 15 al 17% o del 10 al 12%.

También se produce y se vende un polvo sin grasa para productos bajos en grasa o sin grasa. El polvo puede mezclarse con otras grasas para producir coberturas con sabor a chocolate (grasa vegetal compuesta) o para producir mezclas y rellenos para pasteles, etc. Una gran cantidad se utiliza para fabricar

bebidas de chocolate. Éstas se elaboran con azúcar, cacao en polvo y lecitina. La lecitina puede añadirse a la torta rota de la prensa y luego molerse con ella. De este modo se garantiza que la lecitina esté estrechamente unida al cacao, especialmente a la grasa. La lecitina actúa como emulsionante y forma un límite entre la grasa y otras partículas de cacao y el agua cuando se prepara la bebida. Esto ayuda a que estas partículas se dispersen por el agua en lugar de formar grumos.

4.11 Mezclado²

La mezcla de los ingredientes durante la fabricación del chocolate es una operación fundamental empleada mediante combinaciones de tiempo y temperatura en mezcladores continuos o por lotes para obtener una consistencia constante de la formulación. En la mezcla por lotes, el chocolate que contiene licor de cacao, azúcar, manteca de cacao, grasa láctea y leche en polvo (dependiendo de la categoría del producto) se mezcla a fondo normalmente durante 12-15 minutos a 40-50 °C. Los grandes fabricantes de chocolate, como Nestlé y Cadbury, suelen utilizar la mezcla continua con amasadoras automáticas conocidas, lo que produce una textura algo dura y una consistencia plástica.

En una batidora se mezclan la masa de cacao y la manteca de cacao con azúcar y, en su caso, otros ingredientes como leche y vainilla, hasta que se transforma en una pasta de textura arenosa.

Para elaborar el chocolate se vierten en una mezcladora diferentes ingredientes en función del tipo de chocolate:

- Chocolate negro: pasta de cacao, manteca de cacao, azúcar
- Chocolate con leche: pasta de cacao, manteca de cacao, azúcar y leche
- Chocolate blanco: manteca de cacao, azúcar y leche.

4.12 Refinación²

El refinado del chocolate es importante para producir la textura suave que se desea en la confitería de chocolate moderna. Las mezclas de azúcar y licor de cacao (y sólidos lácteos, según el tipo de chocolate) con un contenido global de grasa del 8-24% tienen una textura granulosa por lo que se refinan hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a 30 μm para asegurarse de que no haya partículas en el chocolate que le den un sabor arenoso, normalmente mediante una combinación de refinadores de dos y cinco rodillos. El tamaño final de las partículas influye decisivamente en las propiedades reológicas y sensoriales. Es un proceso esencial pues confiere al chocolate gran parte de su finura y calidad. Otro factor importante es garantizar que no haya demasiadas partículas muy pequeñas. A diferencia del licor de cacao, que se vuelve más fino al molerlo, el chocolate se vuelve más grueso. Esto se debe a la creación de más partículas finas.

Existen dos métodos diferentes para moler los ingredientes del chocolate: la molienda fina (o separada) y la molienda combinada. En el proceso de ingrediente fino, los componentes sólidos y no grasos se muelen por separado y luego se añaden al licor de cacao, la manteca de cacao y otros ingredientes líquidos en la concha. En la molienda combinada, estos ingredientes se mezclan con el licor de cacao y algunas de las otras grasas antes de la molienda. Es probable que los dos procesos den un sabor diferente, ya que el azúcar recogerá muchos de los aromas en el molino donde se está moliendo, y en el segundo proceso hay cacao en las proximidades. Cada proceso tiene sus propias ventajas e inconvenientes, aparte de los aspectos relacionados con el sabor. El proceso de ingredientes finos permite controlar mejor el número de partículas finas, pero las partículas están en gran parte libres de grasa al final de la molienda. Esto significa que el proceso de recubrimiento de grasa en la concha lleva más tiempo que si muchas de ellas ya estuvieran recubiertas, como es el caso de la molienda combinada.

Los molinos deben reducir el azúcar y otras partículas sólidas en un factor de aproximadamente 100, de milímetros a decenas de micras. Se trata de una proporción similar a la de romper un ladrillo en trozos del tamaño de los granos de azúcar. Al fabricar el licor de cacao se observó que era mejor reducir el tamaño de las partículas en una serie de pasos, en lugar de en una sola operación. Esto también es cierto para los ingredientes del chocolate. Los molinos de martillos/pasadores del tipo que se utiliza para romper la pluma de cacao son muy eficaces para romper el azúcar. Se trata de un material muy frágil que, al ser golpeado con fuerza por un martillo metálico o un alfiler de movimiento rápido, se rompe en muchos trozos pequeños. La leche en polvo es mucho más elástica y difícil de romper, por lo que requiere mucho más tiempo en el molino.

El método tradicional de fabricación de chocolate consistía en hacer pasar el azúcar por un molino de este tipo para que el tamaño medio de las partículas fuera de unas 100 micras. A continuación, se añadía a los componentes de la leche y al licor de cacao para una molienda combinada. Esto todavía se lleva a cabo en algunas fábricas, pero el proceso ha sido sustituido en gran medida por un proceso de molienda combinada que utiliza dos juegos de refinadores de rodillos, como se describe en la siguiente sección.

Para reducir aún más el tamaño de las partículas hasta alcanzar el tamaño requerido de las partículas de chocolate, normalmente se requiere otra etapa de molienda. Sin embargo, es posible que todo el proceso tenga lugar en una sola máquina, denominada molino clasificador, uno de cuyos tipos se ilustra en la figura 4.26. Dentro de él pueden tener lugar una serie de etapas de molienda antes de que las partículas finamente molidas salgan del molino.

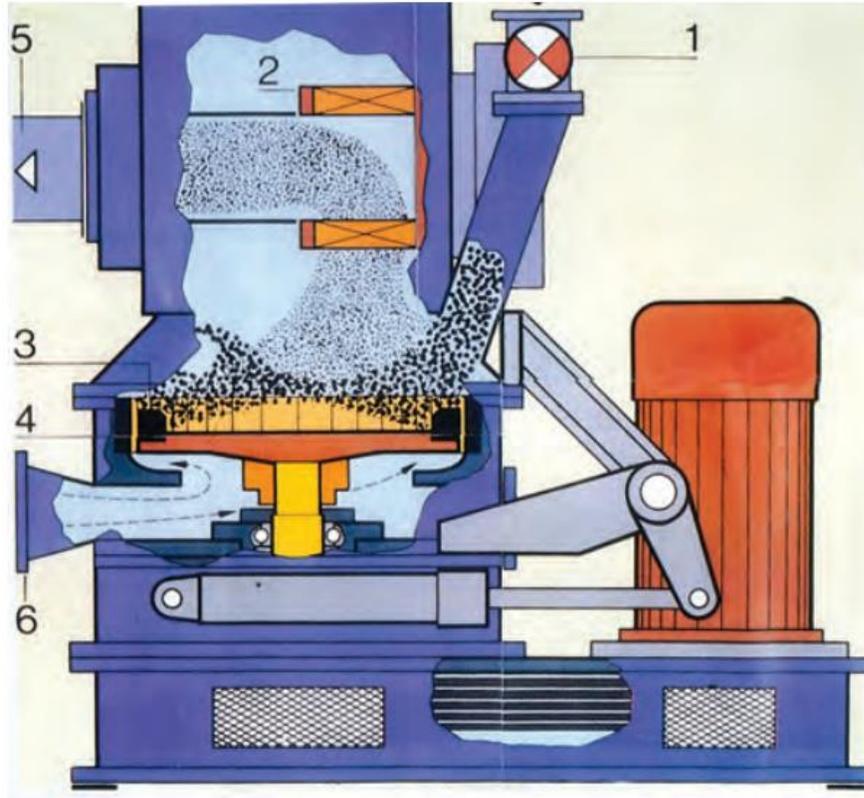


Figura 4.26. Diagrama esquemático de un molino clasificador fabricado por Hosakawa Micron. (1) Válvula de entrada de material; (2) clasificador; (3) martillos de molienda; (4) disco de molienda; (5) salida a ciclones y bolsas de filtro; (6) entrada de aire.

Las partículas de azúcar y de leche en polvo se introducen en el molino a través de una rampa (1) y se depositan en un disco de molienda (4). Este disco gira varios miles de veces por minuto y tiene martillos metálicos, cuñas o clavijas en el borde (3), que golpean las partículas, rompiendo algunas y desprendiendo trozos de otras. Un gran volumen de aire atraviesa el molino, entrando por (6) y saliendo por (5). Esto levanta las partículas y trata de arrastrarlas a través del clasificador (2). Consiste en un cilindro hueco que gira rápidamente y al que se le han practicado cortes laterales. En un flujo de aire rápido, las partículas más pequeñas pueden viajar casi a la misma velocidad que el aire, pero las más grandes son mucho más lentas debido a su peso e inercia. A medida que el aire pasa por las rendijas, las más pequeñas pueden pasar con él y salir del molino, donde son recogidas por los separadores ciclónicos y las bolsas filtrantes. Las

más grandes, al ser más lentas, son golpeadas por las barras móviles entre las ranuras y devueltas de nuevo a la zona de rotura. Las partículas más grandes recircularán tantas veces como sea necesario para que todas ellas sean lo suficientemente pequeñas como para pasar por el clasificador. En la práctica, esto significa que las pequeñas partículas de azúcar que se desprenden de los cristales más grandes salen del molino en el primer circuito, pero parte del azúcar y la mayor parte de la leche recircularán varias veces. Todas las partículas dentro del molino viajan a gran velocidad y chocan entre sí, lo que provoca una gran cantidad de roturas adicionales.

Hay dos controles sobre el tamaño de las partículas que el fabricante puede utilizar para obtener el necesario para el chocolate que se está elaborando. Uno es la velocidad del flujo de aire. Si éste aumenta, pasan más partículas por las rendijas y se obtiene un producto más grueso. Sin embargo, si se aumenta la velocidad del cilindro clasificador, ocurre lo contrario, las barras atrapan más partículas y el producto se vuelve más fino. Dado que las partículas salen del molino tan pronto como se han reducido al tamaño requerido (a diferencia de la molienda combinada, en la que todas las partículas pasan por el molino hasta que se han destruido las más grandes), este tipo de molino produce relativamente menos partículas finas que la molienda combinada. Los molinos generan mucho calor, y esto puede hacer que parte del azúcar pase de una forma cristalina a una amorfa. Además, la grasa presente se derretirá, lo que hará que las partículas se vuelvan muy pegajosas y obstruyan las tuberías. Cuando hay más de un 12% de grasa, se necesita algún tipo de refrigeración. A niveles aún más altos, se puede introducir nitrógeno líquido con el aire y realizar una molienda criogénica. Este tipo de molino se utiliza a menudo para procesar el cacao en polvo de la masa de prensado, así como para fabricar chocolate.

En el proceso utilizado por muchas fábricas modernas de chocolate, las partículas sólidas se muelen mediante refinadores de rodillos. El proceso se muestra de forma esquemática en la figura 4.27.

Inicialmente, el licor de cacao, el azúcar granulado y los componentes de la leche se colocan en una mezcladora de gran potencia junto con parte de la manteca de cacao. (En el caso de los chocolates elaborados con migas de pan, la mayor parte de los componentes sólidos están contenidos en las migas, que está en forma de polvo parcialmente molido). Es importante convertir esta mezcla en una pasta uniforme con la consistencia adecuada para que la molienda se realice correctamente.

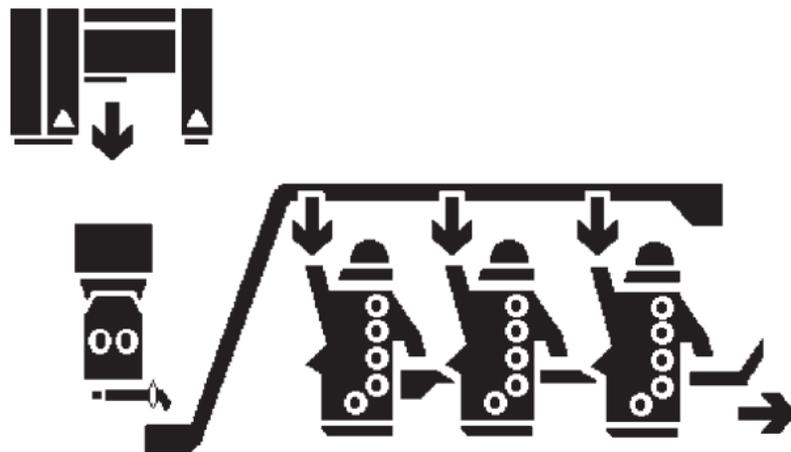


Figura 4.27. Esquema de la planta de fabricación de chocolate de dos y cinco rodillos.

La molienda final tiene lugar en una refinadora de cinco rodillos, similar a la que se muestra en la figura 4.28, que puede tener entre 75 cm y 2,5 m de ancho. En ellas se reduce la pasta a un tamaño máximo de partícula de entre 15 y 35 micras, determinado por ya sea por la utilización de un micrómetro mejorado y/o un contador Coulter. El tamaño real dependerá del tipo de chocolate que se elabore, y afecta en gran medida a sus propiedades de flujo como líquido, así como al sabor y la textura en la boca.



Figura 4.28. Refinadora de 5 rodillos.

Una refinadora de cinco cilindros consiste en un conjunto vertical de cuatro cilindros huecos, cuya temperatura se controla mediante un flujo de agua interno, y que se mantienen unidos por presión hidráulica. Una fina película de chocolate es atraída por rodillos cada vez más rápidos, recorriendo el refinador hasta que es retirada por una cuchilla. El cizallamiento de los rodillos fragmenta las partículas sólidas, recubriendo las nuevas superficies con lípidos, de modo que éstas se vuelven activas y absorben los compuestos aromáticos volátiles de los componentes del cacao.

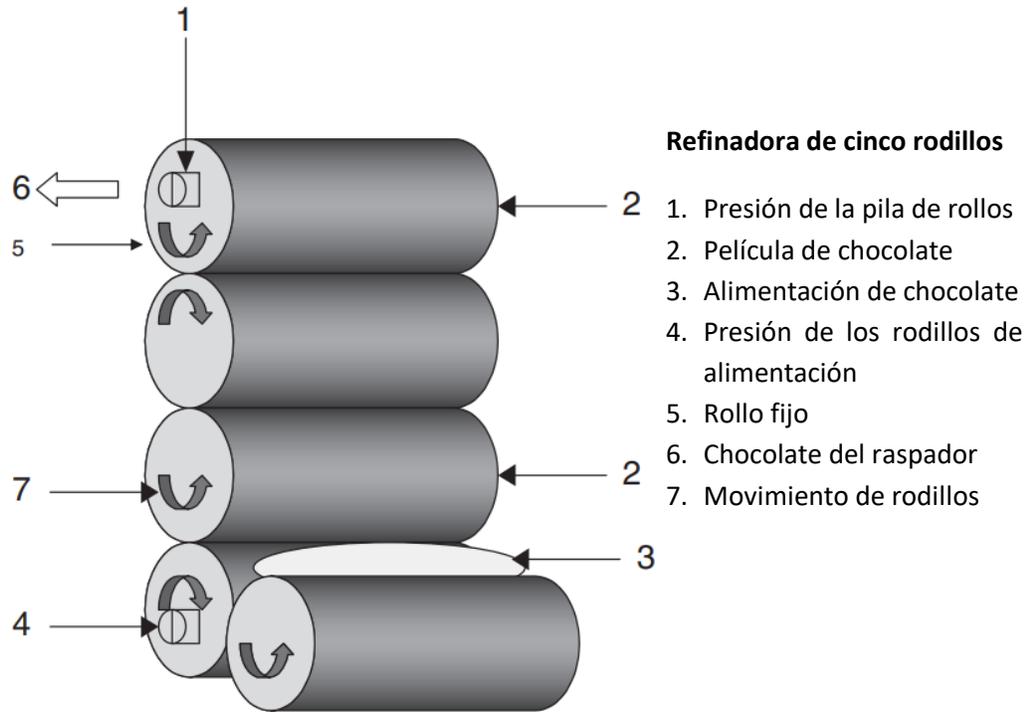


Figura 4.29. Refinador típico de cinco rodillos.

La refinadora de cinco cilindros consta de cinco cilindros horizontales con forma de barril, con cuatro de los cilindros colocados uno encima del otro (Figura 4.29). El primer cilindro, o de alimentación, se coloca debajo de los demás, pero en un lateral, de modo que se forma una cubeta entre él y el segundo cilindro, que contendrá la pasta procedente de la refinadora de dos cilindros. Al tener cuatro huecos de trituración y moler tan finamente, la máquina de cinco cilindros funciona mucho más lentamente que la de dos cilindros, con su único hueco. Por ello, normalmente se utiliza una máquina de dos rodillos junto con varias de cinco rodillos. Los cilindros son huecos y pueden ser enfriados o calentados por el agua que fluye a través de ellos. También se presionan estrechamente entre sí, normalmente mediante un sistema hidráulico. Esta presión dobla la forma del cilindro para que se vuelva recta y haya un espacio recto y uniforme entre los cilindros. Una hoja de cuchillo colocada en la parte posterior del quinto cilindro retira el chocolate en forma de copos o de polvo.

Las grandes partículas pueden romperse de muchas maneras. Golpeándolas con fuerza, como en el molino de martillos, se pueden romper en dos o más trozos de tamaño similar, o se pueden desprender trozos más pequeños de los bordes. El aplastamiento entre dos superficies duras ha demostrado ser una de las formas en que los molinos de bolas funcionan al moler el licor de cacao. Otra forma es utilizar el cizallamiento para separarlos. El cizallamiento está relacionado con la diferencia de velocidad entre dos superficies en movimiento dividida por la distancia entre ellas. Esto significa que si dos superficies se desplazan a velocidades muy diferentes y están muy próximas, se produce una acción de cizallamiento muy elevada, que separará las partículas. Este es el caso de una refinadora de cinco rodillos.

Cada rodillo sucesivo es más rápido que el anterior, y como la película de chocolate es atraída por la superficie que se mueve más rápido en lugar de por la más lenta, sigue subiendo por la refinadora en lugar de seguir dando vueltas al fondo. Este tipo de máquina funciona con una película continua de chocolate desde el comedero (tolva) hasta la cuchilla. El grosor de la película depende de la distancia entre el rodillo en cuestión y el inferior. En la Figura 4.30 se ilustra lo que ocurre realmente con la separación entre el segundo y el tercer rodillo. El rodillo inferior gira, por ejemplo, a 55 rpm (5.76 rad/s) y tiene un espesor de película de 100 micras. El segundo rodillo gira a 150 rpm (15.71 rad/s), pero la película debe ser continua. Esto significa que se estira con la velocidad más alta, por lo que el grosor se reduce según la relación entre las velocidades de los dos rodillos, es decir, pasa a tener un grosor de $100 \times 55/150$ micras (= 37 micras). La finura final depende, pues, de la relación entre las velocidades de los distintos cilindros y del espesor de la película inicial. Este último depende de la anchura de salida de la hendidura de la cubeta, es decir, de la separación entre los dos primeros rodillos. Curiosamente, se ve muy poco afectado por la presión, que actúa principalmente para dar una película uniforme a lo largo del rodillo.

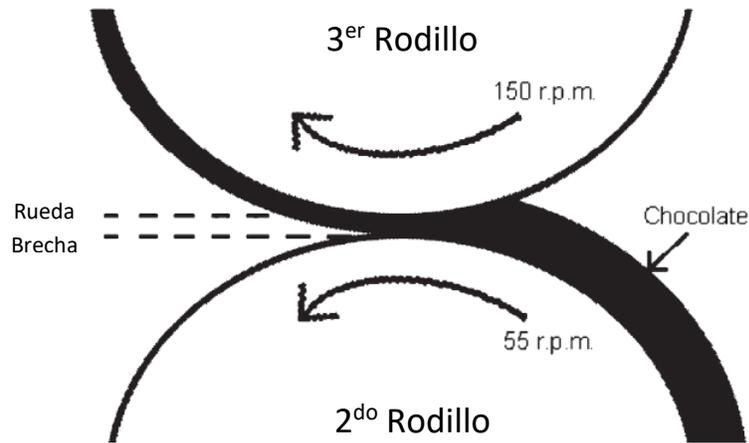


Figura 4.30. Detalle del hueco entre el segundo y el tercer rodillo de una refinadora de cinco rodillos. Nota: 1 r.p.m. es equivalente a $\frac{\pi}{30}$ rad/s

La temperatura también desempeña un papel importante en el funcionamiento de una refinadora de rodillos. Esto altera la textura/viscosidad de la película al cambiar las propiedades de flujo de la grasa presente. Dado que las superficies de los rodillos giran a velocidades relativamente altas, existe una fuerza centrífuga sobre las partículas individuales que trata de arrojarlas fuera de la máquina. La propia película tira de ellas, mientras sigan siendo parte de la película. Si algo va mal en la textura de la película, por ejemplo, si parte de la grasa se cuaja porque está demasiado fría, las partículas se liberan y el chocolate se desprende de la máquina. Por lo tanto, el control de la temperatura es muy importante a la hora de triturar el chocolate.

El cizallamiento entre los rodillos no sólo rompe las partículas, sino que también recubre de grasa algunas de las superficies recién creadas. Además, al producirse la rotura, las superficies recién formadas, que son químicamente muy reactivas, son capaces de captar las sustancias químicas aromáticas volátiles de las partículas de cacao que se rompen al mismo tiempo. Esto significa que el chocolate puede tener un sabor diferente al que se obtiene con el proceso de molienda por separado.

4.13 Conchado²

Para que la mezcla alcance toda su finura y viscosidad y acabe de desarrollar todos los aromas, el cacao se somete al proceso de conchado, proceso en que la mezcla será amasada durante horas o incluso durante días, y donde perderá parte de los aromas amargos y ácidos y desarrollará todos los aromas más preciados en el chocolate. Durante el conchado se añade manteca de cacao y lecitina con el fin de incrementar la fluidez de la mezcla. También se incorpora aroma natural de vainilla que permitirá darle el gusto definitivo deseado. Es el conchado, junto con la torrefacción (proceso de tostado de los granos de cacao), el otro proceso clave en la elaboración de chocolate.

El conchado se considera el punto final o la operación final en la fabricación de chocolate a granel, ya sea con leche o negro. Es un proceso esencial que contribuye al desarrollo de la viscosidad, la textura final y el sabor. El conchado se realiza normalmente agitando el chocolate a más de 50 °C durante algunas horas. En las primeras etapas, se reduce la humedad y se eliminan ciertos volátiles activos indeseables, como el ácido acético, y posteriormente se promueven las interacciones entre la fase dispersa y la continua. Además de la eliminación de la humedad y de los ácidos volátiles, el proceso de conchado favorece el desarrollo del sabor debido a la mezcla prolongada a temperaturas elevadas, dando un sabor parcialmente caramelizado en el chocolate sin miga de leche. El proceso también contribuye a la reducción de la viscosidad de las pastas refinadoras a lo largo del proceso, así como a la reducción del tamaño de las partículas y a la eliminación de sus bordes.

La concha de chocolate fue inventada por Rudi Lindt en Suiza en 1878 y recibió su nombre por la concha, a la que se parecía en su forma. Decía que ayudaba a que su chocolate fuera más suave y que modificaba el sabor. Cuando se inventó la concha, la capacidad de moler el chocolate era escasa, por lo que es posible que las partículas se rompieran en su cocha, lo que hacía que el chocolate fuera más suave. Hoy en día, sin embargo, los sistemas de molienda

son muy eficaces y casi no se producen más roturas, salvo cuando las partículas se mantienen sueltas como aglomerados. El conchado sigue cambiando el sabor del chocolate y también la forma en que se funde en la boca. Además, de importancia crítica para el fabricante de chocolate, determina la viscosidad final del chocolate líquido antes de utilizarlo para elaborar los productos finales.

El proceso de conchado es en realidad dos procesos distintos que tienen lugar que tienen lugar en la misma máquina. El primero es el desarrollo del sabor. Los procesos de fermentación y tostado producen los componentes de sabor necesarios para dar al chocolate su agradable sabor, pero también pero también dan lugar a algunos astringentes/ácidos indeseables que es que es necesario eliminar. Además, algunos chocolates necesitan un mayor desarrollo del sabor, por ejemplo, para algunos propósitos, es deseable un mayor sabor cocido. El segundo proceso consiste en hacer que el chocolate pase de ser un polvo, un copo o una pasta seca y espesa a un líquido que fluye libremente y que puede utilizarse para elaborar los productos finales. Para ello, se recubre la superficie de las partículas sólidas con grasa, de modo que puedan deslizarse unas sobre otras.

Durante la fermentación, se forma el ácido etanoico y, en menor medida, otros ácidos grasos volátiles de cadena corta, como los ácidos propiónico e isobutírico (2 metil propanoico). Sin embargo, tienen puntos de ebullición superiores a los 118 °C, lo que es considerablemente superior a la temperatura del chocolate durante la mayoría de los procedimientos de conchado. Sin embargo, se elimina la humedad del chocolate, especialmente durante las primeras partes del proceso (Figura 4.31), lo que puede ayudar a la eliminación de los ácidos mediante un tipo de proceso de destilación al vapor.

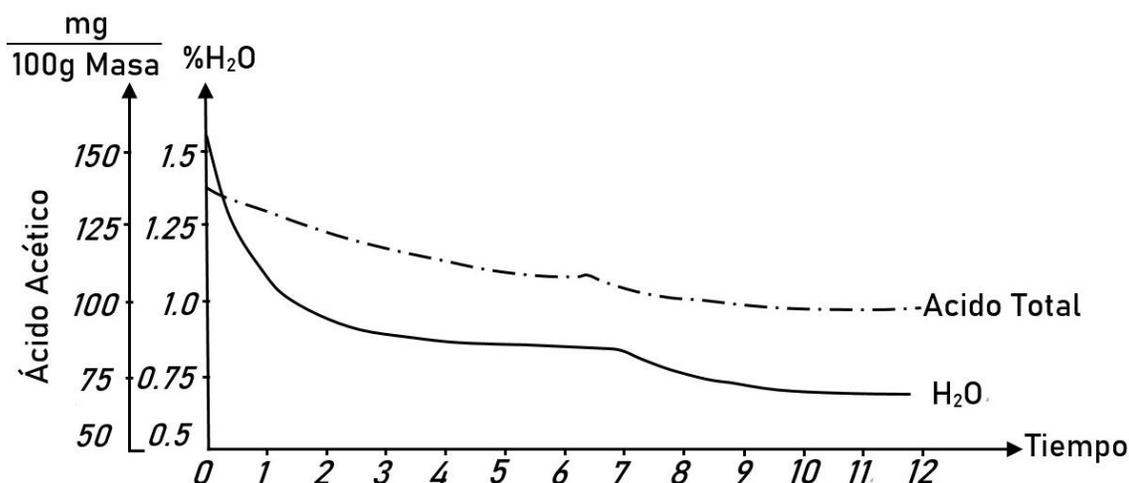


Figura 4.31. Gráfico que muestra los cambios de humedad y acidez durante un ciclo de conchado (tiempo en horas). Se denota que tanto la cantidad de ácido formado como la humedad del chocolate disminuyen considerablemente en las primeras horas del proceso, lo cual asimila a un proceso de separación por destilación con vapor.

Otros investigadores han observado una gran reducción de la cantidad de fenoles durante las primeras horas de conchado. Sin embargo, no se sabe qué efecto tienen estos compuestos en el sabor del chocolate, si es que tienen alguno. El análisis del espacio de cabeza del aire por encima de una concha ha demostrado que la cantidad de volátiles disminuye en un 80% durante las primeras horas de conchado. También es posible que se produzca un exceso de conchado. El chocolate que ha sido procesado durante demasiado tiempo puede tener muy poco sabor. El sabor del chocolate depende del tiempo y la temperatura utilizados, en general, una temperatura más alta significa un tiempo de procesamiento más corto.

Sin embargo, por encima de los 70 °C en el chocolate con leche, comienzan a producirse cambios en el sabor. Algunos fabricantes utilizan temperaturas superiores a los 100 °C para intentar promover algunos sabores tipo Maillard².

² Reacciones de Maillard: Conjunto de reacciones complejas entre aminas (es usual que provengan de proteínas) y compuestos carbonílicos (es normal que sean azúcares). Que forman muchos productos, la mayoría de los cuales tienen algún impacto en el sabor y la apariencia del alimento cocinado

Como hay muy poca agua presente, estos sabores no son tan fuertes como los que se desarrollan durante el secado de la leche a alta temperatura o el proceso de elaboración de las migas. En algunos chocolates con sabor a leche deben evitarse estos sabores de Maillard (Figura 4.32), por lo que las temperaturas de conchado deben mantenerse por debajo de los 50 °C.

Aminoácido	Proceso formación del sabor (impresión sensorial)	
	100° C	180° C
Ácido aspártico	Caramelo	Caramelo
Treonina	Chocolate	Quemado
Serina	Jarabe de arce	-
Ácido glutámico	Caramelo	Azúcar quemada
Prolina	Proteína quemada	Sabor de pan
Glicina	Caramelo	Azúcar quemada
Alanina	Caramelo	Azúcar quemada
Valina	Pan de centeno	Chocolate (penetrante)
Ornitina	Pan de trigo	Sabor del pan
Isoleucina	Mohoso, afrutado, aromático	Azúcar quemada
Leucina	Chocolate	Azúcar quemada
Tirosina	Rosa, perfume, caramelo	Violeta, lila
Lisina	-	Pan
Histidina	-	Pan de maíz con sabor a mantequilla
Arginina	Mantequilla	Azúcar quemada

Figura 4.32. Algunos de los “sabores de Maillard” dados por calentamiento de aminoácidos en presencia de glucosa.

Lo mismo ocurre con algunos chocolates sin azúcar que contienen alcoholes de azúcar. En este caso, las temperaturas más altas derriten los cristales y posteriormente se resolidifican en aglomerados arenosos. Este proceso consiste esencialmente en recubrir las partículas con grasa. Al igual que en la molienda, el cizallamiento es un factor importante. La Figura 4.33 ilustra algunas partículas

en reposo y luego bajo cizallamiento. El cizallamiento en este caso se relaciona una vez más con la diferencia de velocidad de las paredes circundantes dividida por la distancia entre ellas y podemos definir una tasa de cizallamiento como:

$$\text{tasa de cizallamiento} = \frac{v_1 + v_2}{h} \quad (44.1)$$

Donde:

v_1 es la velocidad de la pared 1 medido en m/s.

v_2 es la velocidad de la pared 2 medido en m/s.

h es la distancia que separa dichas paredes medido en metros (m).

Una vez más, las velocidades altas o los espacios estrechos tienen un mayor efecto sobre las partículas que se encuentran entre ellos. Lo que se trata de hacer es poner la grasa sobre la superficie, que es un poco como tratar de mantequilla de pan, donde la grasa entre el cuchillo y el pan se somete a un alto cizallamiento y así es forzada a formar una fina capa sobre la superficie⁴.

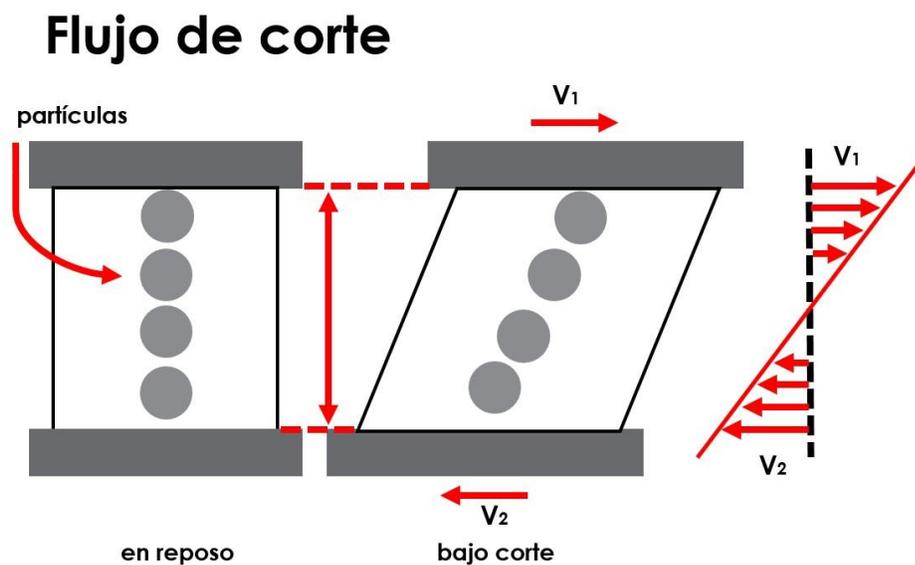


Figura 4.33. Representación del cizallamiento simple entre dos superficies planas paralelas.

En la fabricación de chocolate, esta acción de recubrimiento es especialmente importante porque es deseable que el chocolate fluya lo mejor posible (tenga la menor viscosidad posible) con cualquier contenido de grasa¹⁴.

La figura 4.34 ilustra el mismo chocolate (con idéntico contenido de grasa) procesado a diferentes velocidades de cizallamiento. Como se puede ver, todos alcanzan diferentes lecturas de viscosidad de equilibrio de equilibrio y las mantendrán durante todo el tiempo que se cizallen. Esto significa que, dentro de los índices de cizallamiento normales utilizados, cuanto más alto sea el cizallamiento, más fino será el chocolate. Sin embargo, esto requiere motores muy grandes y mucha energía, y hay un límite práctico para el cizallamiento que se puede desarrollar⁸.

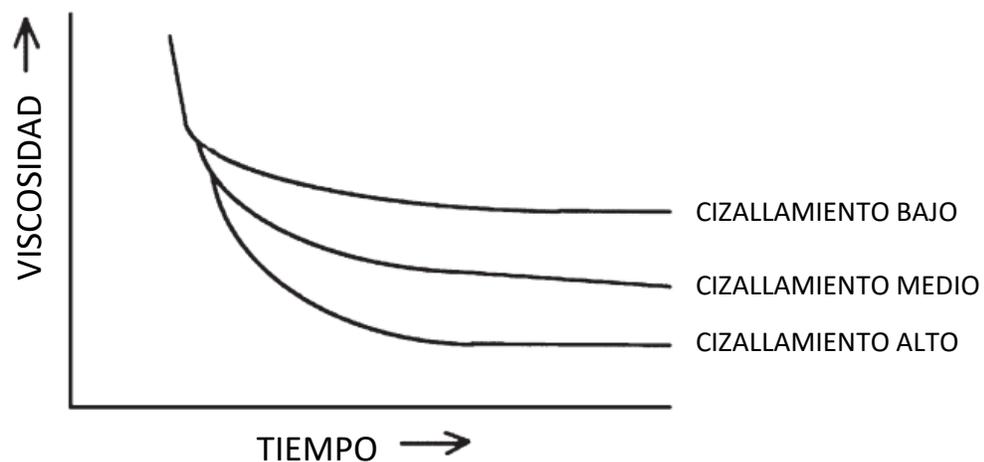


Figura 4.34. Cambio de la viscosidad con el tiempo para conchas con diferentes acciones de cizallamiento.

Hay dos enfoques para reducir la viscosidad del chocolate. Uno es tener un tanque de agitación muy grande, en el que sólo quepa una pequeña cantidad de chocolate en un momento dado. Como hay mucho chocolate en la cuba, es posible que el chocolate esté dentro de la cuba durante varias horas y que siga habiendo un rendimiento del orden de toneladas por hora. El otro enfoque consiste en cizallar en alto grado unos cuantos kilogramos a la vez en un procesador continuo. Debido a la pequeña cantidad dentro de la máquina, puede

permanecer allí sólo una fracción de minuto para dar el mismo rendimiento que una concha grande. Otra cosa que hace este proceso es romper los grupos de partículas que están sueltas. Estos aglomerados pueden adoptar dos formas. En una de ellas (Figura 4.35a) no hay grasa en su interior, por lo que la rotura sólo da lugar a nuevas superficies que tienen que ser recubiertas con grasa, por lo que aumenta la viscosidad. En la otra (Figura 4.35b) hay grasa en el centro que está rodeada por las partículas sólidas y, por tanto, no ayuda a la fluidez del chocolate. Sin embargo, una vez que se rompe, se libera más grasa de la necesaria para recubrir las nuevas superficies, por lo que se reduce la viscosidad global.

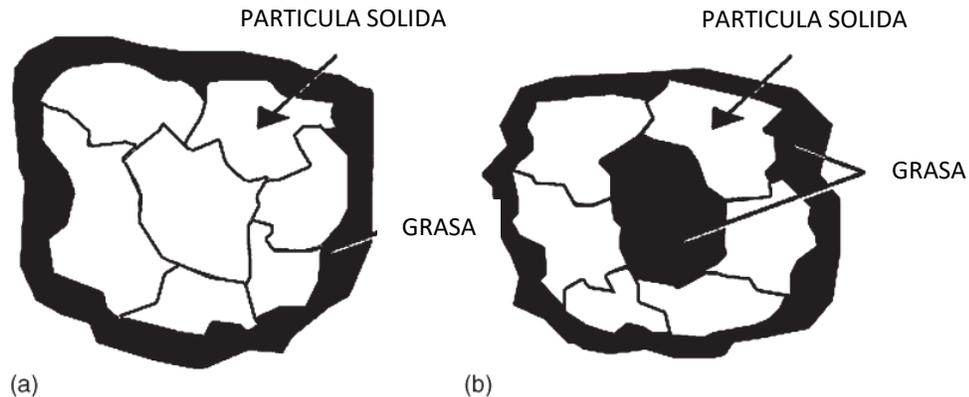


Figura 4.35. (a) Aglomerado compuesto por partículas sólidas. (b) Aglomerado que contiene grasa.

Para obtener un chocolate bien elaborado, normalmente es conveniente hacerlo pasar por tres etapas:

1. Conchado en seco
2. Fase pastosa
3. Conchado líquido

En la fase seca, el chocolate sigue siendo polvoriento y, sobre todo en el caso del chocolate con leche, contiene un exceso de humedad. Esto es perjudicial para las propiedades de fluidez del chocolate. Además, cuando se elimina,

puede llevarse consigo parte de los sabores ácidos no deseados. Cuando muchas de las superficies aún no están recubiertas de grasa, es mucho más fácil que la humedad salga. Esto significa que si el chocolate se calienta y se mezcla en estado pulverizado, todo el proceso puede llevarse a cabo más rápidamente y se produce un chocolate más fino y con menos humedad.

A medida que aumenta la temperatura, se funde más manteca de cacao y las partículas comienzan a pegarse. A veces se forman bolas de varios centímetros de diámetro, que recorren la concha antes de unirse para formar una pasta espesa. Dentro de la pasta todavía hay muchas partículas de leche y/o azúcar que aún no están recubiertas de grasa. Cuando la pasta es espesa, hay una probabilidad relativamente alta de que la acción de cizallamiento las recubra con cualquier grasa que esté cerca. Sin embargo, una vez que la pasta se vuelve fina, estas partículas no recubiertas simplemente fluyen. Para hacer un chocolate que fluya bien en la boca (cuando la grasa se derrite por el calor del cuerpo), es necesario recubrir el mayor número posible de estas superficies. Esto significa que la pasta debe mantenerse tan espesa como sea posible para que el motor de la concha se mezcle, durante el mayor tiempo posible.

La función final del conchado es garantizar que el chocolate tenga las propiedades de fluidez correctas para las siguientes etapas de procesamiento. Esto, a su vez, dependerá del tipo de maquinaria de recubrimiento o moldeado que se utilice. Por lo tanto, la última etapa es aquella en la que se realizan las últimas adiciones de grasa y emulsionante al chocolate. Esto lo hace muy fino y apenas se produce una mezcla más. A continuación, el chocolate puede ser bombeado a tanques de almacenamiento listos para su uso. A veces se transporta como líquido en un camión cisterna a otra fábrica. También se puede solidificar el chocolate y almacenarlo o transportarlo en forma de bloques o pequeñas virutas.

Siendo de esta manera, que existen múltiples tipos de maquinaria para conchado que cumplen con ciertas funciones específicas. La Figura 4.36 es una ilustración de una **concha Frisse**. La concha Frisse es un ejemplo típico de concha aérea utilizada en la industria moderna del chocolate. Consiste en un gran tanque con tres potentes palas mezcladoras entrelazadas que proporcionan una acción de cizallamiento y mezcla. La mecánica interna de la concha Frisse es la que se muestra en la Figura 4.36. Los tiempos y las temperaturas de conchado varían normalmente: para las migas de leche, de 10 a 16 horas a 49-52 °C, con los productos de leche en polvo, de 16 a 24 horas hasta 60 °C, y con los chocolates oscuros, a 70 °C y hasta 82 °C. Sustituyendo la leche entera en polvo por leche desnatada en polvo y grasa de mantequilla, pueden utilizarse temperaturas de hasta 70 °C. Para dar al chocolate una viscosidad adecuada, se puede añadir más manteca de cacao y lecitina hacia el final del conchado para diluir o licuar el chocolate antes de templearlo.

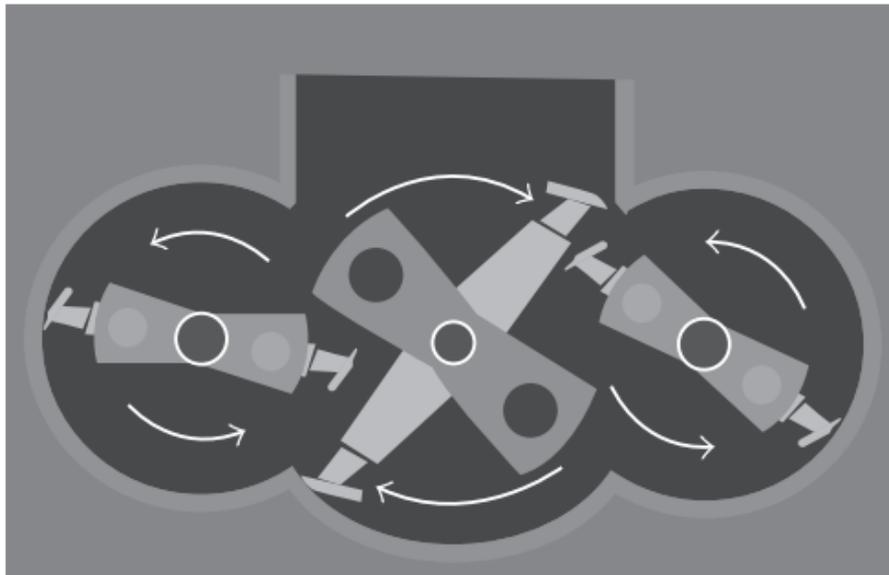


Figura 4.36. Ilustración de la mecánica interna de la concha Frisse.

La concha larga. Este tipo de máquina fue desarrollada por Rudi Lindt y consistía en una cubeta de granito que contenía un rodillo de granito (Figura 4.37). El rodillo empujaba el chocolate hacia atrás y hacia delante durante un largo periodo de tiempo, que a menudo era de varios días. Al cambiar la superficie, los componentes volátiles del sabor podían escapar al aire. A menudo

se cargaban desde grandes tanques con ruedas utilizando una pala. Se trataba de un trabajo muy duro y caluroso y, a principios del siglo XX, la esperanza de vida de las personas que trabajaban en esa parte de la fábrica era relativamente corta. Por lo general, cuatro cubas estaban unidas y funcionaban juntas desde un único motor, o desde una polea que era accionada por correas de cuero desde un eje central que recorría la longitud de las salas de conchado. Gran parte de la primera maquinaria era accionada por correas y algunas fábricas tenían talleres de guarnicionería para el mantenimiento del cuero.

La densidad del polvo que se introduce en la concha es inferior a la mitad de la del chocolate acabado, por lo que las cubetas parecen relativamente vacías al final del proceso, aunque al principio estén casi desbordadas. Estas conchas tienen un mal control de la temperatura y un alto consumo de energía, además de una capacidad relativamente pequeña, por lo que han sido sustituidas casi en su totalidad por diseños más modernos.



Figura 4.37. Una concha larga siendo llenada.

Conchas rotatorias. Este tipo de conchas se llama así porque la mezcla gira dentro del cuerpo del tanque, que forma el exterior de la caracola. Muchos de los primeros diseños (Figura 4.38) eran redondos, con un eje central vertical que accionaba los brazos mezcladores o rascadores. Otros tenían elementos de mezcla adicionales que realizaban un movimiento planetario alrededor de los brazos accionados centralmente. La mayoría tenían la parte superior abierta para permitir la salida de la humedad y de los volátiles aromáticos. Al igual que la concha larga, solían tener un control deficiente de la temperatura y su tamaño solía limitarse a una tonelada de capacidad, aunque se fabricaban máquinas de 3 y 5 toneladas. Por ello, han sido sustituidas en gran medida por conchas con elementos de agitación horizontales.



Figura 4.38. Conchado rotatorio.

En la Figura 4.39 se ilustra una típica concha moderna. En este caso, el tanque tiene tres cubetas de conexión y tres brazos agitadores. Al girar, untan el chocolate contra el lado de una pared con temperatura controlada - la acción de "untar el pan". A continuación, la máquina lo lanza al aire, lo que permite que los volátiles y la humedad salgan más fácilmente. Las formas anteriores de conchas normalmente no podían hacer esto, ya que tendían a compactar el chocolate en

el fondo de la concha. Los extremos de los brazos de la concha tienen forma de cuña. Esto significa que cuando el chocolate es una pasta espesa, el brazo puede operar con la punta primero. La punta podrá cortar la pasta y el lado de la cuña podrá untar el chocolate contra la pared. En cambio, cuando el chocolate se vuelve fino, sólo fluye alrededor de la cuña y no se produce mucha mezcla o recubrimiento de las partículas. Sin embargo, al invertir la dirección de los brazos en esta fase, el extremo plano de la cuña provoca mucho más movimiento y mezcla.



Figura 4.39. Imagen de una caracola fabricada por Frisse, Alemania.

Muchas de estas conchas tienen rejillas en la parte superior, que pueden equiparse con ventiladores para facilitar la eliminación de volátiles, si es necesario. Esto las hace más seguras e higiénicas. Las conchas suelen procesar entre 5 y 10 toneladas de chocolate en un periodo de tiempo inferior a 12 horas. Las conchas se llenan automáticamente desde las cintas transportadoras que se alimentan desde la fase de molienda. También se vacían automáticamente a través de tubos en la base.

Máquinas continuas de bajo volumen. Este tipo de máquina suele utilizarse para producir un chocolate de menor viscosidad una vez que se han producido los cambios de sabor (aunque se han utilizado extrusoras de doble tornillo para llevar a cabo ambos procesos). En la figura 4.40 se ilustra una máquina licuadora típica. Contiene un eje central con pasadores unidos a él a intervalos y que gira a gran velocidad. Las paredes tienen clavijas fijadas que no se mueven (estatores). Los espacios entre las clavijas son pequeños y la velocidad a través de este espacio es muy alta, es decir, hay una tasa de cizallamiento muy alta. A medida que se bombea el chocolate a lo largo de la tubería, se somete a esta acción violenta, que hace que la grasa recubra gran parte de las superficies sólidas.

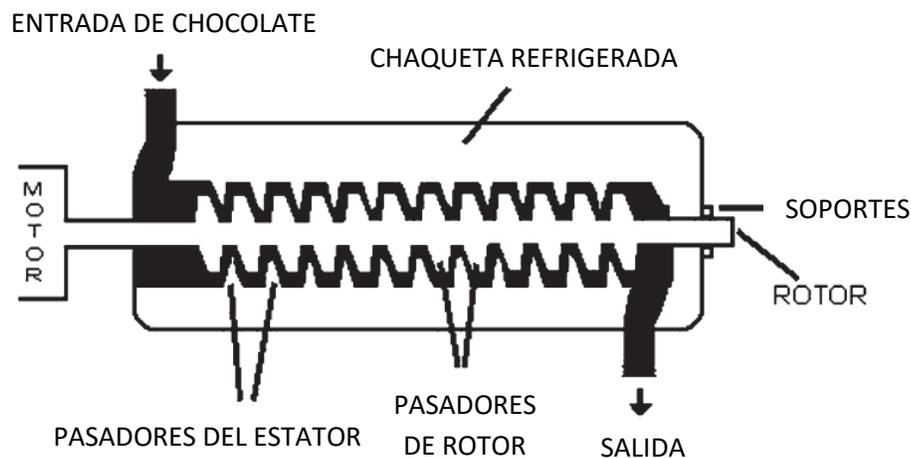


Figura 4.40. Diagrama de un licuador de chocolate en línea.

Sin embargo, el aporte de energía es muy elevado, lo que hace que el chocolate se caliente. Esto alteraría el sabor del chocolate si no fuera por las paredes de la tubería, que se enfrían con agua fría. Este tipo de máquina puede utilizarse después del conchado o en paralelo con ella, es decir, haciendo que una parte del chocolate sea bombeada, licuada y devuelta al conche. En ambos casos, el objetivo es producir un chocolate más fino en menos tiempo.

4.14 Templado²

El templado o atemperado es el proceso de enfriamiento controlado del chocolate para permitir una perfecta cristalización de la manteca de cacao. Es otro proceso esencial para que el chocolate tenga el aspecto (brillante) y textura (fina, fundente) adecuados.

Este es el proceso que pre-cristaliza una pequeña cantidad de grasa en el chocolate, para que los cristales formen núcleos, que ayudan a que la grasa se fije rápidamente en la forma correcta. La cantidad real de grasa que es necesario cristalizar es incierta, pero probablemente esté entre el 1% y el 3%. El chocolate líquido sale de la concha a una temperatura normalmente superior a los 40 °C. Si se va a procesar en la misma fábrica, se mantiene en un tanque de almacenamiento hasta que se necesite. Estos depósitos pueden contener 20 toneladas o incluso más y deben poder agitarse, calentarse y mantenerse en un entorno de baja humedad.

Si el chocolate no se remueve durante un periodo largo, parte de la grasa se separa en la parte superior, dejando un chocolate más espeso en el fondo del tanque. La temperatura se mantiene a unos 45 °C. Si se mantiene durante más tiempo a temperaturas más elevadas, cambiaría su sabor, mientras que las proteínas del chocolate con leche tenderían a agregarse, haciéndolo más espeso. Una temperatura mucho más baja pondría en marcha el proceso de cristalización y se correría el riesgo de que el contenido de la cisterna se volviera sólido. Al describir el transporte de los granos de cacao, se observó que si la humedad relativa estaba por encima de la humedad relativa de equilibrio (HRE) de los granos, éstos tomarían humedad. Esto es igualmente cierto para el chocolate líquido. En este caso, la HRE se sitúa entre el 35% y el 40%, por lo que si la humedad relativa alrededor del tanque de almacenamiento es superior a esta cifra, el chocolate absorberá agua. Sólo se necesita una cantidad muy pequeña de agua para que las partículas de azúcar empiecen a pegarse y aumenten la viscosidad, lo que dificulta su elaboración.

La atemperadora debe, en primer lugar, enfriar el chocolate para que puedan empezar a formarse cristales. El chocolate es muy mal conductor del calor, por lo que para que se enfríe rápidamente debe mezclarse bien para que todo él entre en contacto con la superficie metálica fría de la atemperadora. Estas máquinas son un tipo de intercambiador de calor que calienta y enfría el chocolate a su paso. En la Figura 4.41 se ilustra un atemperador de chocolate típico.

La columna central es un eje giratorio al que se le han acoplado una serie de discos o rascadores. Las paredes están provistas de barras o discos, para que el chocolate tenga que fluir alternativamente hacia la pared y hacia el centro y no pueda pasar directamente por la máquina. Cuanto más rápido gire el eje, mayor será la velocidad de cizallamiento y más rápida será la cristalización. En muchos atemperadores esto se sitúa entre 3000 y 8000 s⁻¹. El límite lo marcan el tamaño del motor y el calor desarrollado por la mezcla, que empezaría a fundir los cristales. La superficie exterior debe estar cuidadosamente atemperada y esto se utiliza para determinar el grado de temple desarrollado. La temperatura se controla normalmente dentro de unos grupos de placas llamados zonas. Muchas máquinas tienen tres o cuatro zonas, aunque son posibles muchas más.

La primera zona enfría el chocolate hasta una temperatura en la que pueden empezar a formarse cristales. En la segunda se baja mucho la temperatura para que también se formen cristales de la Forma IV y la Forma V, y durante la cual el chocolate está muy cizallado y en la última etapa se eleva la temperatura a unos 30 °C, lo que funde muchos de los cristales inestables. La viscosidad del chocolate, como la de la mayoría de las sustancias, disminuye a medida que aumenta la temperatura. Cuanto más fino sea el chocolate, más fácilmente fluirá en un molde o alrededor de un dulce. Por lo tanto, es mejor procesar el chocolate a una temperatura lo más alta posible, sin fundir los cristales de las semillas. Cuando están recién formados, los cristales son pequeños y se funden

fácilmente. Si el chocolate se remueve y se calienta lentamente, estos cristales se vuelven más estables y tienen un punto de fusión más alto. Por esta razón, algunas máquinas de templado tienen una etapa adicional, en la que el chocolate se cizalla más lentamente y se deja que los cristales "maduren".

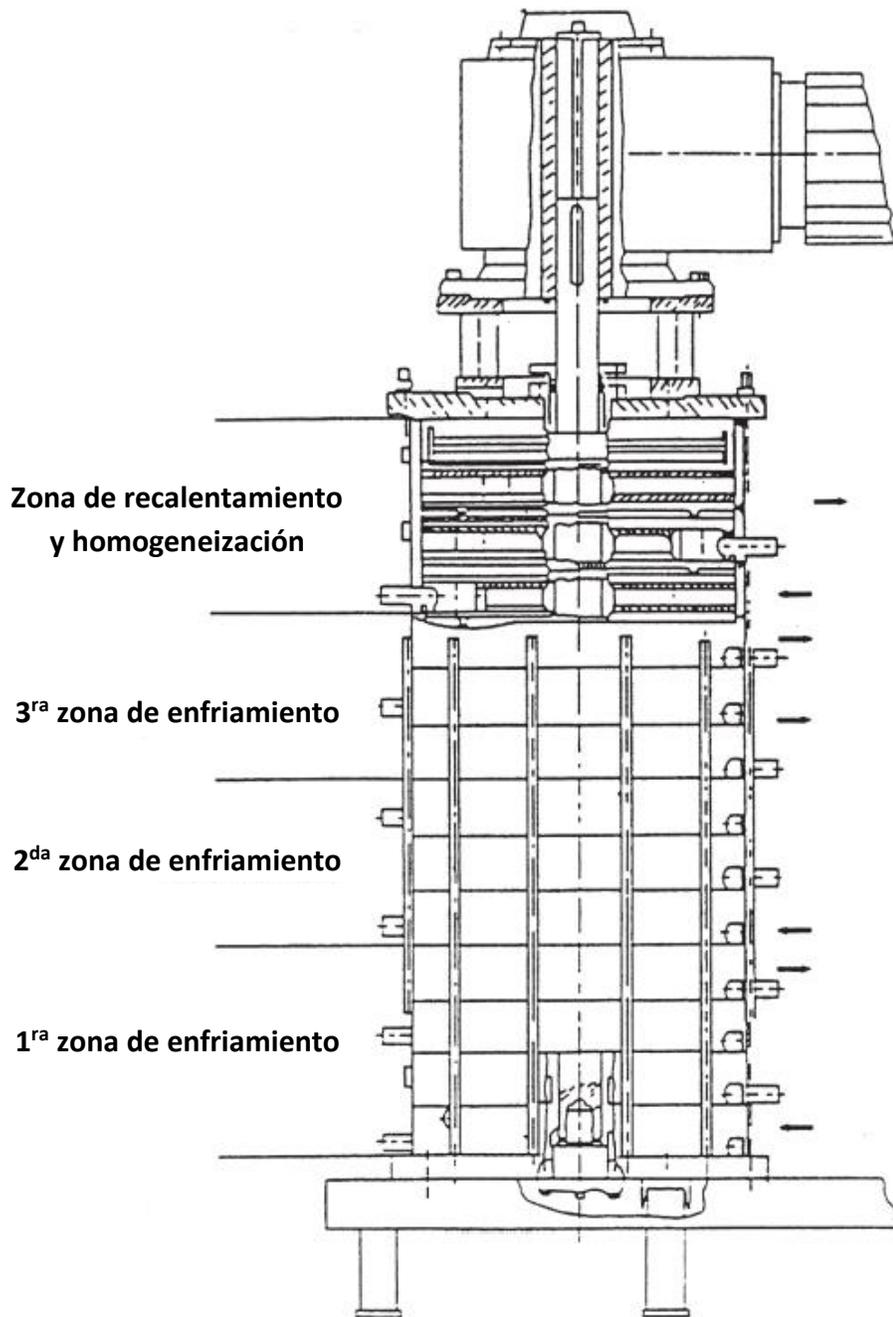


Figura 4.41. Esquema de la templadora Sollich Solltemper MST-V de templado Sollich Solltemper MST-V.

Para la producción de chocolate a pequeña escala, una máquina de templado puede ser demasiado grande y se utiliza el templado manual. Éste se realiza en una mesa de mármol, que se calienta a diferentes temperaturas en zonas específicas. El chocolate se vierte en una de las zonas más frías, donde se mezcla a fondo utilizando un rascador (Figura 4.42 a y b). Esta mezcla y enfriamiento minuciosos inician la cristalización y el chocolate se traslada a una zona más caliente de la mesa para fundir las formas más inestables. Se trata de un arte, y los expertos pueden determinar si el chocolate está atemperado aplicando una pequeña cantidad de chocolate en el labio. Si está templado, pueden detectar una sensación de enfriamiento definida.

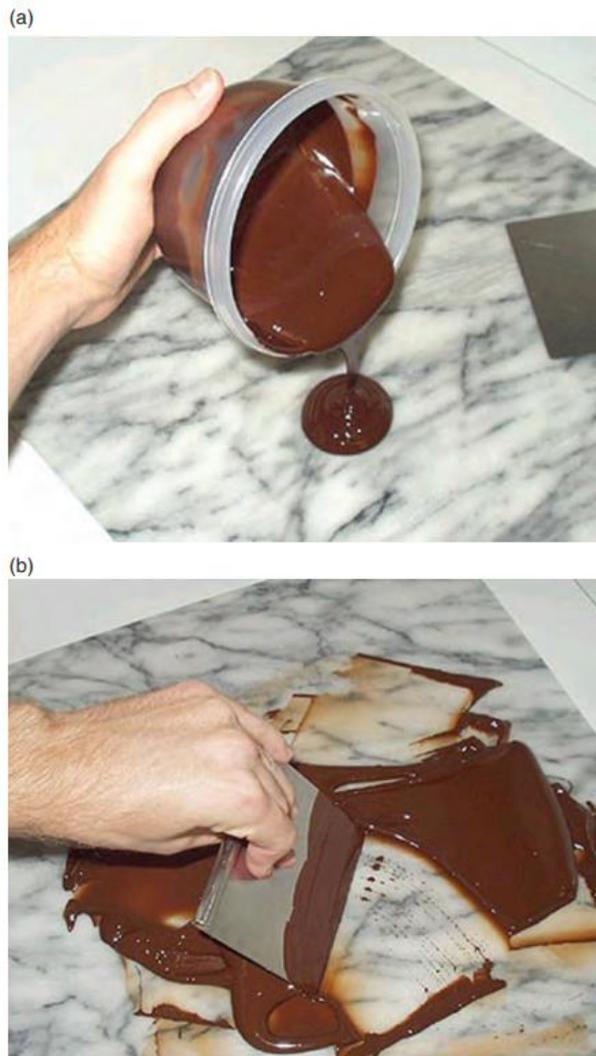


Figura 4.42. Atemperar a mano; (a) verter el chocolate; (b) raspar el chocolate.

La manteca de cacao puede cristalizar en varias formas polimórficas en función de la composición de triglicéridos, y la composición de ácidos grasos influye en la solidificación de la grasa líquida. La manteca de cacao tiene seis formas polimórficas (I-VI), siendo las principales α , β y β' (Tabla 4.1). La forma V, un polimorfo β , es la más deseable (en general) en el chocolate bien templado, ya que proporciona un aspecto brillante, un buen chasquido, contracción y resistencia a la floración. Si el chocolate está mal templado, el resultado es la forma β IV, que se transforma rápidamente en la forma V³.

Tabla 4.1. Punto de fusión y empaquetamiento en cadena de las formas polimórficas de la manteca de cacao.

Formas polimórficas de la manteca de		Punto de fusión (°C)	Empaquetamiento de cadena
Forma I	β'_2	16 - 18	Doble
Forma II	α	21 - 22	Doble
Forma III	Mezclado	25.5	Doble
Forma IV	β_1	27 - 29	Doble
Forma V	β_2	32 - 34	Triple
Forma VI	β'_1	34 - 36	Triple

Esto influye en el color, ya que la luz reflejada se desorienta por el crecimiento inestable y desorganizado de los cristales. El chocolate no templado es blando y no se desmolda eficazmente. En la manteca de cacao, las formas V y VI son las más estables. La forma VI es difícil de generar, aunque se forma en el almacenamiento prolongado del chocolate atemperado acompañado de una floración de grasa. Además, la Forma VI tiene una temperatura de fusión elevada (36 °C) y cristales grandes y arenosos en la lengua. La inestable Forma I tiene un punto de fusión de 17 °C y se convierte rápidamente en la Forma II que se transforma más lentamente en III y IV (Figura 4.43). Las formas polimórficas de los triglicéridos difieren en la distancia entre las cadenas de ácidos grasos, el ángulo de inclinación con respecto al plano del grupo metilo del extremo de la cadena y la manera en que los triglicéridos se empaquetan en la cristalización.

La forma polimórfica³ está determinada por las condiciones de procesamiento. Los ácidos grasos cristalizan en una forma de doble o triple cadena dependiendo de la composición de los triglicéridos y de la distribución posicional. La forma IV cristaliza en forma de doble cadena, la forma V en un sistema de triple cadena que permite un empaquetamiento más estrecho y una mayor estabilidad termodinámica. Las formas polimórficas inferiores inestables (II y III) se transforman en formas de mayor fusión y más estables, con un empaquetamiento más estrecho y menor volumen³.

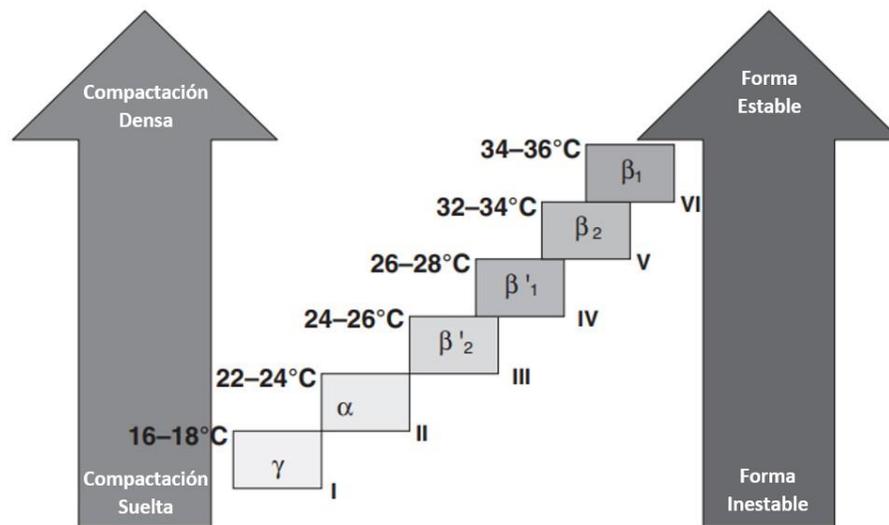


Figura 4.43. Regímenes de temperatura y grado de estabilidad en seis formas polimórficas de la manteca de cacao.

Estos cambios pueden observarse en términos de contracción general del chocolate, de aparición o de formación de burbujas de grasa no deseadas, a ritmos que dependen de las estabilidades relativas de las formas polimórficas y de la temperatura. Para que el chocolate tenga una forma polimórfica adecuada, el atemperado es crucial, ya que influye en las características finales de calidad, como el color, la dureza, la manipulación, el acabado y las características de conservación.

³ En ciencia de los materiales y mineralogía, el polimorfismo es la capacidad de un material sólido de existir en más de una forma o estructura cristalina. El polimorfismo se encuentra posiblemente en cualquier material cristalino incluyendo polímeros, minerales y metales, y se relaciona con la alotropía, referida a elementos químicos.

El templado implica la pre-cristalización de una pequeña proporción de triglicéridos, con cristales que forman núcleos (1-3% en total) para que el resto del lípido se fije en la forma correcta. El templado consta de cuatro pasos clave: fusión hasta el final (a 50 °C), enfriamiento hasta el punto de cristalización (a 32 °C), cristalización (a 27 °C) y conversión de cualquier cristal inestable (a 29-31 °C) (Figura 4.44). La secuencia de templado depende de la receta, el equipo y el objetivo final. Antes de que se utilizaran las máquinas de atemperado, el chocolate se atemperaba a mano, y este método sigue siendo utilizado ocasionalmente por los chocolateros, que producen cantidades relativamente pequeñas de dulces hechos a mano. Las máquinas de atemperado actuales consisten en intercambiadores de calor de varias etapas por los que el chocolate pasa a velocidades muy diferentes, lo que dificulta la identificación de las condiciones óptimas³.

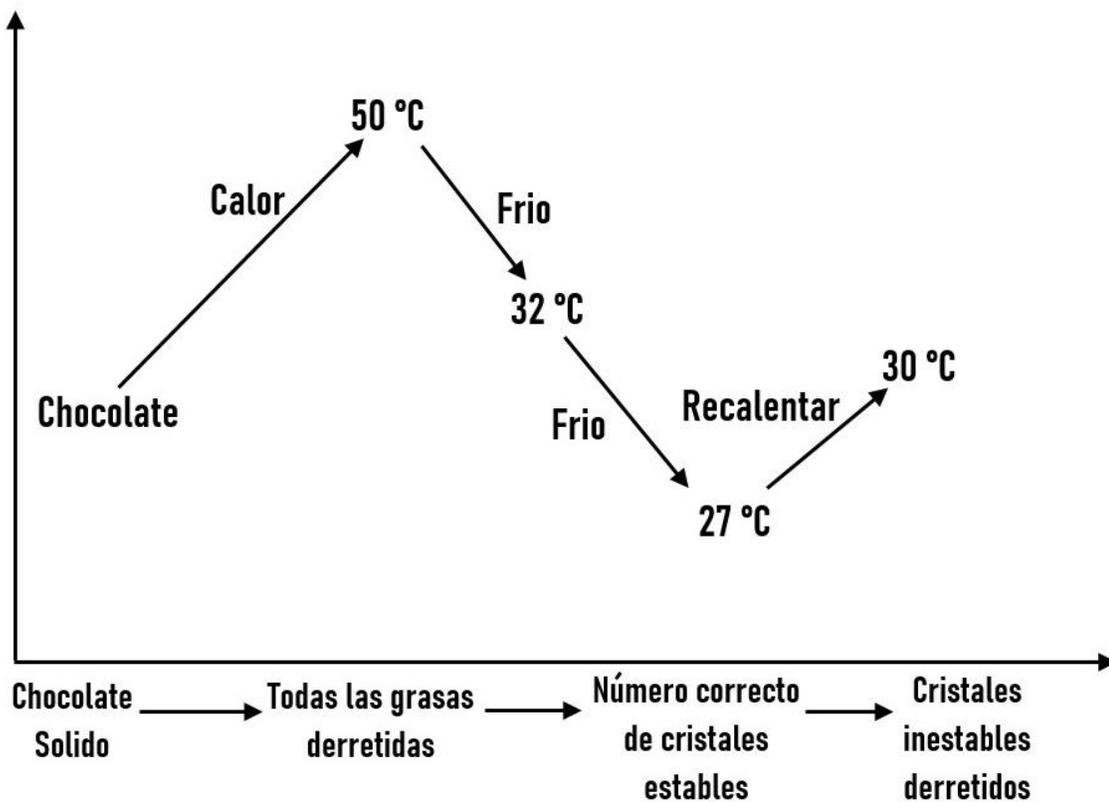


Figura 4.44. Secuencia de templado durante la cristalización de los lípidos en los chocolates.

Las combinaciones de tiempo y temperatura son de suma importancia en el diseño del proceso, y en el atemperado continuo, el chocolate fundido suele mantenerse a 45 °C y luego se enfría suavemente para iniciar el crecimiento de los cristales. Trabajando con el "Masterseeder" de Buhler, Windhab (ETH Zúrich, Suiza) y Mehrle (Buhler AG, Uzwil, Suiza) descubrieron que el atemperado de semillas a alto cizallamiento puede ser beneficioso, ya que la cinética de nucleación de los cristales de grasa y las transformaciones polimórficas ($\alpha \rightarrow \beta_2 \rightarrow \beta_1$) se ven fuertemente aceleradas por las fuerzas de cizallamiento que actúan en los campos de flujo de alto cizallamiento: la calidad general de los productos era mejor, ya que se reducía la flor de grasa. Durante el templado, las temperaturas se controlan con precisión y la agitación proporcionada mejora las tasas de nucleación. Al aumentar la viscosidad, el chocolate se recalienta de nuevo en la tercera etapa para evitar la solidificación en pista. En la cuarta etapa, se produce la maduración de los cristales³.

El chocolate también puede atemperarse mediante el uso de alta presión con chocolate fundido comprimido a 150 bar. Esto aumenta el punto de fusión del chocolate y hace que se solidifique en cristales sólidos de todas las formas polimórficas. Cuando se libera la presión, las formas polimórficas inferiores se funden dejando el chocolate templado. Los lotes posteriores pueden ser sembrados con cristales de grasa estables. Un chocolate bien atemperado tendrá las siguientes propiedades: buena forma, color, brillo, contracción del molde, mejor control del peso, producto estable - más duro y resistente al calor (menos marcas de dedos durante el envasado) y mayor duración. El régimen de templado del chocolate con leche difiere ligeramente del chocolate negro debido a la influencia de las moléculas de grasa de la leche en la formación de la red cristalina. El chocolate con leche contiene una proporción de grasa de mantequilla que provoca un efecto eutéctico, lo que impide la formación de la flor, da lugar a un punto de fusión más bajo, suaviza la textura y reduce la

temperatura para obtener la semilla de cristal para el proceso de templado (alrededor de 29,4 °C en comparación con 34,5 °C para el chocolate negro).

Los equivalentes de manteca de cacao (CBE) y los sustitutos (CBR) también pueden encontrar aplicación en la industria del chocolate. Mientras que los equivalentes de manteca de cacao son compatibles con la manteca de cacao, los CBR, que no requieren templado, sólo pueden utilizarse si se sustituye casi toda la manteca de cacao. Estos CBR se funden en el mismo rango de temperaturas que la manteca de cacao, pero sólo cristalizan en la forma β' . Más recientemente, se ha estudiado el efecto del cizallamiento en el templado del chocolate o de la manteca de cacao en diferentes geometrías de flujo, por ejemplo, intercambiador de calor de superficie rascada con manteca de cacao y chocolate, geometría cilíndrica con chocolate con leche y manteca de cacao, sistema de cono y placa con manteca de cacao, viscosímetro de placas paralelas con chocolate con leche y un dispositivo de cinta helicoidal con manteca de cacao.

Cuando el chocolate sale de la atemperadora, es importante que el fabricante de chocolate se asegure de que hay suficientes cristales del tipo correcto para que el chocolate cuaje correctamente. En el laboratorio es posible utilizar los rayos X para determinar exactamente los tipos de cristales presentes. Esto no sólo es muy caro y lento, sino que a menudo se elimina primero el azúcar, ya que sus picos de rayos X dominarían el espectro. Esto puede significar que la muestra haya cambiado en el momento de realizar la medición, lo que lo hace totalmente inviable para un proceso industrial. El calorímetro diferencial de barrido puede utilizarse para proporcionar mucha información sobre los cristales presentes en el chocolate, pero requiere una preparación muy cuidadosa de la muestra. Este tipo de máquina puede utilizarse para trabajos de investigación, pero es demasiado cara y complicada para el control de calidad rutinario.

Se ha observado que las grasas a veces producen un efecto de enfriamiento en la boca porque la energía necesaria para fundirlas -el calor latente- es mucho mayor que la energía necesaria para cambiar su temperatura en 1 °C -el calor específico-. Al solidificar el chocolate, esto también es cierto, salvo que el calor latente se desprende cuando la grasa pasa de líquida a sólida, y no se absorbe, como ocurre en la boca. El fabricante puede utilizar este efecto para determinar si el chocolate es correcto, midiendo una curva de enfriamiento.



Figura 4.45. Medidor de Temperatura

Esto puede hacerse de forma muy sencilla y barata mediante el tipo de dispositivo que se muestra en la figura 4.45. En la figura 4.46 se muestran las curvas de enfriamiento típicas producidas por este instrumento. El instrumento está formado por un tubo metálico con una copa en la parte superior para contener la muestra de chocolate. Una sonda termométrica se introduce a través de un tapón que se ajusta a la taza. La temperatura registrada por esta sonda

puede registrarse en un registrador gráfico, como se muestra, o en una base de datos informática. La sonda encaja a través de un soporte en el termo, que mantiene la sonda en posición, con la taza por encima del nivel de agua en el termo. Se coloca una mezcla de hielo y agua en el matraz y luego se coloca el tubo. Se vierte una parte del chocolate atemperado en la taza y se coloca el termómetro y el tapón encima. A continuación, se realiza un gráfico de la temperatura frente al tiempo.

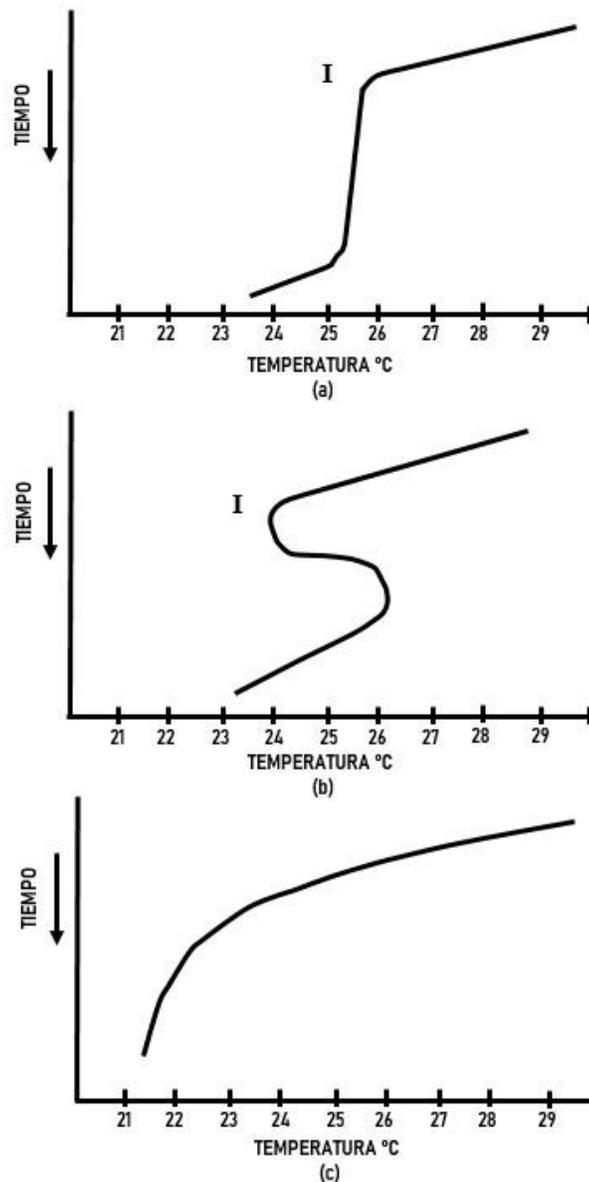


Figura 4.46. Curvas del medidor de temperatura para: (a) chocolate correctamente templado; (b) chocolate insuficientemente templado; (c) chocolate excesivamente templado.

Al principio, la temperatura desciende de manera uniforme, pero lentamente. Si el chocolate se atempera correctamente, hay suficiente semilla distribuida por todo el chocolate para que cuaje muy rápidamente. Al hacerlo, se desprende el calor latente, que compensa el enfriamiento del hielo, por lo que la temperatura se mantiene constante durante un tiempo considerable, como se muestra en la Figura 4.46a. Si no hay suficientes cristales de semillas, el chocolate tarda más en cuajar. Sin embargo, hay más grasa para cuajar y, por tanto, más calor latente para salir. Esto significa que hay un descenso inicial más largo de la temperatura, pero luego se libera tanto calor latente que la temperatura del chocolate vuelve a subir. Finalmente, vuelve a bajar una vez que ha salido el calor latente. Esto se muestra en la Figura 4.46b. Si casi no hay cristales de semillas, o incluso hay demasiados (de modo que ya se ha eliminado gran parte del calor latente), se obtiene una curva como la de la Figura 4.46c, lo que significa que el chocolate no va a cuajar correctamente. Aquí se está eliminando principalmente el calor específico. El calor latente sale lentamente y, en el caso del chocolate no cristalizado, será menor porque se formarán los cristales más inestables con su estado energético más bajo.

La temperatura a la que se produce la inflexión de la curva, el punto I de las curvas de las figuras 4.46 a y b, es también muy importante. Cuanta más alta sea la temperatura, más madura será la cristalización y más alta será la temperatura a la que se puede utilizar el chocolate para moldear o recubrir. Existen en el mercado varios instrumentos informáticos que calculan la velocidad de enfriamiento y la utilizan para determinar factores como el llamado número de atemperado, mientras que otros trabajan en línea y pueden utilizarse para automatizar el proceso de atemperado. Todos funcionan según el principio descrito anteriormente.

4.15 Moldeo y embalaje

Por último, se le da al chocolate la forma deseada vertiéndolo en moldes (tabletas, bombones, chocolatinas) que después se hacen pasar por un túnel de enfriado. A la salida los chocolates están listos para ser envasados y distribuidos, siempre a una temperatura controlada (entre 15 y 17 °C) para garantizar que lleguen en perfecto estado.

El moldeo es el método más sencillo para formar el chocolate y es el que se utiliza para hacer las tabletas simples. Durante muchos años se utilizaron moldes metálicos, pero éstos eran pesados, ruidosos y bastante caros. Esto último es muy importante cuando una línea de moldeo puede contener hasta 1500 moldes, que deben cambiarse todos cuando el departamento de marketing modifica el peso o la forma de un producto. Actualmente, la mayoría de los moldes son de plástico, que es más ligero y hace menos ruido. Además, tiene la ventaja de que se puede retorcer, lo que ayuda a retirar las barras sólidas cuando se pegan. Si el chocolate atemperado entra en contacto con una superficie caliente, los cristales que contiene se derretirán, por lo que no habrá suficiente semilla para que cuaje correctamente. Por otro lado, el contacto con una superficie fría puede hacer que parte de la grasa cuaje de forma incorrecta. Esto actuará como un tipo de semilla incorrecto durante el enfriamiento posterior. Por lo tanto, es importante que los moldes vacíos se precalienten a unos pocos grados de la temperatura del chocolate atemperado antes de iniciar el proceso de moldeo.

El chocolate se introduce en el molde a través de un cabezal depositario. Éste contiene el mismo número de boquillas que el número de hendiduras de los moldes inferiores. Una línea de tabletas de 1 m de ancho puede tener entre 10 y 20 boquillas. Los moldes se transportan por debajo del depositante (en la Figura 4.47 se muestra un diseño típico). Las cadenas, u otro mecanismo de transporte, a veces levantan los moldes hasta que están justo debajo de las boquillas. Una barra de chocolate líquido cae entonces a lo largo de las hendiduras a medida que los moldes avanzan y el chocolate sigue saliendo por

las boquillas. Estos depositantes están diseñados para que un peso exacto entre en cada sector del molde. Una vez depositado este peso, el molde desciende rápidamente a su nivel anterior. De este modo, se rompen los hilos de chocolate que aún puedan estar adheridos a la boquilla.



Figura 4.47. Esquema del mecanismo tipo pistón para dispensar una cantidad medida de chocolate en un molde específico en el proceso de moldeado del chocolate.

A continuación, hay que repartir el chocolate de manera uniforme por todo el molde y eliminar las burbujas de aire para evitar manchas como las que se muestran en la Figura 4.48. Esto se consigue haciendo vibrar energicamente el molde. El chocolate es un líquido no newtoniano, ya que tiene un valor de rendimiento. Esto significa que hay que aplicar energía para que empiece a moverse. Este valor de fluencia también tiende a impedir que las burbujas suban por el chocolate. Sin embargo, si el agitador tiene la frecuencia y la amplitud correctas, puede convertir un líquido no newtoniano en uno newtoniano, es decir, puede generar que la viscosidad del chocolate sea constante a una fuerza cortante dada y, por lo tanto, hacer que las burbujas salgan más fácilmente.



Figura 4.48. Agujeros en el chocolate provocados por burbujas de aire.

Cuando el chocolate líquido está en reposo, las partículas están prácticamente en contacto entre sí, por lo que es difícil que se muevan (Figura 4.49a). La vibración proporciona la energía necesaria para separarlas, disminuyendo así su resistencia al movimiento y el valor de rendimiento. Cuando una burbuja se eleva lo hace muy lentamente, por lo que necesitamos saber cuál es la viscosidad que aparece a una velocidad de cizallamiento/flujo baja. La Figura 4.49b muestra un gráfico de la viscosidad aparente a un caudal bajo frente a la frecuencia de la vibración para tres amplitudes diferentes. Esto muestra que debemos vibrar este chocolate en particular a más de 10 ciclos s^{-1} y con una amplitud de al menos 0,2 mm. Si utilizamos la vibración, el chocolate tiene una séptima parte de su viscosidad cuando se vibra a 30 ciclos s^{-1} que cuando no se vibra. Las tasas de vibración bajas hacen muy poco, por lo que el fabricante está desperdiciando dinero en la instalación del vibrador y también en la energía implicada. Unas tasas muy superiores no mejoran la eficacia. Este adelgazamiento del chocolate por la vibración sólo se produce en el vibrador y se detiene en cuanto el molde sale de él.

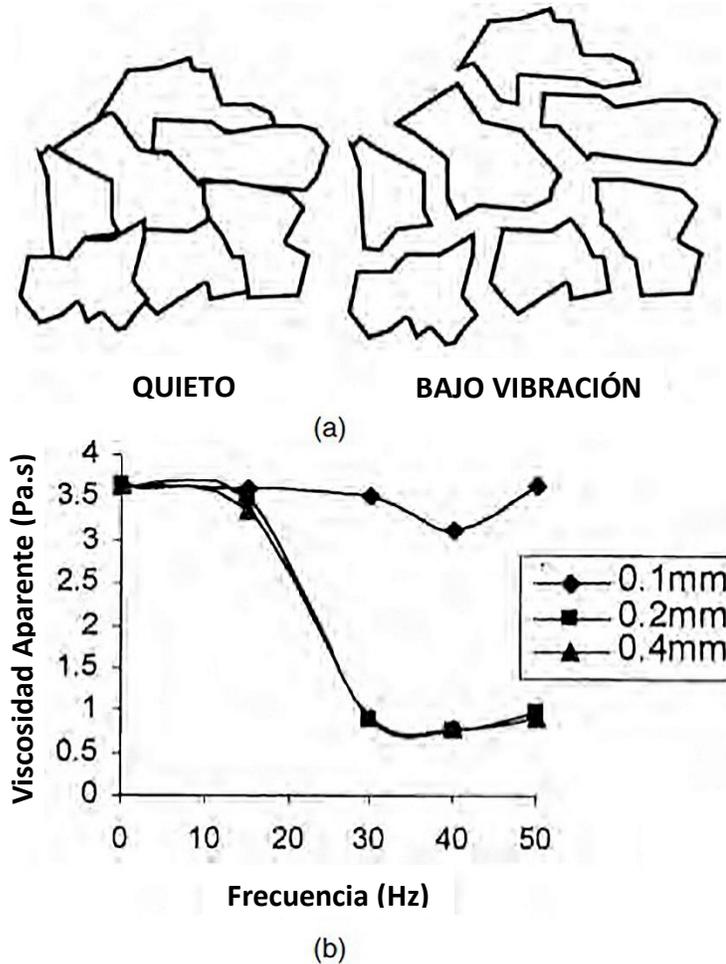


Figura 4.49. (a) Efecto de la vibración en las partículas sólidas de una suspensión. (b) Efecto de la frecuencia de vibración a tres amplitudes diferentes sobre la viscosidad aparente de un chocolate con leche.

El chocolate templado se encuentra en un estado muy inestable. La temperatura debe ser lo suficientemente baja como para no fundir los cristales de las semillas, lo que significa que se formarán otros cristales. Con el tiempo, el chocolate se volverá más espeso y, al cabo de mucho tiempo, se solidificará.

En la envasadora (Figura 4.50), el chocolate atemperado se introduce en la cubeta base (E). Desde aquí se bombea por una tubería (I) a la bandeja de flujo (J). Esta bandeja tiene toda la anchura de la cinta metálica y tiene una o dos ranuras en el fondo, que forman la "cascada".

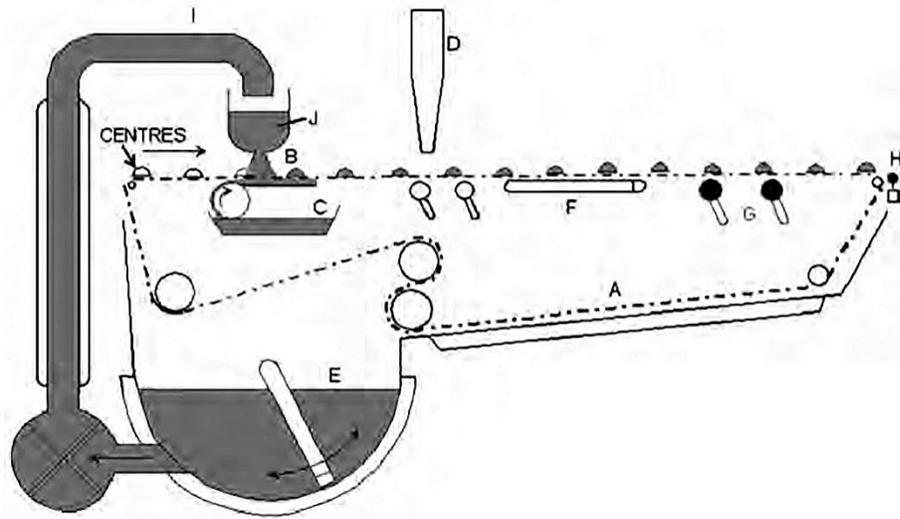


Figura 4.50. Diagrama esquemático de una envasadora

Como se ha descrito anteriormente, gran parte del chocolate de la bandeja de flujo pasa a través de la cinta de alambre debido al soplado o a las sacudidas, o simplemente porque se ha vertido sobre una zona de la cinta en la que no había dulce. Con el tiempo, en la artesa de la base el chocolate se volvería espeso y se atemperaría en exceso. El chocolate recién templado se añade a la cubeta de la base para reemplazar el que es eliminado por el producto, pero normalmente esto no es suficiente para evitar que se produzca este espesamiento. Por lo tanto, para mantener unas condiciones estables, se retira continuamente una parte del chocolate de la cubeta base de la envasadora. A continuación, se calienta a una temperatura de entre 40 °C y 50 °C para eliminar todos los cristales de grasa y se devuelve a la entrada de la atemperadora.

Cuando los chocolates salen de la planta de moldeo, la mayor parte de la grasa está todavía en estado líquido. Para que sea lo suficientemente firme como para manipularla y envasarla, la mayor parte debe solidificarse en la forma cristalina correcta. Esto requiere la eliminación de una gran cantidad de calor latente y una cantidad relativamente menor de calor específico. Es probable que los chocolates estén ya a una temperatura varios grados inferior a los 30 °C y,

cuando estén listos para ser envasados, estarán alrededor de la temperatura ambiente, un descenso de menos de 10 °C. El calor específico del chocolate es de unos 1,6 J g⁻¹ °C⁻¹, por lo que hay que eliminar unos 16 J de cada gramo de chocolate. El calor latente, en cambio, es de 45 J g⁻¹, por lo que se eliminan 45 J por cada gramo, lo que da un total de algo más de 60 J para solidificar y enfriar esa cantidad de chocolate.

Un cuerpo puede perder calor de tres maneras: por conducción, por radiación y por convección. En la conducción, el calor fluye a través del material directamente en contacto con el que se está enfriando. En este caso, el chocolate sólo está en contacto con el molde o la cinta de plástico. Ambos son muy malos conductores del calor, por lo que es muy poca la energía térmica que puede escapar por este método, aunque una superficie fría debajo de la cinta ayudará a cristalizar los productos finos y planos. La transferencia de calor por radiación tiene lugar a una velocidad determinada por la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre el objeto que se enfría y sus alrededores. En este caso, el dulce está a unos 25 °C. Si suponemos que el entorno está a 0 °C, que, como se verá más adelante, es más bajo de lo deseable, el calor transferido a este absorbedor de baja temperatura será de 126 W m⁻². El tercer método consiste en soplar aire frío sobre el producto. Parte del calor se cede a este aire, que luego se aleja y se vuelve a enfriar. Si el aire se enfría a 0 °C y se sopla sobre el producto a 240 m min⁻¹, el calor puede transferirse a 630 W m⁻², es decir, más de cinco veces más rápido que por radiación.

Sin embargo, las bajas temperaturas pueden dar lugar a dos problemas. En primer lugar, pueden hacer que la grasa se fije en una forma cristalina incorrecta. Esto hará que el producto florezca muy rápidamente y que los chocolates moldeados no se contraigan adecuadamente y sean difíciles de desmoldar. En segundo lugar, la humedad del aire puede condensarse en las superficies frías y gotear sobre el chocolate. Esto disolverá parte del azúcar de su interior. Cuando el chocolate se vuelve a calentar para su envasado, el agua se evapora

de nuevo, dejando una superficie de polvo blanco. Esto se parece mucho a la grasa en flor, pero en realidad es azúcar y por eso se llama azúcar en flor. Si es posible, la temperatura del túnel circundante debe mantenerse por encima del punto de rocío, es decir, la temperatura a la que la humedad empieza a condensarse.

Muchos enfriadores son simplemente túneles largos, con sopladores y enfriadores a intervalos, de modo que el túnel puede dividirse en diferentes zonas de temperatura. En la Figura 4.51 se muestra un diagrama de la sección transversal en una posición de este tipo. El enfriamiento inicial, sobre todo en el caso de los productos encamisados, es bastante suave. A continuación, se produce la parte más fría, que corresponde a la posición en la que se desprende la mayor parte del calor latente. Normalmente se trata de unos 13 °C, pero es posible alcanzar temperaturas más bajas, siempre que el aire se mueva rápidamente para evitar la condensación. A continuación, la temperatura se eleva ligeramente antes de que el producto entre en la sala de envasado. Esto se debe a que si la temperatura de la superficie del producto es inferior a la temperatura del punto de rocío en esta sala, la humedad se condensará en el chocolate causando manchas, o tal vez florecimiento del azúcar.

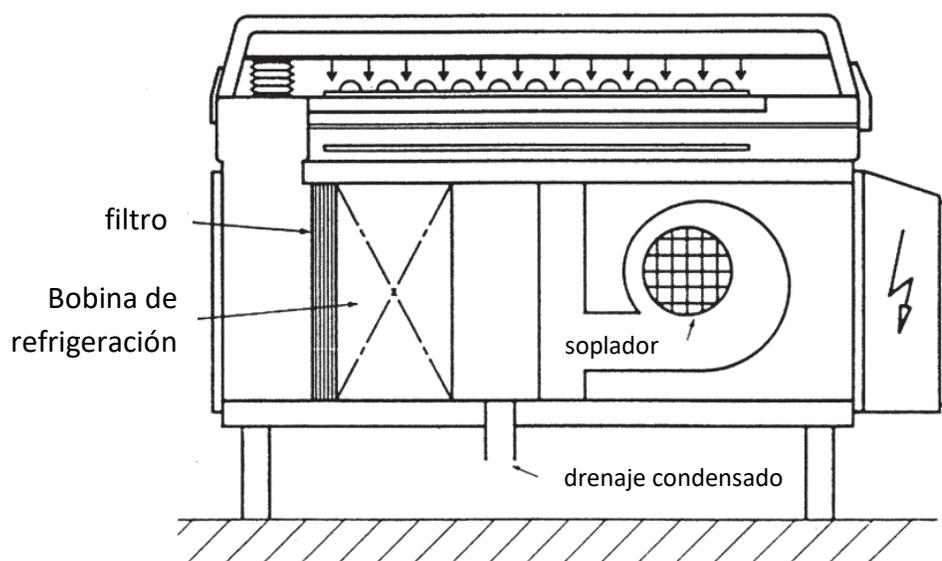


Figura 4.51. Sección a través de un refrigerador Gainsborough.

Cuando el espacio es limitado, y especialmente en el caso de los productos moldeados, se utilizan refrigeradores de varios niveles. En este caso, el producto va hacia delante y hacia atrás a través de diferentes zonas de temperatura. Así, un refrigerador de tres niveles tiene un tiempo de enfriamiento seis veces superior al de un refrigerador de túnel de longitud equivalente. El principal problema del sistema de varios niveles es que el producto debe mantenerse en posición horizontal mientras se eleva de un nivel al siguiente. Esto se consigue a veces con un sistema de cadena continua que sujeta los moldes o las bandejas de plástico en las que se colocan los caramelos recubiertos. El tiempo que tarda en cuajar un producto no sólo depende de la cantidad de cristales que tenga la grasa, sino también del tipo y la cantidad de chocolate. Un gran bloque de chocolate va a tardar, naturalmente, mucho más tiempo que unos pequeños bocados que se hacen para galletas. Sin embargo, normalmente se tarda entre 10 y 20 minutos en obtener un producto de buena calidad.

5. Principales parámetros que describen el flujo del chocolate fundido.

Las propiedades de fluidez del chocolate líquido son importantes para el consumidor y el fabricante de dulces. Aunque hay muchos instrumentos muy sofisticados para medir la viscosidad y la textura, la boca humana es realmente mucho más sensible que la mayoría de ellos. Cuando alguien come chocolate, los dientes muerden el chocolate sólido. Esto significa que la dureza del chocolate sólido es muy importante. La temperatura de la boca, de unos 37 °C, está por encima del punto de fusión del chocolate, por lo que se funde rápidamente, sobre todo cuando se somete a la intensa mezcla y cizallamiento de los dientes y la lengua. Una vez que se ha derretido, hay dos factores importantes. Uno es el tamaño máximo de partícula. Como se señaló anteriormente, si hay un número significativo de partículas de más de 30 micras (0.03 mm), el chocolate se sentirá arenoso en la lengua. Además, para tamaños inferiores a 30 micrones, se puede detectar una

diferencia de 2 a 3 micrones en el tamaño máximo de partícula como diferentes niveles de suavidad. Se han vendido chocolates con un tamaño máximo de partícula de aproximadamente 20 micras por tener una textura sedosa. El segundo factor es la viscosidad. Esto no solo afecta la forma en que el chocolate corre alrededor de la boca, es decir, la textura, sino que también cambia el sabor. Esto se debe a que la boca contiene tres receptores de sabor diferentes en diferentes lugares (consulte la Figura 5.1). El tiempo que las partículas sólidas del chocolate tardan en llegar a los receptores depende de la viscosidad. Esto significa que dos chocolates hechos con ingredientes idénticos, pero procesados para dar diferentes viscosidades, tendrán un sabor muy diferente.

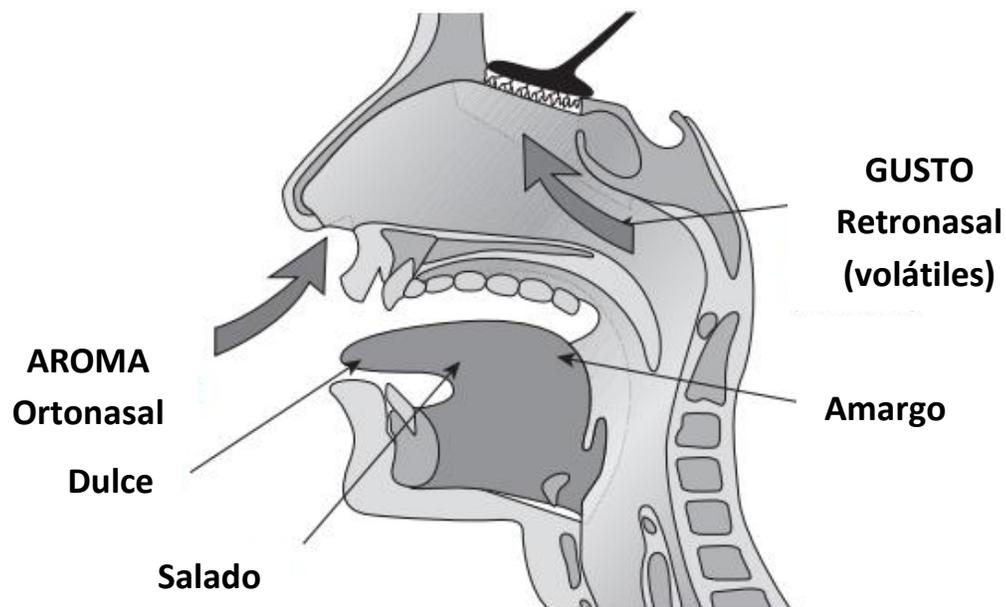


Figura 5.1. Localización de los receptores del sabor en la cabeza humana.

El tamaño de las partículas afecta tanto a la viscosidad como a la textura, y un chocolate con leche que haya sido molido con un tamaño máximo de partículas de 20 micras tendrá un sabor y una textura más cremosa que uno de 30 micras. Para el fabricante, el control del peso de los productos es muy importante. El chocolate es un alimento relativamente caro tanto en términos de ingredientes como de procesamiento. Por lo tanto, es económicamente importante no poner demasiado chocolate en un centro de confitería.

5.1 Viscosidad¹⁴:

El chocolate tiene un comportamiento de flujo más complejo. Al igual que con el líquido de Bingham, se necesita una fuerza mensurable para comenzar a fluir, pero una vez que lo hace, cuanto mayor es la fuerza, más delgado se vuelve. Este es un problema importante para el fabricante de chocolate, porque la viscosidad no es un número único, sino que tiene un valor que depende de la rapidez con que fluye. De hecho, se puede representar mejor mediante una curva de flujo. En una fábrica no es posible utilizar una curva como especificación para la viscosidad del chocolate, por lo que estos datos deben simplificarse. La forma en que esto se hace normalmente es describiendo la curva mediante una ecuación matemática.

Existen muchos, pero el más utilizado es la ecuación de Casson (véase capítulo 8), que se desarrolló originalmente para describir el flujo de tinta de impresión. El viscosímetro mide algunos puntos en la curva y luego se usa la ecuación para dar dos parámetros de flujo: el valor de rendimiento y la viscosidad plástica. El valor de rendimiento está relacionado con la energía necesaria para iniciar el movimiento del chocolate. Si es alto, el chocolate tenderá a levantarse, lo que puede ser necesario para poner marcas en dulces o al producir bocados de chocolate para galletas horneadas. Se necesita un valor de rendimiento bajo para dar una fina capa de chocolate sobre una galleta. La viscosidad plástica se relaciona con la energía requerida para mantener el chocolate en movimiento una vez que ha comenzado a fluir. Esto también es importante para determinar el espesor del recubrimiento de chocolate en un dulce y también para determinar el tamaño de las bombas necesarias para bombear el chocolate líquido.

5.2 Tamaño de partícula²:

Se demostró que la viscosidad del chocolate no podía describirse con un solo número, sino que se necesitaba un mínimo de dos números y, para ser realmente preciso, una curva completa. El tamaño de las partículas es el mismo. Aunque hasta ahora se ha hablado del tamaño máximo de las partículas para determinar la textura

de un chocolate, muy pocas partículas son tan grandes. Una vez más, la situación real es una curva, conocida como distribución del tamaño de las partículas, y el fabricante de chocolate tiene que tomar un resumen de esta información para ayudar con el procesamiento y el control de calidad.

La distribución del tamaño de las partículas puede adoptar varias formas, dos de las más comunes se ilustran en la Figura 5.2. En ella se muestra la distribución de tamaños del mismo chocolate, pero representada de dos formas. Si se observan las partículas sólidas del chocolate con un microscopio y se determina el diámetro de cada una de ellas, será posible determinar la proporción de partículas dentro de un rango de tamaño determinado. Esto se muestra en la distribución del número frente al tamaño.

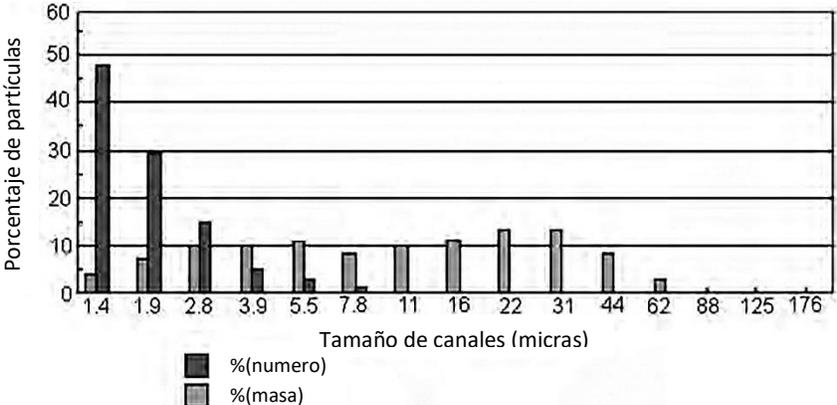


Figura 5.2. Comparación de las distribuciones granulométricas de masa y número de un chocolate.

Si, por el contrario, se pesaran las partículas individuales y se midiera la proporción del peso total que se debe a un determinado rango de tamaño, se obtendría una distribución como la de la Figura 5.2. Se trata de una distribución de masa en función del tamaño. Normalmente se miden determinando una estimación del volumen de las partículas sólidas y suponiendo una densidad constante. Como puede verse, las dos curvas son muy diferentes. El tamaño medio de las partículas en la distribución numérica es de unas 2 micras, mientras que en la distribución de masas es de casi 10 micras. El tamaño máximo en la distribución de números parece ser de unas 9

micras, aunque se sabe por la distribución de masas que hay partículas de hasta 70 micras.

La medición de la distribución del tamaño de las partículas en los productos de chocolate se realiza mediante la técnica de difracción láser, también conocida como dispersión de luz láser de bajo ángulo, que se está convirtiendo rápidamente en el estándar de análisis preferido en muchas industrias de todo el mundo para rangos entre 0,1 y 2000 μm para la caracterización y el control de calidad. El instrumento utilizado, Malvern Mastersizer 3000 (Figura 5.3), fabricado por Malvern Instruments, ofrece una mayor flexibilidad en la medición del tamaño de las partículas de diversos productos de confitería y de muchos materiales industriales. La técnica se basa en el principio de que el ángulo de difracción es proporcional al tamaño de las partículas. Utiliza un láser como fuente de luz intensa y coherente de longitud de onda fija, un detector adecuado que es una lámina de silicio fotosensible con varios detectores discretos y algún medio para hacer pasar la muestra a través del rayo láser. El método utilizado no es destructivo ni intrusivo, por lo que las muestras pueden recuperarse si son valiosas, y el resultado proporcionado es altamente reproducible.



Figura 5.3. El analizador de tamaño de partículas Malvern (Malvern MasterSizer 3000).

El tamaño de partícula afecta tanto a la viscosidad como a la textura, y un chocolate con leche que ha sido molido por decir un tamaño máximo de partícula de 20 micras tendrá un sabor y textura más cremosos que uno de 30 micras. Las partículas más grandes son importantes para la sensación en la boca con respecto a la aspereza, pero las más pequeñas son más importantes con respecto a las propiedades de flujo del chocolate, en particular el valor de rendimiento. La razón de esto es que se requiere una gran cantidad de grasa para cubrirlos, de modo que puedan moverse entre sí en el chocolate líquido.

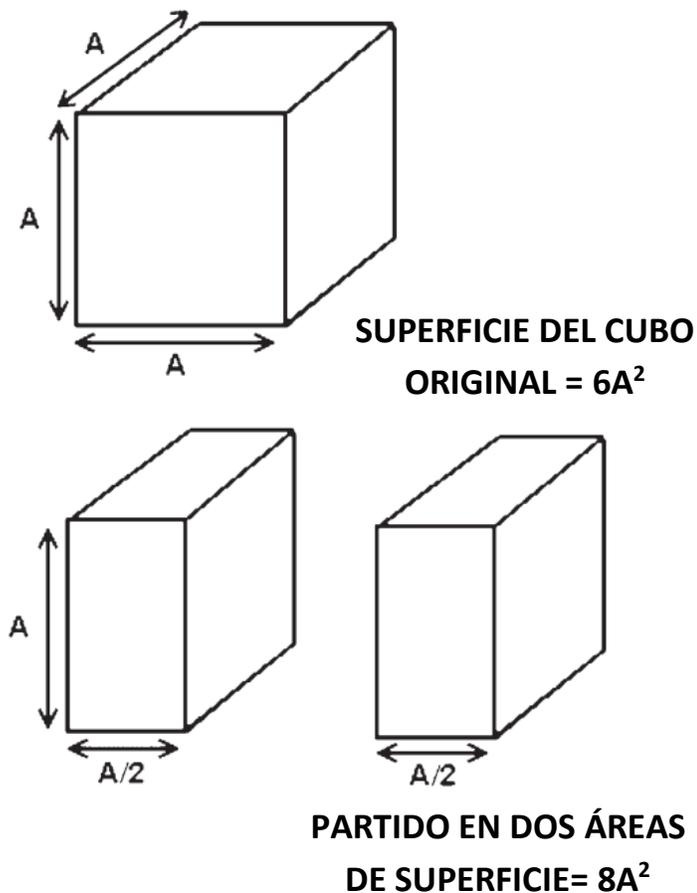


Figura 5.4. Terrón de azúcar antes y después de ser partido por la mitad.

La Figura 5.4 representa un terrón de azúcar. Este tiene seis lados (cuatro lados verticales, el superior y el inferior), que necesitan ser recubiertos con grasa. Si el cubo se rompe por la mitad, hay ocho lados que se deben recubrir (las dos superficies nuevas son del mismo tamaño que las antiguas). Esto significa que se

necesita un 30% más de grasa, aunque solo hay la misma cantidad de azúcar presente. Es necesario reducir el diámetro de las partículas en unas 100 veces, de modo que se crea una nueva y vasta superficie, que consumirá la grasa que ayuda a que el chocolate fluya.

Se sabe que necesitamos moler el azúcar por debajo de las 30 micras, de lo contrario quedaría rugoso, pero, ¿Qué pasaría si fuera posible crear partículas de azúcar esféricas todas de 29 micrones? Esto tendría una superficie mínima para cubrir con grasa, pero todas las partículas serían lo suficientemente pequeñas para hacer chocolate. Esto, sin embargo, daría un chocolate muy espeso. La razón es que las partículas no se compactarían. Como se muestra en la Figura 5.5, todas las partículas esféricas pueden llenar solo alrededor del 66% del volumen. Si tomamos otro tamaño de los más pequeños especialmente elegidos para rellenar los agujeros, esto aumenta al 86%, y un tercer tamaño lo llevará al 95%.

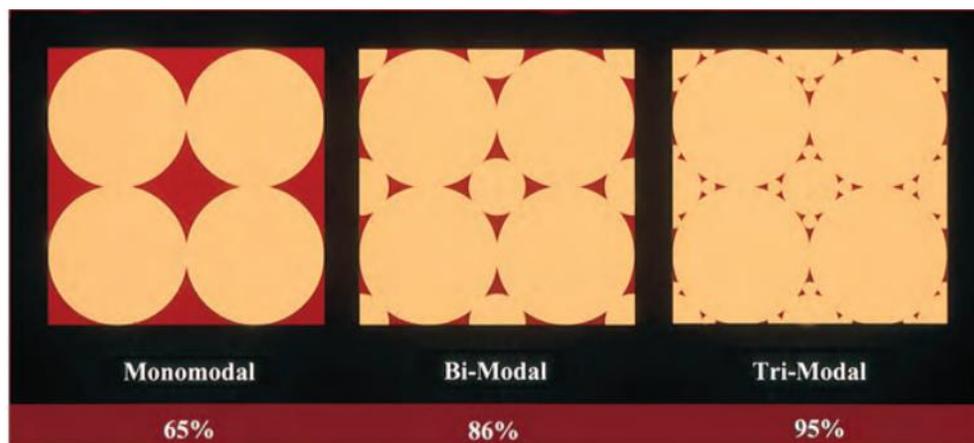


Figura 5.5. Embalaje de esferas que son: (1) todas del mismo tamaño; (2) dos tamaños diferentes; (3) tres tamaños diferentes.

Por lo tanto, el fabricante de chocolate idealmente le gustaría moler las partículas para que se compacten bien pero tengan un área mínima para cubrir. Por el momento, solo es posible realizar cambios menores en el tamaño de las partículas ajustando las velocidades de funcionamiento y las condiciones de los molinos que se utilizan.

Entonces, ¿qué parámetros deben medirse para determinar si la distribución del tamaño de partícula es buena para la fabricación de chocolate? La forma de las curvas de distribución del tamaño de partícula da alguna indicación, pero, al igual que con las mediciones de viscosidad, las curvas son difíciles de usar para controlar un proceso de fabricación. Sin embargo, hay un parámetro que proporciona una guía útil sobre cómo afectará la distribución del tamaño de partículas al flujo.

Se ha demostrado que las partículas finas hacen que el chocolate sea más espeso al usar para recubrir parte de la grasa presente en el chocolate que, de otro modo, permitiría que las partículas fluyan entre sí. Sin embargo, no afectan a ambos parámetros de flujo de la misma manera. La Figura 5.6 muestra gráficos del valor de rendimiento y de la viscosidad plástica del mismo chocolate que ha sido molido a diferentes tamaños de partículas.

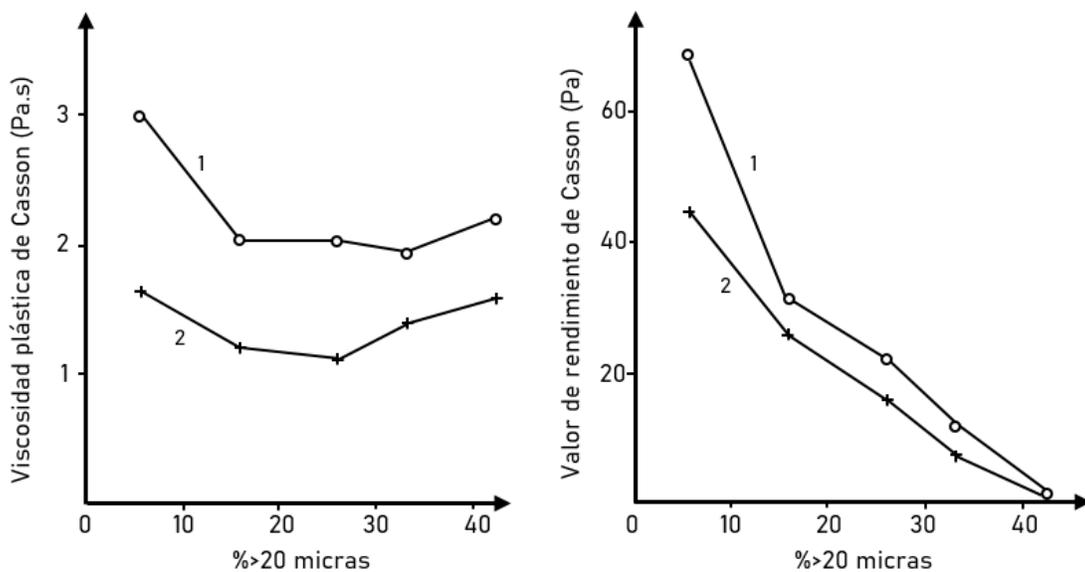


Figura 5.6. Influencia de la finura de las partículas en los parámetros de viscosidad de dos chocolates de leche dos chocolates de leche: (1) 30% de grasa; (2) 32% de grasa.

El valor de rendimiento aumenta drásticamente a medida que el chocolate se vuelve más fino, pero la viscosidad del plástico permanece casi sin cambios, de hecho, disminuye ligeramente en una etapa. Esto se debe a que más de la mitad del

volumen del chocolate es absorbido por partículas sólidas, como se ilustra en la Figura 5.7.

Cuando las partículas son grandes, hay un número limitado de puntos de contacto. A medida que aumenta el número de partículas, hay muchos puntos en los que las partículas están cerca unas de otras, por lo que se forma una estructura suelta. Esta estructura debe romperse antes de que fluya el chocolate y, por lo tanto, el valor de rendimiento aumenta con la proporción de partículas finas. Una vez que el chocolate comienza a fluir, la estructura se rompe y las pequeñas partículas pueden moverse juntas. Por lo tanto, hay muy poca diferencia entre eso y las partículas grandes que se mueven, por lo que la viscosidad del plástico permanece casi sin cambios. La ligera disminución se debe probablemente a que se libera más grasa en el sistema al triturar más el licor de cacao o la leche en polvo, por lo que el licor de cacao se vuelve más delgado a medida que se vuelve más fino, en contraste con el chocolate.

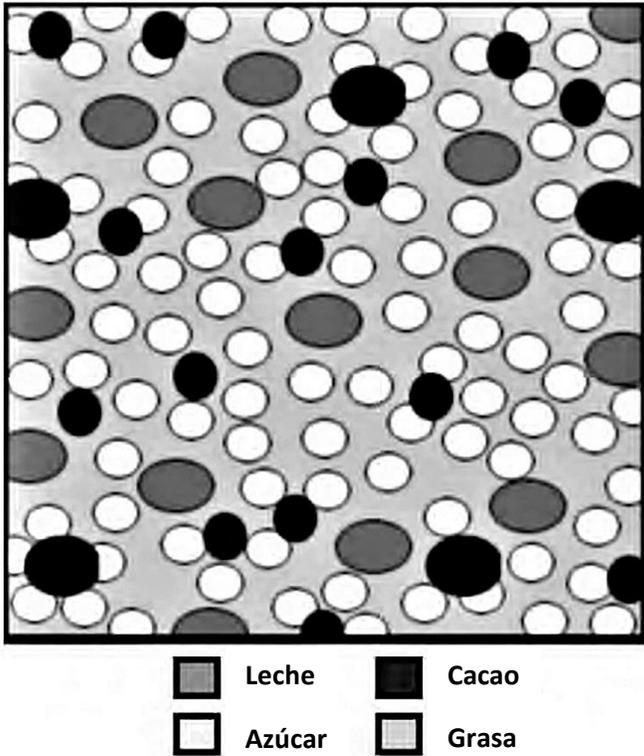


Figura 5.7. Representación esquemática de las partículas sólidas y la grasa dentro de un chocolate.

5.3 Efecto de las adiciones de grasa sobre la viscosidad⁸:

Las habas de cacao están compuestas por un 55% de manteca, que constituye alrededor del 30% del chocolate final. Los triglicéridos de la manteca de cacao tienen ácidos grasos saturados en las posiciones 1,3 y ácido oleico en la posición 2. Los contenidos de ácidos grasos se sitúan en torno al ácido oleico (35%), esteárico (34%) y palmítico (26%), a los que se añaden lípidos polares, esteroides y tocoferoles, cada uno de los cuales depende de factores como las condiciones de cultivo y el origen. La composición simple de glicéridos hace que el chocolate se funda en el rango de temperaturas de 23-37 °C. La forma cristalina del lípido V (β_2) es la forma deseable en la producción de chocolate y la dominante en el chocolate bien templado.

Como era de esperar, la adición de más grasa líquida ayuda a que un chocolate fluya más fácilmente. La grasa de la leche tiene el mismo efecto que la manteca de cacao sobre la viscosidad si se agrega al chocolate a 40°C, pero ralentiza la velocidad de fraguado y suaviza el chocolate final. Además, debido a que la grasa de la leche se derrite a una temperatura más baja, cambiará la forma en que el producto se derrite en la boca. Por tanto, las dos grasas deben estar presentes en la proporción adecuada para dar la textura correcta de chocolate al producto en el que se utiliza. La grasa de la leche se usa a menudo en el chocolate amargo para retrasar la formación de un brillo blanco en la superficie llamado flor de chocolate. La grasa debe estar en forma libre para ayudar al flujo. La leche en polvo de licor de cacao debe molerse finamente para liberar la grasa de las células o de la tripa esférica respectivamente. Además, el conchado debe haber sido suficientemente vigoroso para romper cualquier aglomerado que contenga grasa.

La mayoría de los chocolates contienen entre un 25% y un 35% de grasa, aunque los recubrimientos de helado son mucho más altos y algunos productos especiales como el chocolate para cocinar y los trozos de fideos son más bajos. El nivel real presente dependerá del proceso que se esté utilizando: se necesita una cierta cantidad para que la película de chocolate permanezca en el refinador de rodillos y

para que el motor de la concha no se sobrecargue. Además, afectará la textura del chocolate terminado, por lo que es probable que una tableta de chocolate de alta calidad tenga un contenido de grasa más alto y una partícula más baja que un chocolate que se usa para cubrir una galleta.

El efecto de un 1% adicional de grasa sobre la viscosidad depende de la cantidad que ya está allí y también de cuál de los parámetros de viscosidad estamos considerando (ver Figura 5.8). Por encima de un contenido de grasa del 32%, hay muy pocos cambios en la viscosidad con cualquier adición adicional. Un aumento del 1% a un contenido de grasa del 28% tiene un efecto espectacular, especialmente en la viscosidad del plástico, que se reduce casi a la mitad. El cambio se vuelve más dramático incluso con contenidos de grasa más bajos, ya que los chocolates con menos del 23% de grasa son normalmente una pasta en lugar de un líquido, pero los chocolates con un 25% de grasa están disponibles en el mercado.

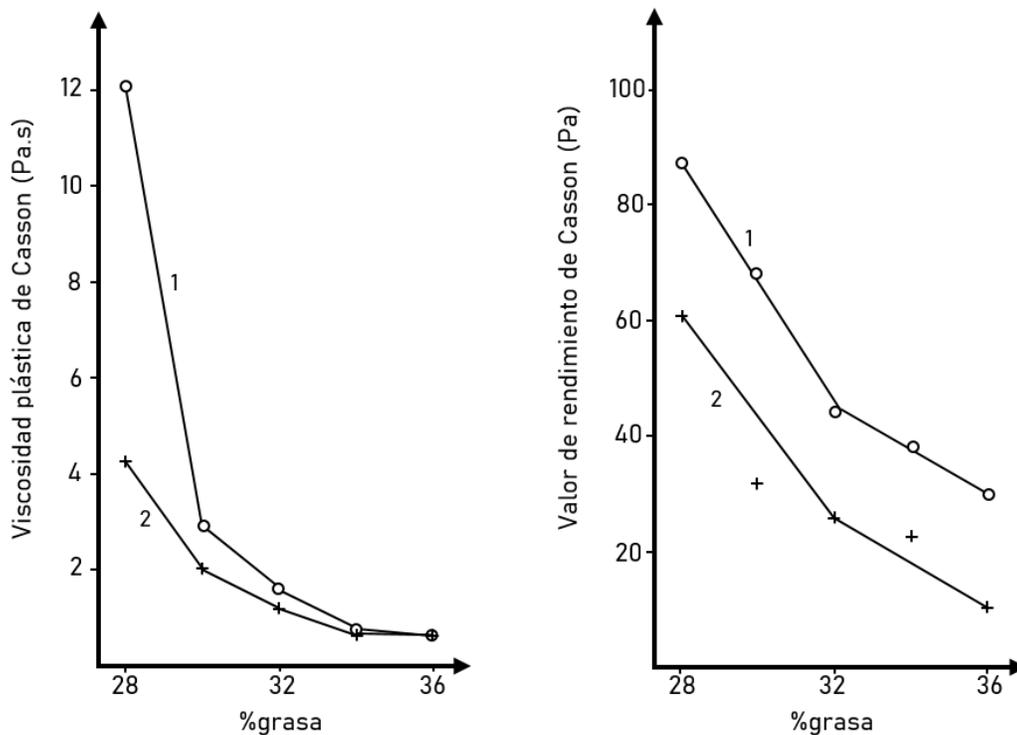


Figura 5.8. Influencia del contenido de grasa en los parámetros de viscosidad de dos chocolates con leche: (1) chocolate fino; (2) chocolate más grueso.

El efecto de la grasa es proporcionalmente mucho más alto para la viscosidad plástica que el valor de rendimiento (más de 12 veces en comparación con menos de 3 veces para las muestras y rangos ilustrados). Esto no es demasiado sorprendente, ya que la grasa adicional se agregará a la grasa de libre movimiento que ayuda a las partículas cuando fluyen entre sí. La mayor parte de la grasa es grasa "humectante", que está parcialmente adherida a las superficies de las partículas. Esta grasa libre tiene un gran efecto en la lubricación del flujo cuando se produce y, por lo tanto, la viscosidad del plástico disminuye drásticamente. El valor de rendimiento está más relacionado con la fuerza entre las partículas sólidas, que a su vez está relacionada con la distancia absoluta entre ellas. Esto se verá menos afectado por las adiciones de grasa.

5.4 Flujo de humedad y chocolate¹⁰:

El chocolate fundido suele tener un contenido de humedad de entre el 0,5 y el 1,5%, principalmente en los sólidos de cacao, que no afecta a la fluidez del chocolate. Una mayor humedad agrega las partículas de azúcar formando grumos, y la humedad en las superficies de las partículas de azúcar aumenta la fricción y la viscosidad aparente.

Se esperaría que como el agua es un líquido, si se añadiera al chocolate líquido, la mezcla resultante tendría una viscosidad en algún lugar entre el agua y el chocolate. Esto está lejos de ser el caso y la adición de 3% o 4% en peso de agua convertirá el chocolate en una pasta muy espesa y la viscosidad aumenta hasta el 20% de humedad, tras lo cual se forma una fase acuosa. Aproximadamente, por cada 0.3% de humedad adicional que queda dentro del chocolate al final del conchado, el fabricante debe agregar un 1% adicional de grasa. Dado que la grasa es, con mucho, el componente principal más caro del chocolate, por lo que es importante que se elimine la mayor cantidad de agua "libre" posible.

El agua es como la grasa en que puede estar ligada o libre; a diferencia de la grasa, debe estar tanto como sea posible en la condición unida. Si se mide la humedad total, una parte se debe al agua de cristalización de la lactosa, ya que a menudo está presente como monohidrato, el agua puede estar dentro de las células de cacao que no han sido destruidas por la molienda. Esta agua no afectará a la fluidez del chocolate. El chocolate está formado casi en su mitad por partículas de azúcar muy pequeñas y cualquier humedad las disuelve o forma manchas pegajosas en su superficie. Esto hace que se peguen entre sí y aumenta enormemente la viscosidad del chocolate. Si hay grandes cantidades de agua, por ejemplo, por encima del 20%, hay suficiente agua presente para disolver la mayor parte del azúcar y formar corrientes continuas a través del chocolate y así ayudarlo a fluir.

Se puede agregar crema al chocolate para formar una mezcla suave, conocida como ganache, que no se rompe y no se contrae mucho al enfriarse. Esto se hace revolviendo la crema muy vigorosamente mientras se le agrega chocolate líquido. En este caso, el agua de la crema está en emulsión. Esto significa que las gotitas de agua están rodeadas por una grasa, con un emulsionante formando una capa entre las dos. Estos emulsionantes se encuentran naturalmente en la crema, pero también se agregan al chocolate. Cuando uno de estos emulsionantes está presente, la viscosidad del chocolate se ve ligeramente menos afectada por la humedad.

La mayor parte del agua se extrae de la concha durante la etapa inicial de concha seca. Sin embargo, esto debe hacerse con cuidado, porque si el vapor de agua sale de los ingredientes del chocolate más rápido de lo que escapa de la concha, puede condensarse para formar gotitas. Estas gotitas pueden regresar al chocolate y disolver algunas de las partículas de azúcar. Estos se pegarán para formar grumos duros y arenosos, una vez que finalmente se elimine la humedad. Esto significa que incluso si un chocolate se ha molido correctamente, aún tendrá un sabor muy arenoso en el producto final.

5.5 Emulsificadores y viscosidad de chocolate⁶

La función de un emulsionante es formar una barrera entre dos sustancias no mezclables. Una emulsión juega un papel importante en la separación de los glóbulos de agua en la grasa; por ejemplo, en la margarina, que tiene gotas de agua en grasa (una emulsión de agua en aceite), o en crema, que son gotas de grasa en agua (una emulsión de aceite en agua). La grasa del cacao en grano puede existir en ambos tipos de emulsión. En el chocolate casi no hay agua, por lo que el emulsionante es algo diferente. Hay partículas de azúcar, que son hidrofílicas pero lipofóbicas, es decir, que atraen el agua pero tienden a repeler la grasa.

El chocolate líquido fluye porque el azúcar y otras partículas sólidas pueden moverse entre sí, por lo que, como se describió para el proceso de conchado, las superficies de las partículas sólidas deben recubrirse con grasa. Esto es algo que no ocurre de forma muy natural, por lo que, al igual que las emulsiones de agua, una sustancia que forma una capa entre las partículas sólidas y la grasa ayudará enormemente al proceso. En este caso, el emulsionante recubre la superficie sólida y forma una capa límite entre ella y la grasa y es realmente un agente tensoactivo en lugar de un emulsionante.

El mecanismo por el cual funciona un agente tensoactivo se ilustra en la Figura 5.9. Las moléculas individuales tienen una cola lipofílica (que gusta a la grasa), que sobresale de la grasa, donde quiere estar. El otro extremo es lipofóbico y no le gusta la grasa.

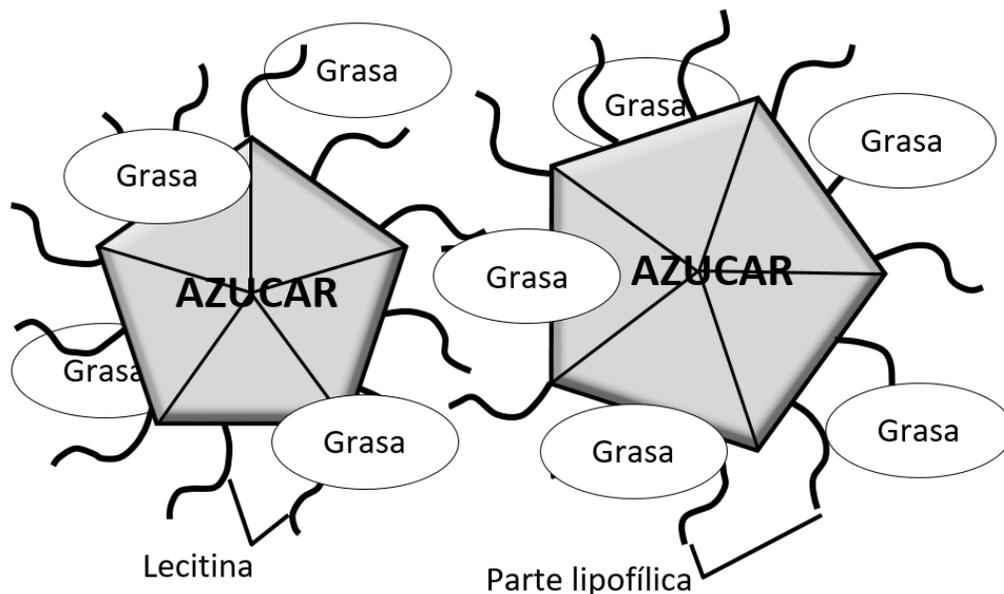


Figura 5.9. Acción de recubrimiento por moléculas de tensoactivo sobre partículas de azúcar, en la matriz del chocolate.

Por lo tanto, se mantiene lo más alejado posible de la grasa al adherirse a la superficie (también lipófoba) del azúcar. Esto se puede comparar con las algas en una roca. Hay una "cabeza" que se adhiere a una roca, y una "cola" larga que sale al mar. La "cola" ondea y altera el flujo alrededor de la roca. Así como hay muchos tipos de algas marinas, también hay muchos tipos de agentes tensoactivos que controlan las propiedades de flujo del chocolate líquido.

Algunos tienen "cabezas" muy grandes que se adhieren fuertemente al azúcar, mientras que otros están adheridos con menor fuerza e incluso pueden eliminarse mediante la adición de un agente tensoactivo diferente. De manera similar, hay diferentes longitudes de "colas", que afectan las propiedades de flujo de diferentes maneras. Esto significa que un agente tensoactivo que es especialmente beneficioso con respecto al valor de rendimiento puede ser pobre con respecto a la viscosidad plástica y viceversa.

5.5.1 Lecitina⁵:

El agente tensoactivo más común es la lecitina (ver Figura 5.10), que se ha utilizado en el chocolate desde la década de 1930. Es una sustancia natural, obtenida frecuentemente de la soja y considerada por muchos como beneficiosa para la salud. Como se describió anteriormente, es capaz de adherirse al azúcar, dejando el otro extremo de la molécula libre en el sistema graso para ayudar al flujo. Se demostró que la lecitina era capaz de unirse de manera particularmente fuerte al azúcar, y es este fenómeno el que la hace tan eficaz en la fabricación de chocolate.

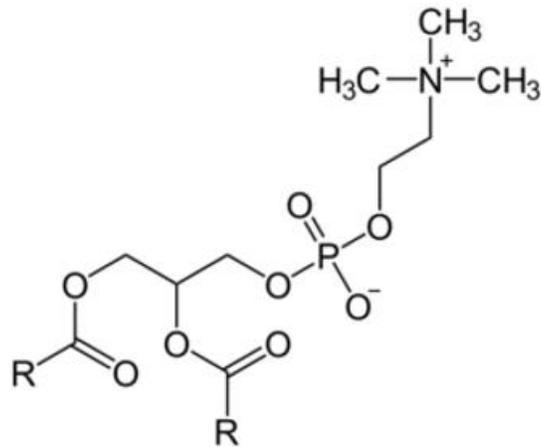


Figura 5.10. Estructura química de la Lecitina.

Esto fue confirmado más tarde por Vernier (Figura 5.11), quien utilizó una microscopía de barrido láser confocal, que mostró que las moléculas de lecitina fluorescentes rodeaban las partículas de azúcar. Se dice que adiciones de entre 0,1% y 0,3% de lecitina de soja reducen la viscosidad en más de 10 veces su propio peso de manteca de cacao. También los chocolates que contienen agentes tensoactivos, como la lecitina, pueden tolerar niveles más altos de humedad que los que no contienen emulsionantes. Esto es importante porque el agua es muy perjudicial para la viscosidad del chocolate.

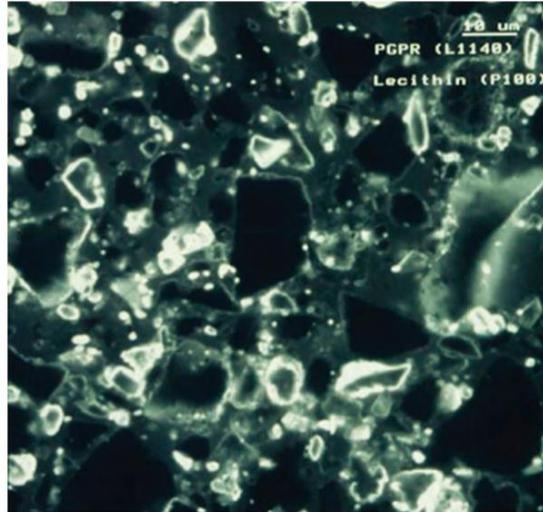


Figura 5.11. Imagen de microscopio confocal de barrido láser de la lecitina (fluorescente) que rodea las partículas sólidas dentro del chocolate.

Sin embargo, demasiada lecitina puede ser perjudicial para las propiedades de flujo, ya que a niveles más altos, por encima del 0,5%, el valor de rendimiento aumenta con el aumento de las adiciones de lecitina, aunque normalmente la viscosidad plástica sigue cayendo (Figura 5.12).

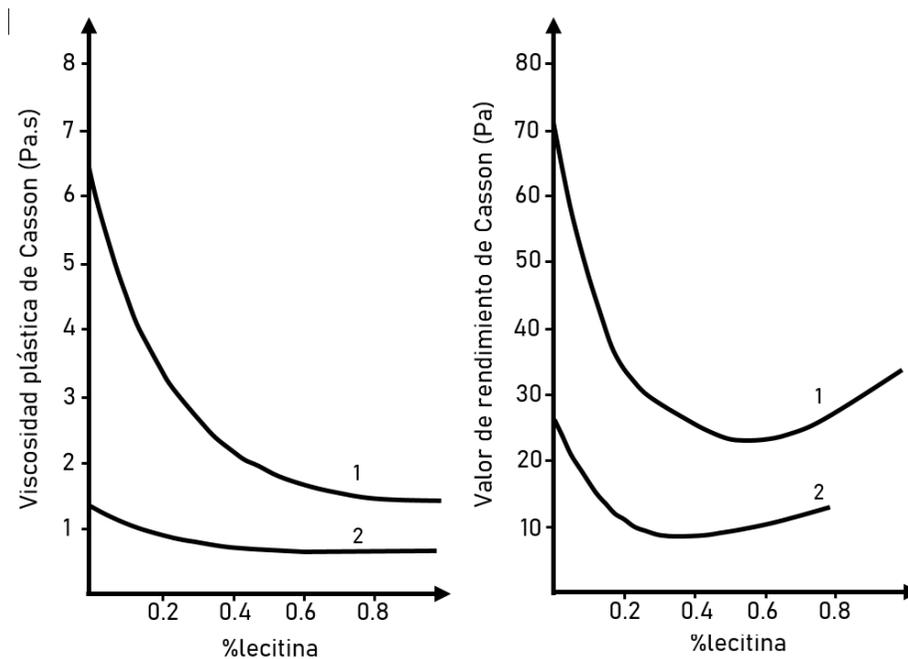


Figura 5.12. Influencia de la lecitina de soja en los parámetros de viscosidad de dos chocolates oscuros: (1) 33,5% de grasa; (2) 39,5% de grasa.

Bartusch mostró que al 0,5% aproximadamente el 85% del azúcar ya estaba recubierto. Después de esto, la lecitina puede adherirse libremente a sí misma para formar micelas o formar una bicapa alrededor del azúcar (de modo que las "colas" de una capa de lecitina estén separadas por las "colas" de una segunda capa mirando hacia el otro lado, como se muestra en la Figura 5.13), cualquiera de los cuales obstaculizará el flujo. La cantidad real de lecitina que se puede utilizar antes de que se produzca el espesamiento depende en cierta medida de la distribución del tamaño de las partículas.

Un chocolate finamente molido, con una gran superficie específica, tendrá un valor de rendimiento relativamente alto, como se explicó anteriormente. Sin embargo, esto puede compensarse parcialmente por el hecho de que, como hay un área más grande que cubrir, se puede usar más lecitina antes de que tenga lugar este aumento en el valor de rendimiento.

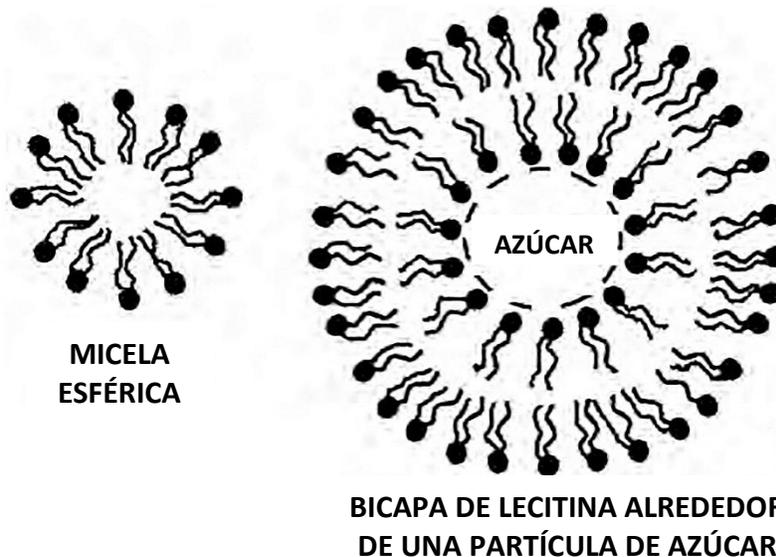


Figura 5.13. Diagrama esquemático de una micela esférica y una bicapa de lecitina sobre una partícula de azúcar.

En un momento, para que un producto se llamara "chocolate", en su etiqueta se indicaba que la cantidad de lecitina utilizada se restringía al 0,5% o al 1,0%, según

el tipo de chocolate que se estaba elaborando y dónde se estaba fabricando o vendiendo. Las regulaciones actuales de la UE han cambiado esto para que las lecitinas puedan usarse de acuerdo con el principio de quantum satis (no se especifica un nivel máximo). Sin embargo, deben usarse con la directiva de “Buenas Prácticas de Fabricación” y en niveles no superiores a los necesarios para el propósito previsto. También hay una cantidad muy pequeña de lecitina que está presente de forma natural en el cacao y los componentes de la leche, especialmente en el suero de leche.

La lecitina de soja es una mezcla de fosfoglicéridos naturales (fosfolípidos) con otras sustancias como el aceite de soja (ver Tabla 5.1). Se utiliza ampliamente en toda la industria alimentaria. Sin embargo, su composición puede variar y algunos fabricantes de lecitina han intentado optimizar aquellos componentes que son beneficiosos para el flujo del chocolate, por lo que las lecitinas fraccionadas están disponibles comercialmente.

Tabla 5.1. Composición de fosfoglicéridos (fosfolípidos) de la lecitina de soja.

Fosfatidilcolina (PC)	13 - 16 %
Fosfatidiletanolamina (PE)	14 - 17 %
Fosfatidilinositol (PI)	11 - 14 %
Ácido fosfatídico (PA)	3 - 8 %
Otros fosfoglicéridos	5 - 10 %

Los aprox. 44% restantes son principalmente triglicéridos

Se ha demostrado que la parte fosfatidilcolina de la lecitina es particularmente eficaz para reducir la viscosidad plástica de algunos chocolates, mientras que se ha demostrado que otras fracciones tienen un efecto negativo, particularmente en el valor de rendimiento. Debido a que la proporción de los diferentes componentes varía dentro de las lecitinas estándar, su efectividad para reducir la viscosidad del chocolate puede cambiar de un lote a otro. Por esta razón, algunos proveedores ofrecen un producto estandarizado. Para tratar de superar el aumento del valor de rendimiento a niveles más altos, Cadbury desarrolló un agente tensoactivo

alternativo a partir del aceite de colza endurecido. Este es un fosfátido de amonio y se conoce como YN. La lecitina comercial se fabrica principalmente a partir de soja y, aunque en general se considera que la lecitina es beneficiosa para la salud, algunos países han expresado su preocupación de que parte de la soja pueda derivar de una fuente modificada genéticamente. Esto ha llevado a que la lecitina se venda como si fuera de otras fuentes o de áreas de cultivo seleccionadas como Brasil. Además, se comercializan alternativas a la lecitina para uso de confitería, p. Ej. Ésteres de ácido cítrico. Es probable que su eficacia real dependa del tipo de chocolate y del método de fabricación utilizado para producirlo.

5.5.2 Polirricinoleato de poliglicerol²:

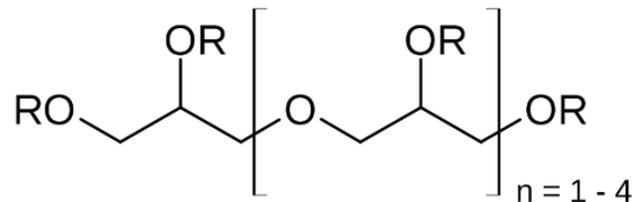


Figura 5.14. Estructura química del Polirricinoleato de poliglicerol.

El polirricinoleato de poliglicerol (PGPR), también conocido como Admul-WOL, es un agente tensoactivo / emulsionante muy diferente (ver Figura 5.14). Originalmente se desarrolló para su uso en la industria de la panificación y puede fabricarse mediante la policondensación de aceite de ricino y de glicerol, cuyos productos se mezclan y luego se esterifican. Aunque tiene un efecto relativamente pequeño sobre la viscosidad del plástico, tiene un efecto dramático en el valor de rendimiento. Con solo un 0,2% en el chocolate, puede reducir a la mitad el valor de rendimiento en relación con la lecitina, y en aproximadamente un 0,8% se ha demostrado que lo reduce a cero, convirtiendo el chocolate en un líquido newtoniano.

Cómo se hace esto ha sido objeto de muchos estudios, pero aún no se comprende completamente. Su efecto es muy significativo y puede resultar útil o indeseable. La Figura 5.15 muestra dos chocolates vertidos sobre una galleta, con la misma viscosidad plástica, pero valores de rendimiento muy diferentes debido a la presencia en uno de algunos PGPR. Muy a menudo, las propiedades de flujo

requeridas se encuentran en algún lugar entre estos dos extremos, y muchos fabricantes de chocolate suelen utilizar mezclas de PGPR y lecitina y, de hecho, los proveedores comerciales de emulsionantes las venden como tales.



Figura 5.15. Efecto del valor de rendimiento al recubrir una galleta con chocolate.

5.5.3 Otros emulsificantes⁶:

Otros emulsionantes tales como ésteres de sorbitán, spans y tweens, etc. se encuentran a menudo en chocolates y revestimientos compuestos con sabor a chocolate. Normalmente son menos efectivos para reducir el valor de rendimiento o la viscosidad plástica que la lecitina o el PGPR. Sin embargo, suelen alterar la velocidad de fraguado, el brillo del producto y, sobre todo, su vida útil con respecto a la formación de floraciones.

5.6 Grado de mezcla²:

El grado de cizallamiento / mezcla es crítico para obtener el chocolate más fino posible para un contenido de grasa dado. Hay otros factores que son importantes, dos de los cuales son el orden de adición de los ingredientes en la concha y los motores de accionamiento de estos elementos de mezcla.

La concha está tratando de cubrir las partículas sólidas con grasa y una acción de untar lo hace muy bien, siempre que las partículas no puedan apartarse del camino. Si hay mucha grasa presente, se pueden mover más fácilmente y, por lo tanto, el proceso se vuelve menos eficiente. Esto significa que es necesario agregar solo la grasa suficiente para que el chocolate se convierta en una pasta. El resto de la grasa

debe agregarse hacia el final de la etapa de conchado líquido. Se dice que la grasa agregada en esta etapa es dos veces más efectiva para reducir la viscosidad final del chocolate que la misma cantidad de grasa agregada al comienzo del conchado. Es aún más importante agregar la mayor parte de la lecitina en las etapas posteriores. Un extremo de la molécula de lecitina es muy higroscópico y se adhiere al agua, lo que dificulta su eliminación. Esto significa que normalmente debe agregarse al final de la etapa de conchado seco, cuando se ha eliminado la mayor parte del agua y, preferiblemente, como la grasa, debe agregarse en la etapa de conchado líquido.

En determinadas circunstancias, se añade una fracción de lecitina al comienzo del conchado para reducir la velocidad de eliminación de la humedad. Si la concha está caliente o hay mucha humedad, entonces el agua se liberará de los ingredientes a un ritmo más rápido de lo que puede escapar de la concha. Luego vuelve al chocolate y forma aglomerados duros al pegar partículas de azúcar, lo que hace que el chocolate tenga un sabor arenoso. Esto puede aliviarse con esta adición temprana de algo de lecitina. Algunas personas creen, sin embargo, que si la lecitina está presente en la etapa de refinado del rodillo, la presión la forzaría a entrar en las partículas de cacao y la hará ineficaz. Otras fuentes afirman que las altas temperaturas reducirán la eficacia de la lecitina, pero esto tampoco se ha comprobado por completo.

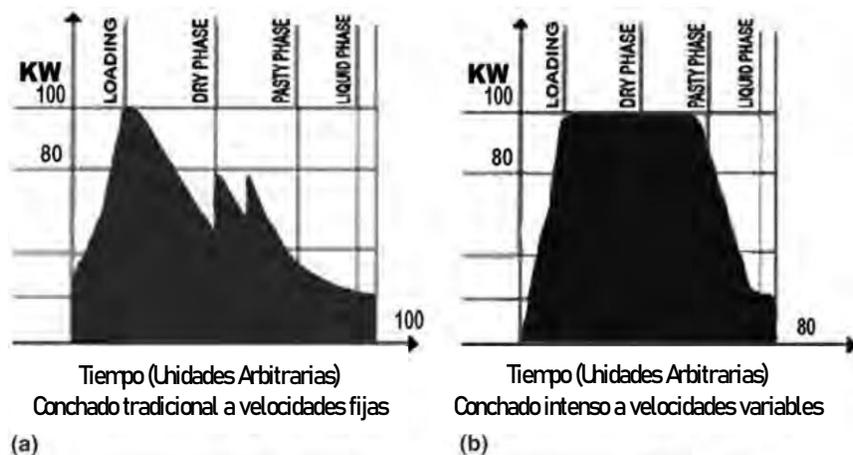


Figura 5.16. Amperaje típico de la concha durante las tres etapas de conchado: (a) Dos velocidades con funcionamiento en sentido inverso. (b) Velocidad de ajuste continuo.

La forma en que se controlan los elementos de mezcla también afectará la viscosidad del chocolate líquido final. Tradicionalmente, los brazos de mezcla tenían una o dos velocidades, y podían invertirse una vez que el chocolate se volviera delgado para que el extremo de la cuña cortara el líquido. Si la potencia utilizada por la concha se registra en función del tiempo, se obtiene una curva irregular similar a la que se ilustra en la figura 5.16a. Por lo tanto, durante períodos prolongados, el conchado consume muy poca energía y, por lo tanto, tiene muy poco efecto de mezcla. Ahora es posible controlar electrónicamente el proceso de modo que cuando la energía baja, la velocidad aumenta para volver a subirla. Esto significa que se registra una curva de potencia como la que se muestra en la Figura 5.16b. Este tipo de control permite producir un chocolate más fino en menos tiempo que cuando se utilizaba el método tradicional.

Una vez producido el chocolate líquido, es necesario tener el chocolate en una forma en la que todavía sea líquido, pero que fraguará rápidamente en la forma cristalina correcta para dar el brillo correcto. Esto depende del tipo de grasa (Capítulo 6) y de la forma en que se enfría y precristaliza el chocolate.

6. Definición de reología y los conceptos reológicos relacionados a un flujo controlado.

6.1 Reología:

La reología (palabra introducida por Eugene Bingham en 1929) es la rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia.

Una definición más moderna expresa que la reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales. Dichas ecuaciones son en general de carácter tensorial⁴.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo cortante y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal)
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal

Las funciones materiales y relaciones constitutivas tienen varios usos en la práctica, dependiendo del objetivo del estudio de cada tipo de material. En tal sentido pueden distinguirse dos objetivos principales:

1. Predecir el comportamiento macroscópico del fluido bajo condiciones de proceso para lo cual se hace uso de las relaciones constitutivas y de las funciones materiales.
2. Estudiar de manera indirecta la microestructura del fluido y evaluar el efecto de varios factores sobre dicha microestructura. Para esto se comparan las funciones materiales o propiedades reológicas.

6.2 Fluido:

Como fluido se entiende toda porción de materia capaz de deformarse continuamente cuando es sujeta a una fuerza o deformación, a diferencia de los sólidos, los cuales o no se deforman o sólo se deforman hasta cierto punto. Son fluidos todos los líquidos, los gases y otros fluidos de composición más compleja tales como las emulsiones y suspensiones, las pastas y los polímeros fundidos, entre otros. El chicle, la masilla, la masa de pan pudieran también clasificarse como fluidos, aunque algunos pudieran argumentar que son sólidos deformables.

En realidad, la clasificación de fluido o sólido deformable no es muy nítida en muchos casos; frecuentemente sólo puede hablarse del grado en que un fluido se acerca a uno u otro tipo de comportamiento.¹⁰

6.3 El tensor de esfuerzos:

La forma de producir el movimiento y deformación de un material es por medio de la aplicación de fuerzas sobre la superficie del mismo.⁴

6.4 Deformación y tasa de deformación:

El grado de deformación de un material se expresa usualmente como un cociente entre la longitud deformada sobre la longitud sin deformar. A este término se le denomina la deformación relativa γ y puede cuantificarse según el tipo de experimento que se haga.⁴

7. Técnicas más frecuentes en investigación y control de calidad para determinar el comportamiento viscométrico-reológico del chocolate fundido.

En la industria chocolatera se aplica una gran variedad de técnicas analíticas. Siendo algunas de las más utilizadas y necesarias para controlar factores como el tamaño de las partículas, la humedad, el contenido de grasa, la viscosidad, el sabor, la textura y la cristalización. El objetivo es dar una idea de la ciencia que hay detrás de las técnicas en sí mismas, más que describir un instrumento.

7.1 Medición del tamaño de partículas¹

Tanto el tamaño de las partículas más grandes como la superficie total (específica) son importantes para los fabricantes de chocolate. Instrumentos como los micrómetros y los microscopios ópticos pueden medir el diámetro de las partículas más grandes, mientras que el tamizado proporciona el peso del material sólido a partir de un determinado tamaño. Sin embargo, ninguno de ellos puede registrar la superficie de las partículas más pequeñas. Los microscopios ópticos pueden medir partículas de hasta 5 micras, pero, por debajo de este nivel, la difracción de la luz hace que las lecturas sean muy inciertas. (La difracción es la curvatura de un movimiento de onda alrededor del borde de un obstáculo). Para medir las partículas

más pequeñas pueden utilizarse dos tipos de instrumentos, basados en la conductividad eléctrica y en la dispersión de la luz láser, respectivamente.

Ambos métodos se basan en la dispersión del material sólido no graso en un líquido antes de realizar la medición, con el fin de separar las partículas individuales. En el chocolate, estas partículas están tan apretadas que, de otro modo, estos sistemas no podrían diferenciar las distintas partículas. Por supuesto, el líquido de dispersión no debe afectar a las propias partículas. Esto significa que no debe contener agua, que de otro modo disolvería el azúcar. A menudo se utiliza aceite o un disolvente orgánico. Se colocan algunos gramos de chocolate en el líquido dispersante. Para separar las partículas, se requiere alguna forma de mezcla vigorosa, pero ésta tampoco debe ser tan vigorosa como para romper las partículas. La colocación de la mezcla en un baño de ultrasonidos de baja potencia suele dispersar las partículas de forma satisfactoria.

7.1.1 Medición del tamaño de partículas: Sistema basado en la conductividad eléctrica¹

El sistema eléctrico funciona haciendo pasar esta dispersión a través de un tubo estrecho con electrodos en el lateral. La conductividad eléctrica será diferente cuando haya una partícula presente que si sólo hay el líquido en el tubo. Además, esta conductividad dependerá del volumen de la partícula y de la conductividad eléctrica. Si se supone que el azúcar, el cacao y los sólidos de la leche tienen conductividades eléctricas similares, pasando las partículas individualmente a través de los electrodos, es posible obtener una distribución de volumen.

El tratamiento matemático supone que todas las partículas son esféricas, para obtener un diámetro equivalente. Esto no es exacto, pero las mediciones obtenidas son lo suficientemente precisas como para ser muy útiles para el chocolatero. Sin embargo, dado que la distribución del tamaño de las partículas varía desde la submicra hasta unas 70 micras, y que la sensibilidad del electrodo depende del

diámetro del tubo, a menudo es necesario realizar las mediciones con al menos dos tamaños de tubo. Esto hace que el procedimiento sea relativamente lento, y en gran medida este tipo de instrumentos ha sido sustituido por los basados en la dispersión de luz láser.

7.1.2 Medición del tamaño de partículas: Sistema basado en la dispersión de la luz laser¹

La preparación de la muestra es la misma que la descrita anteriormente. Esta vez, la dispersión se hace circular a través de una célula de muestra, a la que se dirige un rayo láser (véase la figura 7.1). El rayo láser se expande hasta alcanzar un diámetro de entre 5 y 20 mm y, a continuación, se hace brillar a través de la suspensión. En este instrumento no se intenta medir las partículas individuales, sino sólo el patrón de dispersión de todas las partículas dispersas dentro del haz. Este patrón permanece estable aunque todas las partículas del haz estén en movimiento. Sin embargo, las partículas individuales difractan la luz. Cuanto más pequeña sea la abertura o la partícula en comparación con la longitud de onda de la luz (para un láser de neón de helio es de 0,63 micras), más se difractará. Una combinación de todos los diferentes patrones de dispersión es entonces visualizada por una lente y monitoreada por un conjunto de fotodiodos.

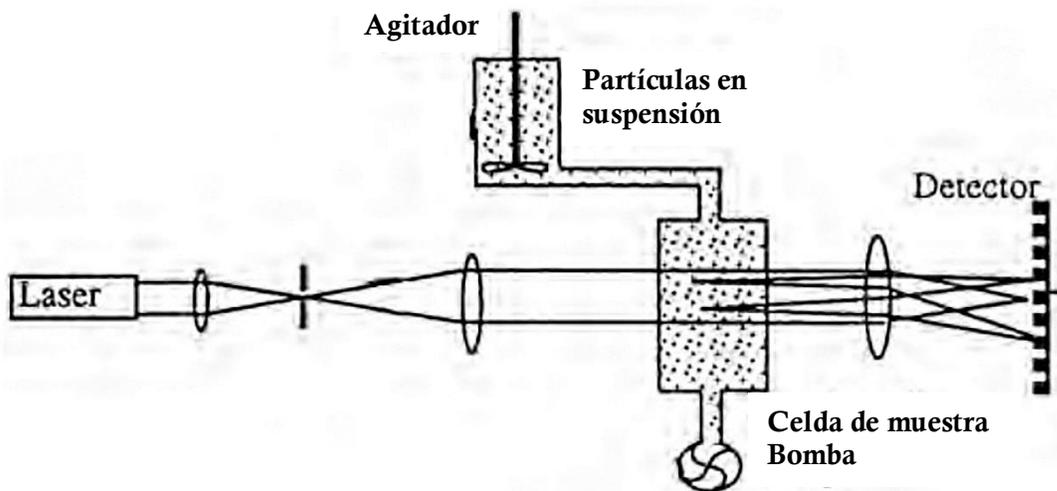


Figura 7.1. Diagrama esquemático de un instrumento de medición de la distribución del tamaño de las partículas basado en la dispersión de la luz láser.

Cambiando la distancia focal de esta lente, se pueden monitorear diferentes rangos de tamaño de partícula. Los instrumentos típicos miden de 0,5 micras a 90 micras con una lente, pero si se está supervisando chocolate parcialmente fabricado, por ejemplo, de una refinadora de dos rodillos, la distancia focal puede aumentarse para cambiar esto a, por ejemplo, 1 micra a 175 micras.

7.2 Determinación de la humedad¹

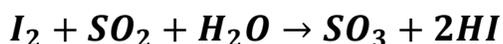
El chocolate contiene aproximadamente un 30% de grasa, pero sólo un 1% de humedad. Aunque la humedad puede migrar a través del chocolate, es un proceso muy lento, por lo que eliminar la humedad de los trozos grandes llevaría mucho tiempo. Por tanto, para medir la humedad, se puede dispersar el chocolate en otro medio antes del secado, o determinar el agua mediante una reacción química que determine la presencia de la molécula de H₂O.

Tradicionalmente, la humedad se determina mezclando una cantidad conocida de chocolate con arena presecada en un pequeño plato de metal, que luego se pesa. A continuación, se calientan los platos en un horno durante un tiempo y una temperatura determinada. Puede ser a 98 °C durante 12 horas o a una temperatura más baja durante menos tiempo, pero al vacío, antes de sacar las cápsulas y volver a pesarlas. Muchos laboratorios tienen sus propios procedimientos estándar, que normalmente son reproducibles dentro de ese laboratorio. Aunque la pérdida de peso no da un valor absoluto de humedad, ya que no necesariamente se elimina toda la humedad y puede haber una cantidad significativa de otros materiales volátiles, sí da una buena indicación de la humedad "libre" dentro del chocolate. Es esta humedad "libre" la que tiene un gran efecto en las propiedades de fluidez del chocolate.

Un método alternativo utiliza la reacción de Karl Fischer para determinar la humedad "libre" y "ligada" dentro del chocolate. Es decir, la humedad que se elimina mediante el secado en horno junto con la que forma parte del agua de cristalización, por ejemplo, en el monohidrato de lactosa de la leche. Esta última no desempeña un papel importante en las propiedades de fluidez del chocolate, por lo que no es

necesario medirla. Por lo tanto, esta técnica produce normalmente una medición más alta para el chocolate con leche que el secado en horno, pero tiene la ventaja de ser normalmente más reproducible cuando se utilizan sistemas de valoración automáticos.

La reacción de Karl Fischer depende de la acción del dióxido de azufre dióxido de azufre, yodo y agua.



Esta reacción tiene lugar muy fácilmente en un disolvente compuesto por metanol y piridina, según la siguiente ecuación.



Esto puede tener lugar en disolventes distintos del metanol, pero la piridina debe estar siempre presente. La reacción global significa que una molécula de agua reacciona con una molécula de yodo.

En el sistema automático se dispersa una cantidad prepesada de chocolate en una mezcla de formamida, cloroformo y metanol en el recipiente de reacción. Este recipiente se sella para evitar que entre más humedad del aire circundante. A continuación, la mezcla se controla continuamente mediante dos electrodos de platino colocados en ella. Si hay yodo libre, éste despolariza el cátodo y la corriente deja de fluir. Por lo tanto, la diferencia de potencial entre los electrodos se utiliza para controlar la valoración. Inicialmente, el reactivo de Karl Fischer (que incluye piridina) se añade lentamente a través de una bomba peristáltica, que es capaz de registrar con precisión la cantidad que pasa por ella. Cuando la reacción se completa y no queda humedad, la corriente deja de fluir. El instrumento puede entonces calcular el porcentaje de agua presente, basándose en el peso de la muestra y la cantidad de reactivo utilizado.

7.3 Medición del contenido de grasa¹

Los dispositivos que se basan en la reflexión de la radiación infrarroja cercana en la superficie del chocolate pueden dar lecturas inmediatas sobre su contenido de grasa y humedad. Sin embargo, esta radiación se ve afectada por otros factores, como el tamaño de las partículas y la composición del chocolate, lo que obliga a recalibrar los instrumentos para cada producto. La calibración de la grasa puede realizarse mediante el método tradicional soxhlet para determinar su contenido con precisión. El método soxhlet consiste en utilizar un disolvente para disolver la grasa del chocolate. A continuación, el disolvente se evapora y deja la grasa, que puede pesarse. Este análisis puede llevarse a cabo en un sistema de vidrio, como el que se ilustra en la Figura 7.2.

Una cantidad pesada de chocolate se divide finamente en pequeños trozos antes de envolverla en un papel de filtro, que se introduce en un recipiente de dedal permeable. Éste se coloca en la parte central del sistema de extracción, cuya parte superior está refrigerada por una camisa de agua. El disolvente, normalmente éter de petróleo, se vierte en el matraz inferior, donde se calienta mediante un manto eléctrico. Al hervir, el vapor de éter sube por el brazo lateral y se condensa en la sección central. Aquí baja al recipiente central, donde entra en contacto con el chocolate y disuelve la grasa. La solución que contiene la grasa pasa por el papel de filtro y el dedal y se acumula en el recipiente hasta alcanzar el nivel A, que corresponde a la parte superior del sistema de sifón. A continuación, puede volver a pasar al matraz inferior. La materia sólida del chocolate queda retenida en el papel de filtro y la grasa se acumula en el interior del matraz del fondo, donde el manto está lo suficientemente caliente como para hervir el éter, pero no la grasa.

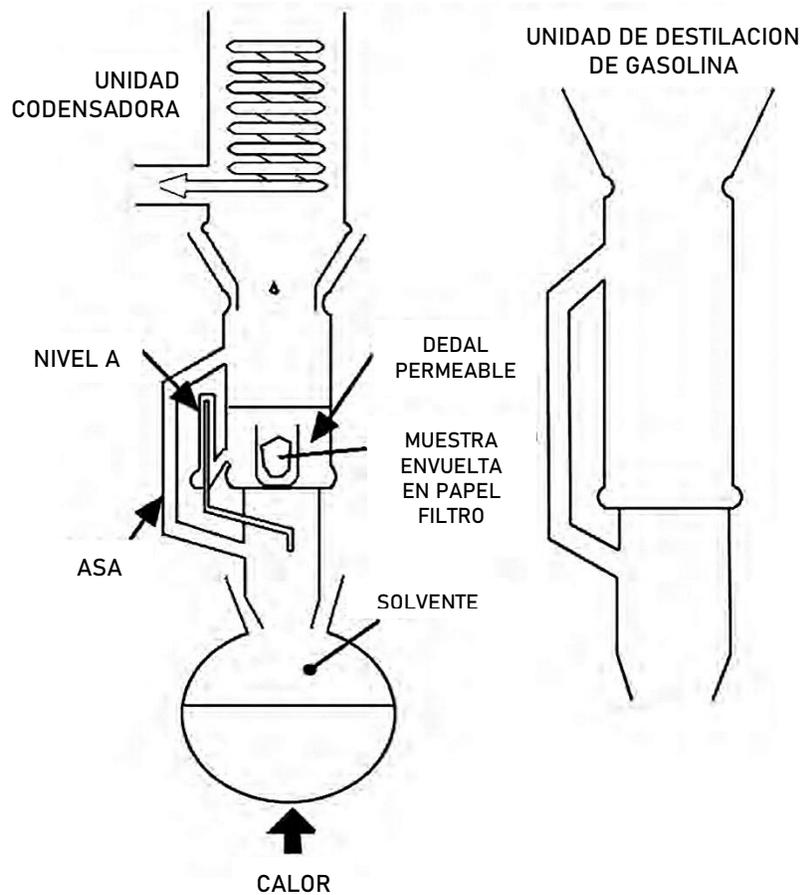


Figura 7.2. Diagrama del aparato de extracción de grasa Soxhlet.

Una vez que se ha eliminado toda la grasa del chocolate, normalmente después de unas 12 horas, se separan las secciones superiores del matraz. En la parte superior se coloca una nueva sección, la unidad de destilación de petróleo, que recogerá todo el éter de petróleo y no lo dejará gotear. Así, la grasa queda en el fondo del matraz y puede pesarse. Todo el procedimiento debe realizarse dentro de una vitrina de gases, teniendo mucho cuidado de que las conexiones eléctricas y otros objetos presentes no puedan producir chispas y provoquen una explosión.

7.4.1 Determinación de la viscosidad: técnicas simples de fábrica²

Se demostró que el chocolate líquido es un fluido no newtoniano, por lo que su viscosidad no se puede describir con un solo número. En una forma simplificada, puede describirse como que tiene una viscosidad plástica y un valor de rendimiento. Existen instrumentos simples que darán mediciones de un solo punto, dos de los

cuales son los viscosímetros de caída de bola y copa de flujo, que se muestran en la Figura 7.3



Figura 7.3. Viscosímetros de caída de bola y copa de flujo.

En el viscosímetro de caída de bolas hay un peso redondo sujeto a un alambre o varilla. En este último hay dos marcas. La bola se deja caer en un recipiente de chocolate líquido, normalmente controlado a 40°C. El control preciso de la temperatura es muy importante ya que una pequeña diferencia de temperatura tiene un gran efecto en las propiedades de flujo del chocolate. Se anota el tiempo para que la distancia entre las dos marcas se cubra de chocolate y se relaciona con la viscosidad. Normalmente esta medición se realiza varias veces, pero se descarta la primera lectura. Si se usa una bola más grande, caerá más rápido, por lo que se pueden obtener una serie de medidas usando varios tamaños diferentes, y se produce una curva de flujo relacionada con ese chocolate. Sin embargo, la velocidad de caída es relativamente lenta para la mayoría de los chocolates y las lecturas tienden a relacionarse con el valor de rendimiento más que con la viscosidad plástica.

En el viscosímetro de taza de flujo, por otro lado, el chocolate se mueve mucho más rápido. Aquí, el chocolate y la taza se calientan a la temperatura de medición (generalmente 40 ° C). La taza se sostiene por encima de una balanza sobre la que

se coloca el recipiente receptor. Se levanta el tapón y se registra el tiempo para que una cantidad determinada de chocolate llegue a este recipiente. Cuanto más fino sea el chocolate, más rápido fluirá y más corto será este tiempo.

7.4.2 Determinación de la viscosidad: el método estándar²

Para medir la viscosidad en un amplio rango de velocidades de cizallamiento (grados de flujo o mezcla) se utiliza un viscosímetro de cilindro concéntrico. Consiste en una copa que contiene el chocolate y un cilindro central. Este cilindro normalmente tiene un fondo puntiagudo o tiene un hueco debajo, que está lleno de aire cuando se usa el viscosímetro (ver Figura 7.4).

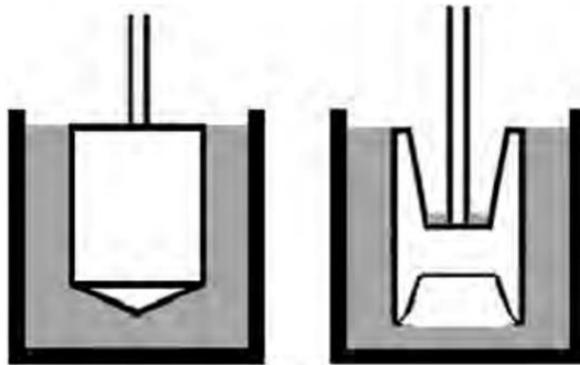


Figura 7.4. Dos tipos diferentes de viscosímetro con cilindro que se utilizan para medir la viscosidad del chocolate.

La razón de esto es que cuando la sacudida o la taza gira, el chocolate intentará evitar que lo haga, con dos áreas paralelas separadas por una distancia fija, moviéndose a diferentes velocidades. La viscosidad está directamente relacionada con la fuerza que el líquido desarrolla para detener este movimiento. En la base la velocidad no es uniforme, siendo cero en el centro y máxima en el borde. Esto dificulta el cálculo de la viscosidad. Por lo tanto, estos dos diseños (Figura 6.5) se han desarrollado de modo que casi toda la fuerza relacionada provenga del área paralela entre los lados de la bobina y la copa, y casi ninguna de la base. También es importante que el chocolate se trate uniformemente dentro del espacio. Si el espacio es amplio y la sacudida gira, solo el chocolate cerca de la sacudida se verá afectado.

El chocolate cerca de la pared de la taza puede incluso permanecer estacionario (ver Figura 7.5). Para empeorar las cosas, la viscosidad del chocolate varía según la rapidez con que se mueva. Esto significa que incluso en un espacio relativamente estrecho entre la bobina y la copa puede haber un rango de viscosidades a través de él.



Figura 7.5. Flujo entre la copa y la mecha del viscosímetro de cilindro concéntrico.

Para obtener un flujo uniforme a través del espacio, debe ser estrecho y, por lo general, la relación entre la bobina y el diámetro de la copa debe ser $> 0,85$.

El chocolate debe estar libre de cristales de grasa antes de tomar la medida. Para garantizar esto, el chocolate se calienta a 50°C y luego se vuelve a enfriar a poco más de 40°C antes de verterlo en la taza precalentada. Luego, se coloca el cilindro y se gira lentamente para que el chocolate alcance una temperatura uniforme. A continuación, se aumenta la velocidad de rotación y se toman lecturas de la fuerza de retardo a intervalos. También se anota la velocidad de rotación y se puede convertir en una tasa de cizallamiento (tasa de cizallamiento = velocidad relativa / distancia entre la bobina y la copa). El viscosímetro se mantiene a la velocidad máxima de agitación durante un período corto y luego se toman lecturas en los mismos puntos a medida que se reduce la velocidad.

En algunos viscosímetros gira la copa en lugar de la bobina, y se mide la fuerza sobre la bobina. En otros, se aplica una fuerza específica al cilindro y se mide su velocidad de rotación. Para todos estos, la viscosidad aparente se puede calcular a partir de:

$$\text{viscosidad aparente } (\eta) = \frac{\text{esfuerzo cortante } (\tau)}{\text{velocidad de corte } (D)} \quad (6.1)$$

Unidades

Viscosidad (η) [=] Pa*s

Esfuerzo cortante (τ) [=] Pa

Velocidad de corte (D) [=] s⁻¹

El esfuerzo cortante o la viscosidad aparente se pueden graficar contra la velocidad de corte (Figura 7.6). Usando modelos matemáticos, p. Ej. En el modelo de Casson, estos gráficos se pueden extrapolar para estimar cuál habría sido la tensión justo cuando el chocolate comenzó a moverse, es decir, cuánta fuerza se requeriría para que se moviera, que es el valor de rendimiento.

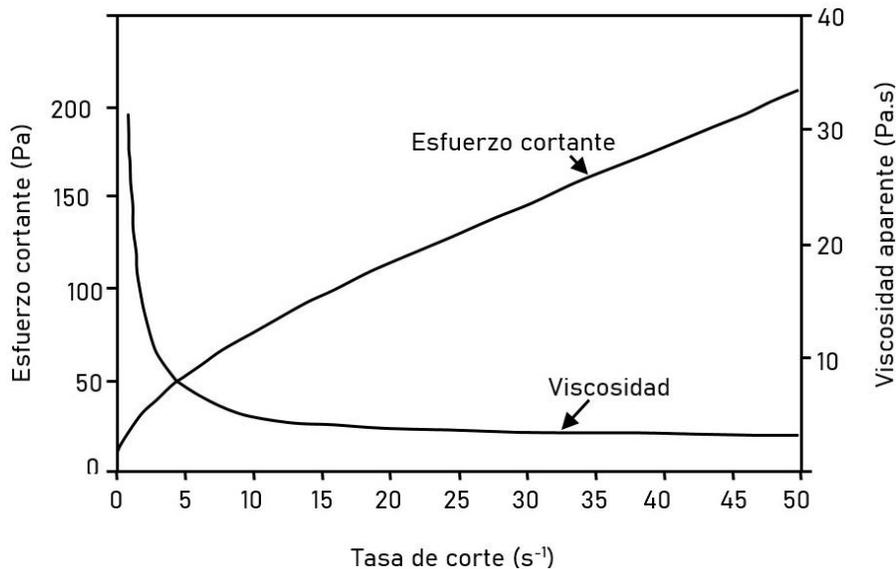


Figura 7.6. Cambio en el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente con la velocidad de corte medida para un chocolate con leche.

La viscosidad aparente a velocidades de cizallamiento más altas también se corresponde estrechamente con la viscosidad plástica. Para obtener resultados reproducibles, se debe tener mucho cuidado con la preparación de la muestra, el control de la temperatura y asegurarse de que el viscosímetro esté correctamente calibrado.

7.4.3 Determinación de la viscosidad: método actual por Resonador Torsional

Los viscosímetros de laboratorio existentes son de poco valor en los entornos de proceso porque la viscosidad se ve directamente afectada por la temperatura, la velocidad de corte y otras variables que son muy diferentes fuera de línea de lo que están en línea. Tradicionalmente, los operadores han medido la viscosidad de un sistema completamente formulado utilizando la copa de eflujo o los viscosímetros rotacionales. El procedimiento es complicado y requiere mucho tiempo, especialmente si la solución necesita ser filtrada primero. Es bastante inexacto, inconsistente y no repetible incluso con un operador experimentado.²²

Algunas compañías utilizan sistemas de gestión térmica para mantener el punto de aplicación a una temperatura óptima determinada para lograr una viscosidad constante. Pero la temperatura no es el único factor que afecta la viscosidad. La velocidad de corte, las condiciones de flujo, la presión y otras variables, incluida la variabilidad de la materia prima, pueden afectar la viscosidad del proceso. Los sistemas de temperatura controlada también tienen un alto consumo de energía, altos costos del sistema, largos tiempos de instalación y una gran huella física y ambiental.²²

La medición y el control automatizados de la viscosidad en línea son cruciales para controlar la viscosidad formulada del chocolate (productos intermedios y finales). **Rheonics®** ofrece las siguientes soluciones, basadas en un resonador torsional equilibrado, para el control y la optimización del proceso de fabricación:

1. En línea Viscosidad mediciones: Rheonics SRV es un dispositivo de medición de viscosidad en línea de amplio rango con medición de temperatura de fluido incorporada y es capaz de detectar cambios de viscosidad dentro de cualquier flujo de proceso en tiempo real.²⁰



Figura 7.7. Viscosímetro de proceso en línea de amplio rango SRV.

- Instrumento único para la medición simultánea de densidad de proceso (gravedad específica), viscosidad y temperatura
 - Factor de forma compacto para una instalación simple
 - Mediciones en tiempo real, estables, repetibles y reproducibles en fluidos newtonianos y no newtonianos
 - Mide la viscosidad cinemática y dinámica.
 - Construcción totalmente metálica (acero inoxidable 316L)
 - Completamente insensible a las condiciones de montaje.
 - Operacional a 500 bar y 300°C (7500 psi, 575°F)
 - Accesorios de proceso roscados, bridados y sanitarios
 - Fácil de limpiar, no necesita mantenimiento ni reconfiguraciones
 - Escale en múltiples ubicaciones / instalaciones sin reingeniería de aplicaciones
2. En línea Viscosidad y Densidad mediciones: Rheonics SRD es un instrumento de medición simultánea en línea de densidad y viscosidad con medición de temperatura de fluido incorporada. Si la medición de densidad es importante para sus operaciones, SRD es el mejor sensor para satisfacer sus necesidades, con capacidades operativas similares al SRV junto con mediciones precisas de densidad.²¹



Figura 7.8. Medidor de densidad de proceso en línea y viscosímetro SRD.

- Factor de forma compacto para una instalación simple
- Mediciones en tiempo real, estables, repetibles y reproducibles en fluidos newtonianos y no newtonianos
- Rastree el cambio de viscosidad en un amplio rango con un sensor
- Construcción totalmente metálica (acero inoxidable 316L)
- Completamente insensible a las condiciones de montaje.
- Medida de temperatura de fluido incorporada
- Operacional a 500 bar y 300°C (7500 psi, 575°F)
- Accesorios de proceso roscados, bridados y sanitarios
- Fácil de limpiar, no requiere mantenimiento ni reconfiguraciones para escalar en la fábrica

La medición de viscosidad en línea a través de SRV o un SRD elimina las variaciones en la toma de muestras y las técnicas de laboratorio que se utilizan para la medición de la viscosidad mediante los métodos tradicionales. El sensor está ubicado en línea para que mida continuamente la viscosidad del sistema formulado (y la densidad en caso de SRD). La consistencia se logra mediante la automatización del sistema de dosificación y mezcla a través de un controlador que utiliza mediciones continuas de viscosidad en tiempo real.

Rheonics SRV y SRD utilizan un resonador coaxial patentado único, en el que dos extremos de los sensores se retuercen en direcciones opuestas, cancelando los pares de reacción en su montaje y, por lo tanto, los hacen completamente insensibles a las condiciones de montaje y a los caudales de tinta. Estos sensores pueden hacer frente fácilmente a la reubicación regular. El elemento sensor se encuentra directamente en el fluido, sin necesidad de carcasa especial o jaula protectora.²²

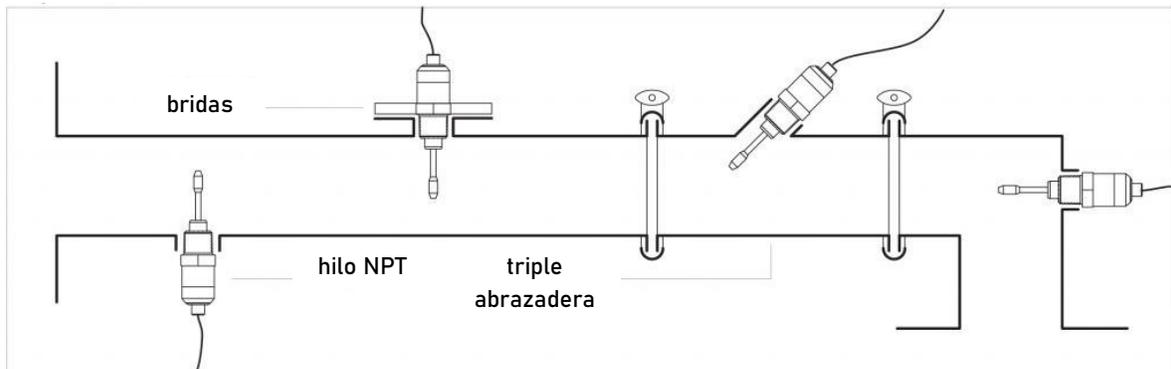


Figura 7.9. Una configuración posible de resonadores en un tubo.

El resonador vibra en el fluido; El fluido influye en las vibraciones del resonador. Al medir su efecto sobre el resonador, podemos determinar la densidad y la viscosidad del fluido. Los fluidos influyen en los resonadores reónicos de dos maneras:

Cuanto más denso es el líquido, menor es la frecuencia de resonancia. Un fluido más denso aumenta la carga de masa del resonador. Cuando más viscoso es el fluido, más amplio y pequeño es el pico resonante del sensor, la fricción entre el resonador y el fluido aumenta su amortiguación.²³

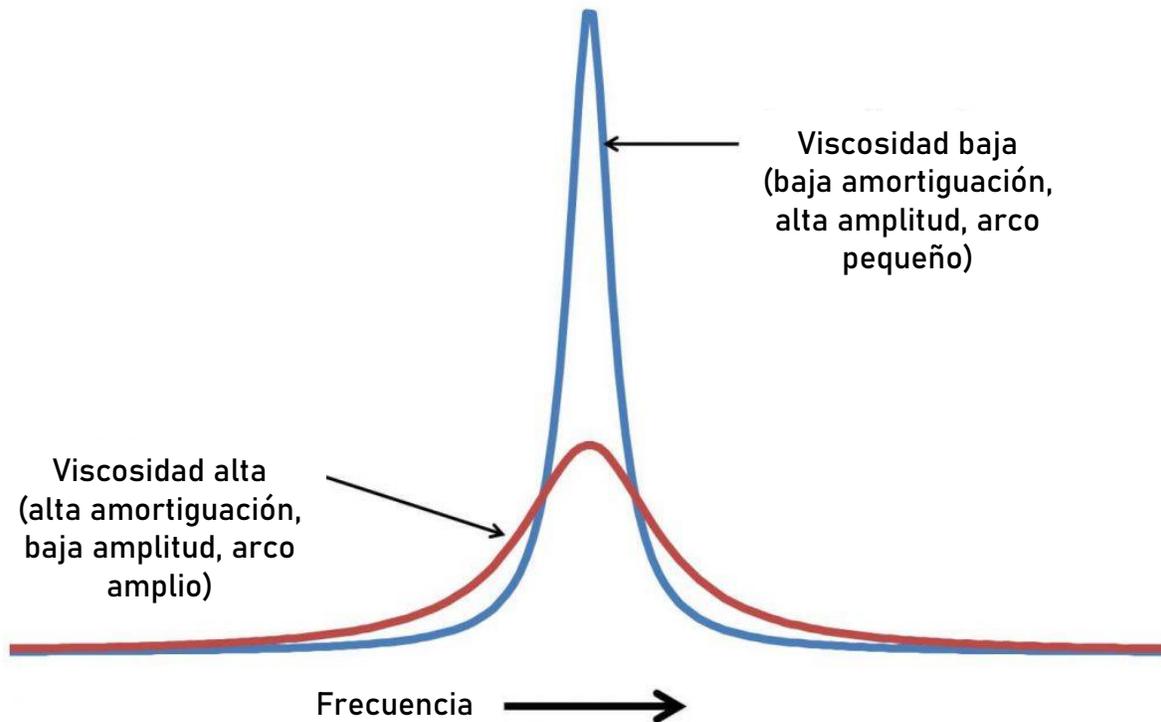


Figura 7.10. Imagen que representa las propiedades medibles del resonador influenciadas por las propiedades del fluido.

Las propiedades medibles del resonador (su frecuencia resonante y amortiguación) están influenciadas por las propiedades del fluido.

8. Modelos reológicos más frecuentemente empleados para describir el comportamiento al flujo del chocolate fundido.²

El chocolate es una suspensión densa de partículas sólidas, en promedio 60-70% de azúcar y sólidos de cacao no grasos y sólidos de leche (según el tipo) dispersos en una fase continua grasa, principalmente de manteca de cacao. Durante la fabricación, el refinado y el conchado determinan el tamaño de partícula y la consistencia y viscosidad de la suspensión para producir cualidades sensoriales y de textura específicas.

Reológicamente, los chocolates fundidos se comportan como líquidos no newtonianos con límite elástico (cantidad mínima de energía para iniciar el flujo de fluido) y viscosidad plástica (energía para mantener el fluido en movimiento),

dependiendo del procesamiento. La calidad de los chocolates acabados depende en gran medida de la distribución inherente del tamaño de las partículas sólidas del azúcar, la leche y el cacao, la composición de la fase grasa y los emulsionantes.

Las propiedades reológicas determinan la eficiencia de la mezcla, el bombeo y el transporte de los productos terminados durante el procesamiento. El control de la reología del chocolate es importante para la calidad y el control exacto del peso durante los procesos de revestimiento, fabricación de cáscaras y moldeado. Los parámetros de procesamiento como conchado, determinación del tamaño de partícula, contenido de grasa, emulsionantes (lecitina y polirricinoleato de poliglicerol, PGPR), temple, vibraciones y temperatura, todos influyen en las propiedades reológicas y el costo de producción.

De las técnicas para caracterizar propiedades reológicas, el ICA (Asociación Internacional de Confitería por sus siglas en inglés) sugiere el uso de viscosímetros rotacionales con cilindros concéntricos (geometría del cilindro y la copa) y la ecuación de Casson, con medición de tensión y viscosidad a velocidades de cizallamiento entre 2 y 50 s⁻¹ utilizando curvas ascendentes y descendentes, precedidas de un precizallamiento a 5 s⁻¹ de más de 5 minutos. Importantes son los modelos reológicos de Herschel-Bulkley, Casson y Bingham, siguiendo las ecuaciones⁸:

$$\mathbf{Herschel - Bulkley: } \tau = \tau_0 + \eta_{pl}(\dot{\gamma})^n \quad (7.1)$$

$$\mathbf{Casson: } \sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{CA}} + \sqrt{\eta_{CA}}\sqrt{\dot{\gamma}} \quad (7.2)$$

$$\mathbf{Bingham: } \tau = \tau_0 + \eta_{pl}\dot{\gamma} \quad (7.3)$$

Donde τ denota esfuerzo cortante; τ_0 , límite elástico; η_{pl} , viscosidad plástica; τ_{CA} , valor de rendimiento de Casson; η_{CA} , viscosidad plástica Casson; $\dot{\gamma}$, velocidad de corte; η , viscosidad de la suspensión; n , índice de viscosidad de flujo; Desde 1973, el ICA ha aceptado la medición reológica del chocolate fundido utilizando

viscosímetros rotacionales con cilindros concéntricos (geometría de cilindro y copa) y el cálculo de la ecuación de Casson de los parámetros².

9. Análisis de que un modelo reológico describa de manera más adecuada el comportamiento al flujo del chocolate.

El chocolate se comporta como un líquido no newtoniano que presenta un comportamiento plástico no ideal, donde se produce un adelgazamiento por cizallamiento una vez que se ha superado el valor de rendimiento. Esto es causado por el colapso de la estructura tridimensional del material y las partículas asimétricas, que se alinean en las líneas de corriente a medida que aumenta la velocidad de corte, provocando una disminución de la viscosidad hasta que se vuelve independiente de la velocidad de corte a velocidades de corte altas. El modelo Herschel – Bulkley y el modelo Casson se utilizan como modelos populares para adaptarse a un comportamiento plástico no ideal.

$$\textit{Herschel – Bulkley: } \tau = \tau_0 + \eta_{pl.}(\dot{\gamma})^n$$

$$\textit{Casson: } \sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{CA}} + \sqrt{\eta_{CA}}\sqrt{\dot{\gamma}}$$

El modelo de Casson fue adoptado en 1973 como la ecuación reológica estándar para el chocolate por la Oficina Internacional de Cacao, Chocolate y Confitería de Azúcar⁸.

Los resultados de un estudio entre laboratorios (Aeschlimann y Beckett, 2000), concluyó que el modelo matemático de Casson que emplea sólo un pequeño conjunto de parámetros tenía una precisión limitada ya que, a velocidades de cizallamiento más bajas, los datos reológicos no se ajustan bien la ecuación de Casson. El resultado fue un bajo grado de repetitividad en los análisis interlaboratorios, por lo que ICA recomendó el uso de datos de interpolación para la viscosidad del chocolate, señalando que esta estrategia era simple, precisa y

fácilmente aplicable a diferentes sistemas, dada una base de información relevante. Por lo tanto, en los 2000, ICA recomendó la medición de la tensión y la viscosidad a velocidades de cizallamiento entre 2 y 50 s⁻¹ usando curvas ascendentes y descendentes en la velocidad de cizalla, precedidas por un pre-cizallamiento a 5 s⁻¹ que dura 5 o más minutos, para así asegurar que los resultados experimentales pudieran adecuarse al modelo reológico de Casson aplicado al chocolate.

10. Caso de estudio (referencia monográfica).

Mediciones reológicas determinadas en un trabajo de liberación de servicio social:

“Caracterización viscométrica mediante reómetro rotacional Brookfield de formulaciones de cocoa/manteca de cacao/pasta de sésamo; García Garrido, Crystina, Universidad Nacional Autónoma de México. (2016).”¹⁸

10.1 Obtención de pasta de Cacao

10.1.1 Adquisición de materia prima

La materia prima utilizada en el trabajo experimental de la estancia son productos de origen mexicano que provienen de diferentes almacenes dentro de la Ciudad de México. La materia prima destinada a pruebas de selección y a la elaboración del chocolate, así como su marca y almacén de procedencia se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Adquisición de materia prima

Materia prima	Marca	Almacén
Semilla grande de cacao crudo	Chocolate Mayordomo	Chocolate Mayordomo de Oaxaca S. de R.L. de C.V.
Manteca de cacao	La Esperanza	Central Abarrotera La Alpina S.A. de C.V.
Cocoa comercial	Turín	Central Abarrotera La Alpina S.A. de C.V.
Pasta de ajonjolí	El Criollo	Molino La Rosaleda, S.A. de C.V.
Azúcar glass	Bremen	Bremen S.A. de C.V.
Lecitina de soya	A granel	Farmacia París S.A. de C.V.

10.1.2 Estableciendo criterio de tiempo y temperatura de tostado

Para establecer la temperatura y tiempo de tostado de las semillas de cacao se comparó la información de varias fuentes. En *The Science of Chocolate* (2008), el autor Stephen T. Becket menciona que generalmente la temperatura de tostado para las semillas de cacao se establece entre 110 a 140°C, "cuando el nivel de humedad ha sido reducido por debajo del 3%"⁵. En cuanto el tiempo, lo hace entre 45 minutos y 1 hora.

La Norma Oficial Mexicana *NOM-186-SSA1/SCFI-2002, Productos y servicios. Cacao, productos y derivados. I Cacao. II Chocolate. III Derivados. Especificaciones sanitarias. Denominación comercial*, dentro de las especificaciones sanitarias, señala que "El tostado debe realizarse a una temperatura que fluctúe entre 121 y 220 °C, con el fin de asegurar la eliminación de microorganismos patógenos" (Secretaría de Salud, 2002)²².

El estudio del *International Food Research Journal*, "Optimization of cocoa beans roasting process using Response Surface Methodology based on concentration of pyrazine and acrylamide" concluye que a una temperatura de 116 °C y 23 minutos de tostado, se produce una relación de máxima concentración de pirazina y mínima concentración de acrilamida en los granos de cacao de la plantación *Banyuwangi* de Indonesia. Las pirazinas son un "subproducto de la reacción de Maillard"¹³, reacción que ocurre durante el tostado, a las que se les considera generalmente "los principales componentes que indican la cantidad y calidad del sabor a cocoa (Misnawi and Teguh, 2010)"¹³. La acrilamida es también producida a través de la reacción de Maillard pero ha sido identificada como un carcinógeno para el ser humano según la *International Agency for Research on Cancer* (IARC, 2004). "De acuerdo a la *Food and Drug Administration* (FDA), el límite de seguridad de acrilamida en papas fritas para el consumo es de 0,077 ppm". "El límite de seguridad de acrilamida en productos de cocoa no ha sido determinada aún"¹³, pero se han encontrado concentraciones de hasta 909 µg/kg (FAO/WHO, 2005). En este estudio se observó que "la formación de acrilamida incrementaba con la temperatura y el

tiempo, hasta alcanzar cierto nivel y reducir gradualmente”¹³, en pruebas entre 110°C a 160° C y 15 a 40 minutos.

En el *Confectionery Products Handbook (Chocolate, Toffees, Chewing Gum and Sugar Free Confectionary)* (NPCS Board, 2013) puntualiza un rango generalizado de 110 a 220 °C, según el tipo de cacao. Asimismo, se menciona que las mezclas de aminoácidos con glucosa, presentes en el cacao, calentadas a 100° C, como leucina/glucosa, treonina/glucosa, y glutamina/glucosa, dan como resultado olores a “chocolate dulce” para la primera mezcla, y “chocolate” para las dos últimas. A 20 °C más, el olor de la mezcla de leucina y glucosa asemeja moderadamente a la “corteza de pan”. En cambio, la valina y la glucosa calentadas a 180°C o más, expiden un olor a “chocolate penetrante”. Como se observa, se trata un complejo sistema en el que un pequeño cambio en la temperatura puede cambiar su descripción.⁴

Tomando en cuenta la información mencionada, se definiría para el tostado una temperatura que primeramente cumpliera con la Norma Oficial Mexicana (arriba de los 121 °C) pero que no fuera demasiado alta, de manera que se obtuviera un chocolate de sabor no tan amargo y se conservaran valores bajos de pirazina. Se fijó una temperatura de **125 °C**, que es un promedio del rango que indica el autor Stephen T. Becket y también se encuentra dentro del rango del *Confectionery Products Handbook*.

Aún falta definir el tiempo de tostado, el cual debe ser suficiente para que la mayoría de los granos se puedan descascarillar manualmente fácilmente, pues no se cuenta con equipo para ello, y que se tuesten hasta el centro del grano, incluyendo grandes y pequeños tamaños de grano, lo que se notará también al cambiar su coloración rojiza marrón a una más oscura. La temperatura de tostado estaría en el rango de 23 a 60 minutos, según las referencias de la literatura. Este rango es aún muy amplio, por lo que se hicieron pruebas en el horno con pequeñas muestras de cacao para observar la evolución del mismo. El tostado se realizaría en el horno disponible en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química, mostrado en la figura 10.1.



Figura 10.1. Horno utilizado marca CAISA Alley y sus especificaciones (No. Inventario UNAM: 2178773)

Se hizo una **calibración de la temperatura del horno** para asegurar que funcionara correctamente. Para ello se utilizó un termómetro de mercurio (-20 a 150 °C) con división de 1° C, marca Lauka, que se introdujo en el horno con ayuda de unos guantes de carnaza y un trapo que cubría parte del antebrazo, hasta que la temperatura se estabilizó pasados 15 minutos. Se encontró que la temperatura difiere en 9 °C arriba de la indicada en el termostato del horno, así que se trabajó el termostato 9 °C abajo de la temperatura deseada, monitoreando la temperatura con el termómetro de mercurio durante la operación.



Figura 10.2. Calibración del horno

Para una temperatura de tostado de 125°C se fijó el termostato en 116 °C



Figura 10.3. Determinación de la T de tostado: muestra 1

Se trabajaron 3 muestras. La primera muestra (100 g de cacao a 125°C) se introdujo al horno sobre papel aluminio por 25 minutos. Al sacarlo del horno no se pudo descascarillar, por lo que se introdujo 10 minutos más. A los 35 minutos de calentamiento se facilitó un poco más remover las cascarillas de algunas semillas, pero sus centros aún presentaban coloraciones marrones rojizas, como observa ve en la figura 10.4.

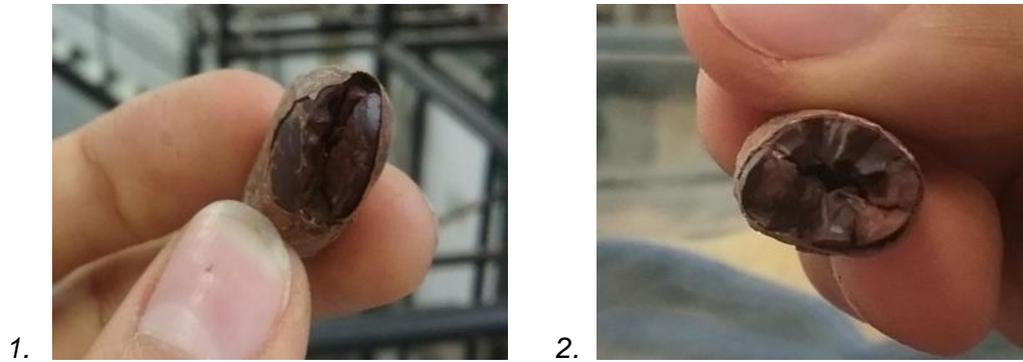


Figura 10.4. Muestra 1 después del tostado. 1. Tostado exterior de la semilla color café oscuro. 2. Aún se observan coloraciones marrones rojizas claras en el interior.

Se había cometido por error el no mover constantemente los granos de cacao durante el tostado para que éste fuera lo más uniforme posible, así que se procedió a realizar una siguiente muestra. La muestra 2 se trabajó en un refractario de aluminio, que hizo más fácil su movimiento con ayuda de una pala de madera. Se dejó en el horno por 35 minutos, moviendo los granos cada 2 a 3 minutos, tiempo al que aún se observó que era difícil descascarillar algunos granos, así que se esperó hasta los 45 minutos, en los que se pudo remover manualmente la cascarilla a la mitad de la muestra. Se introdujo el refractario 35 minutos más, es decir, en total 1 hora y 20 minutos de tostado. Este tiempo de tostado sobrepasó las referencias encontradas en la literatura. Por lo tanto, la aún presente dificultad de remoción de la cascarilla para la mitad de la muestra se asumió durante el descascarillado con el objetivo de aumentar la eficiencia y uniformidad de un tostado posterior, y como posible característica del haba.



Figura 10.5. Muestra 2

La muestra 3 se utilizó para registrar las observaciones en el proceso, el color, sabor, olor, y la facilidad de remoción de la cascarilla a través del tiempo para algunos granos seleccionados al azar durante el tostado y se registró en la siguiente tabla. El tostado antes de descascarillar se realizó en una charola de aluminio plana y ya descascarilladas las semillas, se continuó en el refractario de aluminio.

Tabla 2. Observaciones de la evolución del tostado en muestra 3

Tiempo de tostado (hr)	Observaciones
0.5	<ul style="list-style-type: none"> Las semillas se están tostando en una charola de aluminio plana. Se trató de remover la cascarilla pero no fue posible porque aún se encontraba muy adherida.
0.58	<ul style="list-style-type: none"> Se pudo remover la cascarilla de la mayoría de las semillas.
0.66	<ul style="list-style-type: none"> Se pudo remover la cascarilla de todas las semillas, sin embargo se recomienda hacerlo a los 45 minutos porque para algunas aún fue difícil su remoción. El sabor es suave (no muy amargo), un poco a fermentado y ácido. Las semillas continuarán su tostado sin cascarilla. Se recomienda entonces pasar las semillas de la charola de aluminio plana al refractario de aluminio alto para evitar que salten fuera las que hayan quedado como pequeños trozos.
0.83	<ul style="list-style-type: none"> Su amargor y acidez aumentó, el sabor a fermentado disminuyó.
0.91	<ul style="list-style-type: none"> El sabor, a pesar de que no se percibe un gran cambio, ligeramente se percibe más rico en matices, más tostado y agradable. La acidez sigue presente pero disminuyó ligeramente.
1.08	<ul style="list-style-type: none"> La acidez y el amargor aumentaron ligeramente. Huele fuertemente a chocolate.
1.25	<ul style="list-style-type: none"> El sabor a fermentado ya no se percibe. El sabor a acidez y amargor sigue presente y no es tan agradable pero ahora sabe y huele más a chocolate.
1.5	<ul style="list-style-type: none"> El sabor es más amargo y ácido y no es agradable.
1.75	<ul style="list-style-type: none"> El olor a chocolate ya no es tan penetrante. La acidez es alta. El sabor es tostado y no tan amargo como antes.
1.91	<ul style="list-style-type: none"> Parecen más dulces y menos ácidos, tostados, agradable. El color de las semillas es café oscuro, pero el olor a chocolate es cada vez menor.

Para la muestra 3 se aumentó el tiempo de espera para la remoción de las semillas con la pala de madera a 5 minutos, de manera que el aire caliente del interior del horno no escapara tan frecuentemente. Estas apreciaciones son subjetivas además de que se sabe que no todos los granos presentarían las mismas características en el transcurso del proceso, ya fuese por su diferencia de tamaño, características individuales u origen. Por otro lado, se había mencionado también, según el *Confectionery Products Handbook*, que se trata un complejo sistema en el que un pequeño cambio en la temperatura puede cambiar su descripción, lo que se deja ver en la tabla 3⁴. Sin embargo, terminando esta prueba se tiene una guía para tostar el resto del cacao que se utilizará para hacer finalmente la pasta de cacao, seleccionando una temperatura de **1hr y 15 minutos o cercana**.

10.1.3 Selección

Se seleccionó el cacao a tostar retirando manualmente las impurezas como 1. Cascarillas, 2. Pedazos de cacao sin cascarilla, 3. Hilos de costal, 4. Cacaos dañados enteros y 5. Cacaos abiertos y dañados abiertos. Los cacos dañados se identificaron con perforaciones, estructuras muy delgadas, secas, coloraciones pálidas y cascarillas fuertemente adheridas. En la figura 12 se observa la separación de las impurezas encontradas. La gran cantidad de cascarillas provenía también de las pruebas hechas anterior al tostado.



Figura 10.6. Impurezas en el cacao

10.1.4 Tostado

Equipo

- ✓ Horno
Marca CAISA Alley, modelo 860 P, serie 756103, especificaciones eléctricas: 220 V, 3 fases, 3.3 K.W.; 0.25 HP, 4969 D.G.E. (No. Inventario UNAM: 2178773).
- ✓ Balanza electrónica
Balanza electrónica portátil marca OHAUS, modelo SCOUT PRO SP401, especificaciones eléctricas: 12 Vca/0.5 A, clase de exactitud: media, máx. 400 g. mín.: 2 g, d= 0.1 g (Facultad de Química Conjunto E, No. Control económico: E216/09).
- ✓ Termómetro
Termómetro de mercurio (-20 a 150 °C) con división de 1° C, marca Lauka.

Material

- ✓ Trapo de cocina
- ✓ Guantes de carnaza
- ✓ Pala de madera
- ✓ 2 Charolas de aluminio planas
- ✓ Refractario de aluminio

Materia prima

- ✓ Semilla grande de cacao crudo marca Chocolate Mayordomo.

Procedimiento



Figura 10.7. Proceso del tostado del cacao

Se fijó el termostato del horno en 116 °C para alcanzar la temperatura deseada de 125 °C, según la calibración realizada anteriormente, y se introdujo también el termómetro para verificar la temperatura. Se precalentó a esta temperatura por 15 minutos.

Mientras tanto, el cacao se pesó por partes en la balanza pues ésta no aceptaba más de 400 g. En total se pesaron 647.9 g de cacao crudo y se distribuyeron en las 2 charolas de aluminio para que las superficies de todas las semillas, como en las condiciones de las pruebas, estuvieran directamente expuestas al calor del horno.

Después del precalentamiento se introdujeron al horno las charolas con las semillas durante 55 minutos, tiempo que se pensó que aseguraría un descascarillado relativamente sencillo. Para lograr un tostado más uniforme se removieron con una pala de madera cada 5 minutos. Como protección contra el calor se utilizaron guantes de carnaza en ambas manos y un trapo de cocina para cubrir el antebrazo de la mano que se introducía al horno durante la remoción de las semillas.

Se procedió al descascarillado. Teniendo las semillas sin cascarilla, se colocaron en el refractario de aluminio y se trozaron éstas manualmente en pedazos pequeños para que el calor alcanzara cualquier parte interna que aún faltase por tostar. Se continuó su tostado por 20 minutos más removiendo cada 5 minutos, hasta alcanzar el total de 1 hora y 15 minutos de tostado. A esta temperatura se espera que su aroma sea penetrante a chocolate, que su acidez y amargura sean altas pero no las máximas, las cuales disminuirán con los procesos posteriores, como el conchado y la mezcla con otros ingredientes.

10.1.5 Descascarillado

Equipo

- ✓ Mortero de porcelana con pistilo
Vintage Rosenthal porcelana blanca / ATW Alemania 181/125

Materiales

- ✓ Bolsa plástica
- ✓ Papel aluminio

Materia prima

- ✓ Cacao pre-tostado por 55 minutos

Procedimiento



Figura 10.8. Descascarillado

Después de haber tostado las semillas de cacao por 55 minutos (pre-tostado) se procedió a descascarillar manualmente, pues no se cuenta con equipo para ello. Como ya se había mencionado, la mitad de las semillas aún presentaron dificultad de remoción de la cascarilla, así que se utilizó un mortero de porcelana con pistilo para golpearlas ligeramente y así remover la cascarilla. Finalmente, el cacao descascarillado se trozó para su tostado final con ayuda también del mortero.

Del cacao pre-tostado, se decidió desechar algunos granos con alta contaminación interna por plagas o alta dificultad de remoción de cascarilla.

En la tabla 4 se reporta el porcentaje de cascarilla encontrada en las habas, su humedad anterior y posterior al pre-tostado, el porcentaje de cacao desechado y la masa de cacao lista para la molienda.

Según el autor Beckett, S. (*Science of Chocolate*, 2008), la humedad posterior al tostado debe estar debajo del 3% para evitar que la pasta de cacao sea muy espesa⁵. Se asume que el porcentaje de humedad del cacao tostado es menor al 3% ya que éste porcentaje lo presenta apenas en el pre-tostado.

Tabla 4. Haba de cacao Chocolate Mayordomo fermentado destinado a proceso de tostado y molienda

Parámetro	Valor experimental	Método	Valor establecido por la Norma ²⁰
Cacao sin tostar: 647.9 g			
Humedad (% m/m)	5.61 %	Termobalanza*	7.5 % máx.
Cascarilla (% m/m)	12.5 %	Separación manual y pesado en balanza digital	-
Cacao pre-tostado (55 min), destinado a descascarillado: 629.1 g			
Cacao desechado (% m/m)	2.3 %	Selección manual y pesado en balanza digital	-
Humedad (% m/m)	3.0 %	Cálculo por diferencia en peso	-
Cacao tostado final (1 hr 15 min) y descascarillado, destinado a molienda: 534.8 g			

*Especificaciones del equipo:

- Termobalanza (*Moisture Analyzer*) OHAUS modelo MB45. Máx 45 g, d = 0.001 g. (Inventario UNAM: 268469).

Antes del tostado, se verificó que el cacao utilizado tuviera una humedad que entrara dentro del límite de humedad requerida por la norma mexicana NMX-F-352-S-1980 “Cacao en grano fermentado” destinado para la elaboración de productos alimenticios, el cual cumplió positivamente con este parámetro como se observa en la tabla, estando 1.89 puntos porcentuales debajo de la máxima.

10.1.6 Molturación de la haba o molienda

Equipo

- ✓ Máquina trituradora o molino de cuchillas
 Marca FitzMill Trade Mark, Modelo D, W.J. Fitzpatrick Company Chicago USA. Código V44D6. (No. Inventario 202070060).

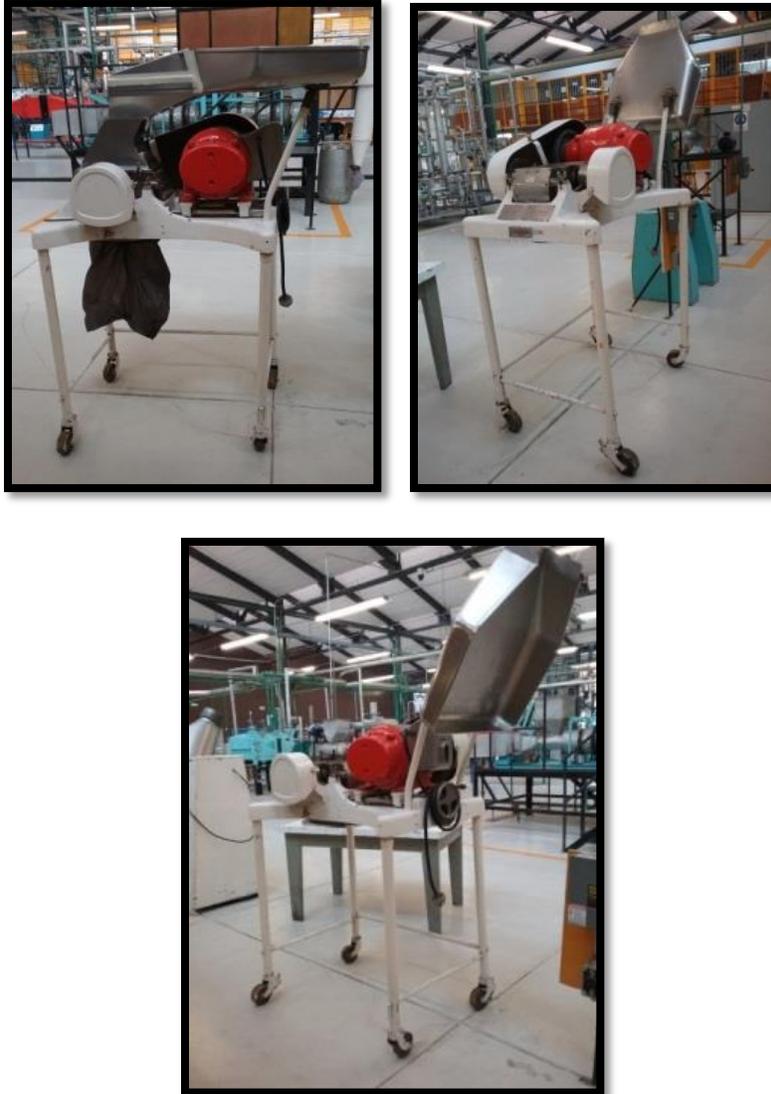


Figura 10.9. Molino de cuchillas

Materiales

- ✓ Bolsa de plástico
- ✓ Cinta adhesiva
- ✓ Lápiz
- ✓ Pala de madera
- ✓ Refractario de aluminio
- ✓ Jabón
- ✓ Esponja

Materia prima

- ✓ Cacao descascarillado y tostado

Procedimiento



Figura 10.10. Preparación para la molturación

Anterior a la molturación, se procedió a limpiar con agua y jabón la máquina trituradora y sus accesorios, que se muestran en la primera fotografía de la figura 16 (izq. a der.: tapa, garganta de alimentación y tamiz). Asimismo se fijó con cinta adhesiva una bolsa de retención para la pasta de cacao producto de la molienda (segunda fotografía) y se colocó cinta adhesiva en las uniones de la tapa para evitar el escape de partículas de cacao (tercera fotografía).

La molienda se realizó entre 20 a 25 minutos para los 534.8 g de cacao tostado, descascarillado y trozado. Hubo algunas pérdidas de pasta en el interior de la máquina o en el ambiente y de algunos trozos de cacao por el moviente mecánico de la propia máquina, sin embargo fueron mínimas debido a que se realizó una cuidadosa limpieza de los restos encontrados en el molino, obteniendo como resultado un rendimiento de 96.5% de cacao posterior a la molienda (ver tabla 5).

Tabla 4. Rendimiento tras la molienda

Grano tostado y descascarillado (g)	534.8 g
Pasta de cacao ó Licor de cacao (g)	516 g
Rendimiento (% m/m)	96.5 %

10.2. Caracterización de la pasta de cacao

Tabla 5. Valoración de la calidad de los insumos: Pasta de Cacao o Licor de Cacao.

Parámetro	Valor experimental	Método	Valor establecido por la Norma¹¹
Humedad (% m/m)	3.3 %	Termobalanza	-
Contenido graso (% m/m)	50 %	Extracción por lotes con hexano	47-60%
Tamaño de partícula promedio (µm)	232.612 µm	Microscopía óptica*	-
Tamaño de partícula promedio (reducido)	180.521 µm	Microscopía óptica*	-
Punto de fusión de manteca**	30-31	Uso de Fisher-Johns	31-35 °C

**Especificaciones del equipo:*

- Microscopio óptico marca Olympus modelo BX51 (Inventario UNAM: 02298467)

****** Obtención por eliminación del solvente empleado en la extracción

El contenido graso (manteca de cacao) medido experimentalmente para el licor de cacao es de 50% y se encuentra dentro del valor establecido por la “Norma para el cacao en pasta (licor de cacao/chocolate) y torta de cacao CODEX STAN 141-1983”.

La caracterización de la pasta de cacao no fue posible realizarla inmediatamente después de la molturación, debido a las restricciones de tiempo en el uso del laboratorio, por lo que la ideal humedad del cacao tostado menor al 3% aumentó a un 3.3% debido a las condiciones ambientales. Esto variaría la consistencia aumentando su densidad, sin embargo no se especifica en las normas alguna humedad requerida.

Tampoco se especifica un tamaño de partícula requerido, pero se sabe que licores empleados en la industria chocolatera presentan en promedio un tamaño de 50 a 100 micrómetros. Se llevaron a cabo mediciones por microscopía óptica, ya que el tamaño de partícula máximo es un parámetro importante en las propiedades de flujo del chocolate, y por lo tanto, los es para los fabricantes y en la percepción del consumidor. Según *Science of Chocolate*, una vez que éste ha derretido el chocolate en su boca, lo notará áspero o arenoso si hay un significativo número de partículas mayores a 30 micrones (0.03 mm), en cambio, lo notará sedoso alrededor de un tamaño de 20 micrones. 2 a 3 micrones de diferencia por debajo de 30 micrones proporcionan diferentes niveles de suavidad. El tamaño de partícula afecta a la viscosidad, la cual “no solo influye en la forma en que el chocolate corre en la boca, como la textura, sino también cambia el sabor”.

El tamaño de partícula medido en la pasta de cacao es mayor al necesario para una textura suave del chocolate⁵. Se utilizó una licuadora para reducir el tamaño de partícula y se logró, sin embargo, para llegar a un tamaño como el ya descrito, se tendría que invertir mucho tiempo licuando la pasta, lo que no se considera conveniente según el tiempo disponible para la estancia, además de que se debe planear dejar respaldo de tiempo para posibles repeticiones experimentales. De forma que por practicidad y ahorro de tiempo, se ha decidido utilizar cocoa comercial, la cual posee un tamaño de partícula menor, como se observa en la tabla 6. Todas las mediciones de tamaño de partícula se llevaron a cabo en el Laboratorio de Microscopía Confocal de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) en el Edificio de Vinculación a la Química Mario Molina.

La manteca extraída por lotes con hexano presentó un punto de fusión de 30-31 °C. Su bajo punto de fusión puede ser debido a que aún permanecen residuos del solvente en ella, sin embargo, la diferencia al valor establecido por la NMX-F-093-SCFI-2014 “Alimentos-Manteca de cacao-Especificaciones” es mínima.

Tabla 6. Valoración de la calidad de los insumos: Cocoa Grupo Turín.

Parámetro	Valor experimental ¹⁷	Método	Valor establecido por la Norma ²¹ .
Contenido graso (% m/m)	11-22 %	-	≥ 20%
Tamaño de partícula (µm)	d(0.9): 126.140 µm d(0.5): 16.727 µm	Difracción de rayos láser	-
Humedad	2.1%	Termobalanza	7% máx.

Información de la tabla obtenida de la Tesis de Morales, T. (2015) *Estudio del comportamiento de la viscosidad cortante y las propiedades reológicas, módulo elástico y módulo viscoso, en una formulación de chocolate oscuro, modificada con fosfatidos de amonio.*

No se encontró un rango de tamaño de partícula en las normativas: NMX-F-054-1982. “Productos alimenticios para uso humano. Cacao parcialmente desgrasado en polvo (cocoa)”, ni en la “norma del Codex para el cacao en polvo (cacao) y mezclas secas de cacao y azúcar CODEX STAN 105-198”. Según la tabla 7, el 50% de las partículas de la cocoa Turín están por debajo de los 16.727 µm, lo que cumple con la referencia de 30 micrómetros ya mencionados como máximo de tamaño de partícula que permiten una consistencia suave. El 90% de las partículas están por debajo de 126.727 µm, sin embargo, en el estudio consultado se observa gráficamente que la mayoría de las partículas miden menos de 30 µm, con una importante cantidad que miden alrededor de 10 µm. Esto concluye que la cocoa Turín puede ser seleccionada como insumo en la elaboración del chocolate.

El contenido graso se señala en la etiqueta como un 10% mínimo de manteca de cacao. Esto es cierto según los resultados experimentales señalados en la tabla. El rango cumple en parte el valor establecido por las normas NMX-F-054-1982 y CODEX STAN 105-198. La humedad cumple completamente con esta normatividad.

10.3 Selección y caracterización de la manteca de cacao

Tabla 7. Valoración de la calidad de los insumos: Manteca de Cacao La Esperanza

Parámetro	Valor experimental	Método	Valor establecido por la NMX ^{7,18}
Punto de fusión de manteca (°C)	33.5-34.5 °C	Uso Fisher-Johns*	31-35 °C
Índice de refracción n_D (40°C)	1.456	Uso refractómetro de Abbe*	1.456-1.462

**Especificaciones del equipo:*

- Aparato de punto de fusión Fisher-John marca Fisher Scientific (Inventario UNAM: 173906).
- Refractómetro de Abbe marca ATAGO modelo 1T (Inventario UNAM: 02358594); termómetro digital ATAGO modelo DTM-1 con no. de serie: 050429; baño termostático circulador marca Thermo Haake modelo P5 (Inventario UNAM: 02181020).

La manteca de cacao comercial marca La Esperanza sí cumple con los parámetros de calidad que exige la norma mexicana NMX-F-093-SCFI-2014 “Alimentos-Manteca de cacao-Especificaciones” para el índice de refracción y el punto de fusión. En la tabla 8 se observan los resultados estas mediciones. Por lo tanto, se utilizará esta manteca para la elaboración de las formulaciones.

La manteca extraída por lotes con hexano presentó un punto de fusión de 30-31 °C. Como ya se había indicado, su bajo punto de fusión puede ser debido a que aún permanecen residuos del solvente en ella, sin embargo, la diferencia al valor establecido por la NMX es mínima: 1°C.

10.4 Selección de las formulaciones y elaboración de chocolate-sésamo

En la elaboración de las formulaciones se respetaron las proporciones señaladas en los objetivos de la estancia: para chocolate oscuro, la proporción entre contenido total de cacao y azúcar se mantendrá fija a dos niveles: 75% productos de cacao y 25% azúcar y 85% productos de cacao y 15% azúcar. Este chocolate se combinará con pasta de sésamo en proporciones crecientes de éste como

porcentajes de la masa total: 5,10, 15 y 20% de la masa total, generándose un total de 8 formulaciones.

El propósito de la selección de formulaciones es definir las proporciones adecuadas de cada ingrediente (cocoa, manteca, azúcar glass y pasta de sésamo) en base a la masa total de la formulación, para la obtención de productos en barra y/o untables, considerando una textura adecuada para realizar el posterior conchado. Para ello se buscó una formulación altamente espesa que funcionara como límite superior de densidad de la mezcla. Se examinó entonces el límite mínimo porcentual de manteca de cacao en la mezcla cocoa-manteca que permitiera la incorporación de los otros dos ingredientes, pues la manteca es el ingrediente que disminuye en mayor medida la viscosidad en la mezcla. La pasta de ajonjolí influye un poco por su alto contenido graso (38%, obtenido experimentalmente por extracción por lotes con hexano), pero no en la misma proporción que la manteca (contenido graso de 50%).

Se eligió trabajar con las formulaciones de 75% productos de cacao, 25% de azúcar y 20% de pasta de sésamo ya que estas formulaciones pueden llegar a contener mayor cantidad de sólidos (mayor porcentaje de azúcar), lo que aumenta la densidad de la mezcla.

Se encontró una proporción óptima de 50% cocoa y 50% manteca de cacao como productos de cacao, los cuales constituirían el 75% de la mezcla en relación a la azúcar glass. El 20% de la masa total, azúcar-productos de cacao, lo constituiría la pasta de sésamo, y el 0.4% la lecitina de soya como emulsificante. Resultando en un % m/m de la formulación total de 29.9% cocoa, 29.9% manteca de cacao, 19.9% azúcar, 19.9% pasta de sésamo, y 0.4% de lecitina.

Para las demás formulaciones se mantendría la proporción óptima de productos de cacao seleccionada y se añadiría el azúcar, 25 y 15%, y la pasta de sésamo en las proporciones requeridas: 5,10, 15 y 20%.

Al experimentar con la muestras se observó que no es posible obtener formulaciones untables porque el contenido graso de la pasta de sésamo no es lo

suficientemente alto como para dar un consistencia altamente aceitosa a la mezcla, además de que la manteca de cacao es sólida a temperatura ambiente. Las formulaciones a trabajar darán productos en barra. En la siguiente imagen se puede observar algunas de las pruebas realizadas:



Figura 10.11. Selección de las formulaciones y elaboración de chocolate/sésamo

A la izquierda de la imagen se observan las mezclas recién hechas aún calientes y la mayoría líquidas. A la derecha ya se encuentran solidificadas, con texturas, coloraciones y sabores diferentes, las cuales, a mayor proporción de manteca, son más claras, suaves, menos dulces y más mantecosas (orden izquierda a derecha).

Los porcentajes de las 8 mezclas se fijaron como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 8. Contenido porcentual de ingredientes para cada formulación

	Formulación 1		Formulación 2		Formulación 3		Formulación 4	
INGREDIENTE	% m/m	masa (g)						
Cocoa	29.9	75	31.8	79.7	33.6	84.4	35.5	89.1
Manteca de cacao	29.9	75	31.8	79.7	33.6	84.4	35.5	89.1
Azúcar glass	19.9	50	21.1	53.1	22.4	56.2	23.6	59.3
Pasta de sésamo	19.9	50	14.9	37.5	10	25	5	12.5
Lecitina de soya	0.4	1	0.4	1	0.4	1	0.4	1
TOTAL	100	251	100	251	100	251	100	251
	Formulación 5		Formulación 6		Formulación 7		Formulación 8	
INGREDIENTE	% m/m	masa (g)						
Cocoa	33.9	85	36	90.3	38.1	95.6	40.2	100.9
Manteca de cacao	33.9	85	36	90.3	38.1	95.6	40.2	100.9
Azúcar glass	11.9	30	12.7	31.9	13.5	33.8	14.2	35.7
Pasta de sésamo	19.9	50	14.9	37.5	9.9	25	5	12.5
Lecitina de soya	0.4	1	0.4	1	0.4	1	0.4	1
TOTAL	100	251	100	251	100	251	100	251

Para una visualización más amigable de los datos, se presentan en gráficos donde se observa que el contenido porcentual de lecitina se mantuvo para todas las formulaciones, el contenido de azúcar fue mayor para las primeras cuatro mezclas que para las siguientes cuatro, y creció en porcentaje de la formulación 1 a la 4 y de la 5 a la 8. El porcentaje de manteca de cacao y cocoa es igual para cada mezcla y crece en porcentaje de igual manera que la azúcar pero llegando a mayores porcentajes en general para las últimas cuatro mezclas porque cubre el porcentaje de azúcar que se ha disminuido en ellas. El porcentaje de pasta disminuye en las formulaciones de 1 a 4 y se vuelven a probar los mismos porcentajes para las formulaciones 5 a 8.

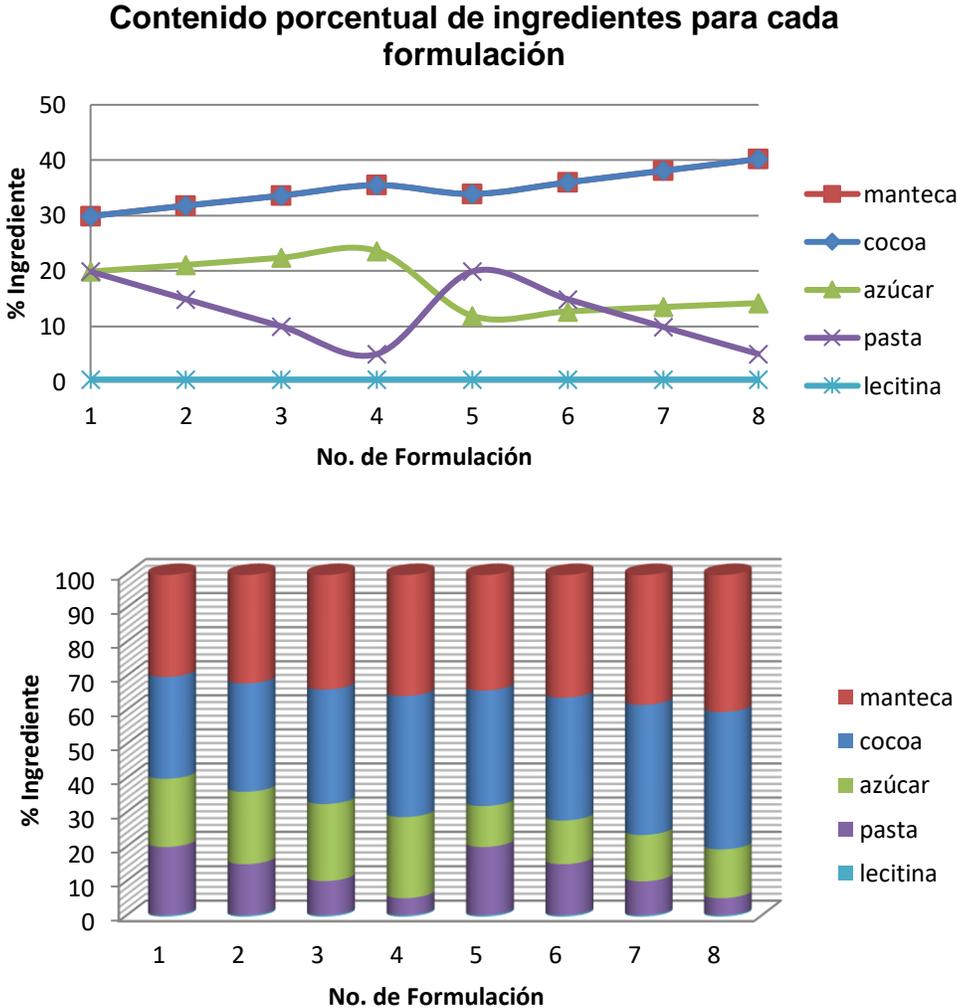


Figura 10.12. Gráfica 1 y 2: Contenido porcentual de ingredientes para cada formulación.

10.5 Conchado de las formulaciones

Las mezclas de chocolate se sometieron a un proceso de conchado que consiste en una agitación continua de la mezcla fundida con el objeto de favorecer el recubrimiento de las partículas sólidas presentes. Los 8 lotes se concharon manteniendo una temperatura entre 50-60°C, sin embargo, el tiempo de conchado se tuvo que reducir del sugerido (6-8 horas) a 4 horas por mezcla, debido a que se cometieron errores en la elaboración de la primera muestra. Además, con un tiempo de 4 horas de conchado se aseguraría la realización de otra mezcla si fuese necesario.

El conchado se realizó en 3 etapas:



Figura 10.13. Conchado en 3 etapas

Para el conchado se implementó una mezcladora (motor) Lightnin modelo L1U08F de General Signal (No. de serie 202613), habilitada con una propela de alto corte, tipo Rushton (turbina de disco y hojas planas), que se muestra en la figura 10.14. Habría que mencionar que en la fase seca de conchado fue preciso adaptarse al equipo disponible, añadiendo una parte de la manteca de cacao a la mezcla para que evitara mermas de sólidos en el ambiente.

Para monitorear que la temperatura se mantuviera en el rango deseable, se utilizó un termómetro digital marca Oakton con un termopar flexible tipo “j” que se introducía en la mezcla constantemente. La temperatura se controló desde la parrilla de calentamiento. El conchado se realizó a baño maría en un vaso de precipitado de 600 ml, con el volumen suficiente para poder monitorear la temperatura sin entorpecer el mezclado.

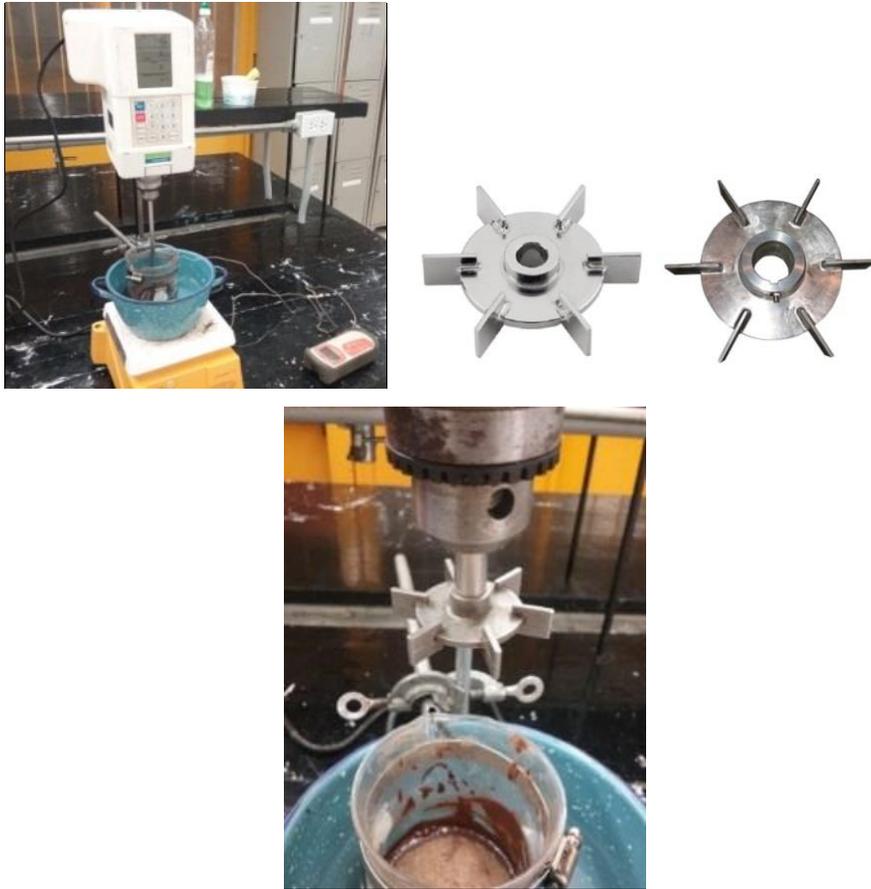


Figura 10.14. Equipo de conchado

10.6 Caracterización viscométrica de las mezclas

Se efectuó la caracterización viscométrica en un reómetro y viscosímetro rotacional *Brookfield* (modelo dv-iii + reómetro programable) a una temperatura típica para pruebas de chocolate de 40°C.



Figura 10.15. Equipo utilizado para la caracterización viscométrica de las mezclas

Se midió la viscosidad en función de la velocidad rotacional para las 8 formulaciones. Los datos experimentales se muestran en el gráfico 3:

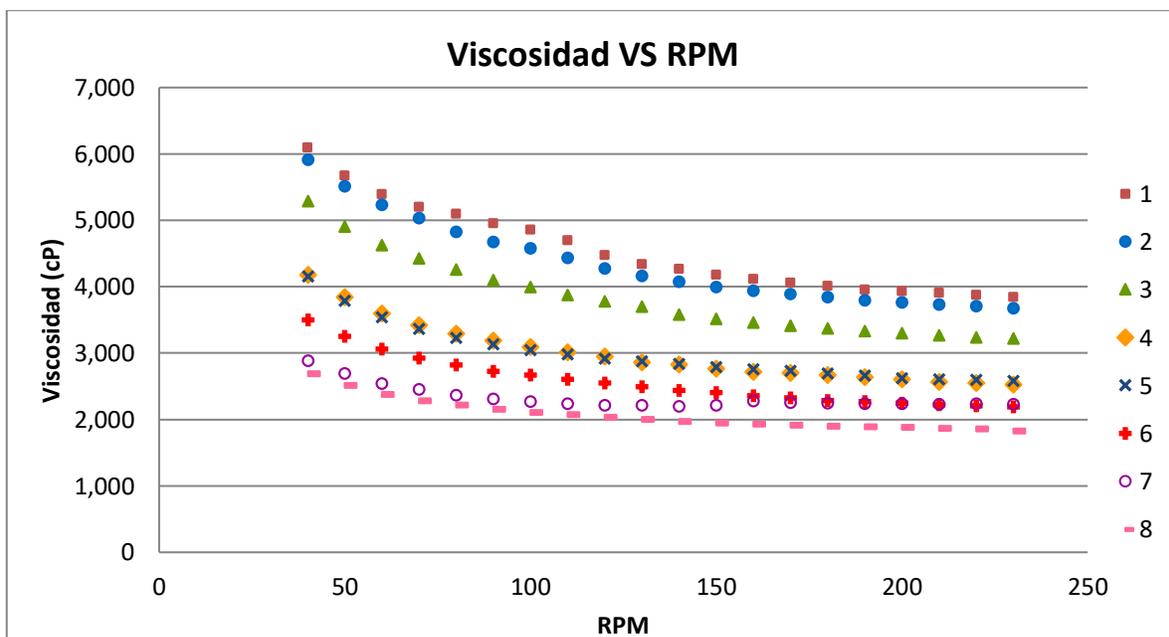


Figura 10.16. Gráfica 3: Viscosidad vs RPM

Sólo se trabajó a velocidades (rpm) en las que su porcentaje de torque estuviese en un rango de 10 a 90 % para evitar errores relativos de medición, según la indicación señalada en el manual del viscosímetro. Se escogió el husillo de disco número 6, que cubría la mayor cantidad de puntos para todas las muestras.

10.7 Procesamiento de los datos y análisis de resultados

“La industria del chocolate utiliza la versión NCA/CMA de la ecuación de Casson para evaluar el chocolate antes del procesamiento final. Esta ecuación se aproxima muy cercanamente al comportamiento plástico del chocolate”⁸. La ecuación de Casson es:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_0 \dot{\gamma}} \quad (9.1)$$

Donde:

τ = *esfuerzo de corte, de cizalla o cortante*

τ_0 = *esfuerzo límite de Casson, esfuerzo de cedencia ó yield value*

η_0 = *viscosidad plástica de Casson*

$\dot{\gamma}$ = *velocidad de cizallamiento o deformación*

Para realizar el cálculo del esfuerzo de corte τ y la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$, se tiene que tomar en cuenta la geometría del husillo manejado por el viscosímetro, el cual es de disco. Para ello se hace uso del “cilindro rotado en un medio infinito”. Esto es una modificación del viscosímetro cilíndrico concéntrico [...]. El esfuerzo cortante en la superficie del cilindro es una función de la resistencia que el fluido ofrece a la rotación del cilindro en el fluido, y del radio y del largo del cilindro. Los husillos de disco son tratados como cilíndricos y se les calcula una longitud efectiva que se debe substituir en la ecuación (9.2) como corrección. Si la relación l/r es grande, este término es pequeño y puede ser ignorado, como se hizo aquí⁶. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas:

$$\tau = \frac{t}{2\pi r^2 l} \quad (9.2)$$

Donde:

t = lectura de torque del viscosímetro (N. m)

r = radio del cilindro o disco del husillo (m)

l = largo del cilindro o del husillo (m)

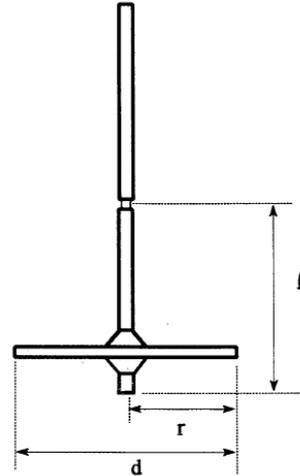


Figura 10.17. Diagrama esquemático del husillo de disco

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{4\pi N}{n''} \quad (9.3)$$

Donde:

N = velocidad rotacional (*rps:revoluciones por segundo*)

n'' = pendiente de la gráfica logarítmica de t vs N

(*numericamente igual al índice de comportamiento de flujo n*)

Resolviendo para n'' se trazó la gráfica $\log(t)$ vs $\log(N)$ y posteriormente se pudo graficar el esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación:

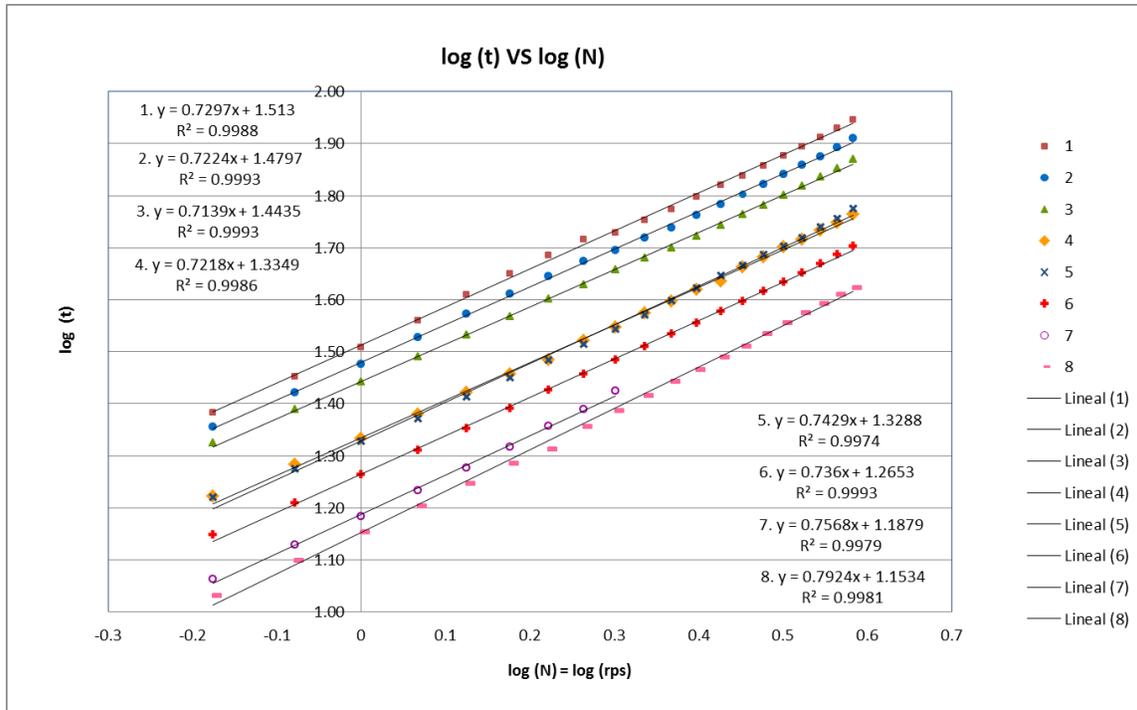


Figura 10.18. Gráfica 4: $\log(t)$ vs $\log(N)$

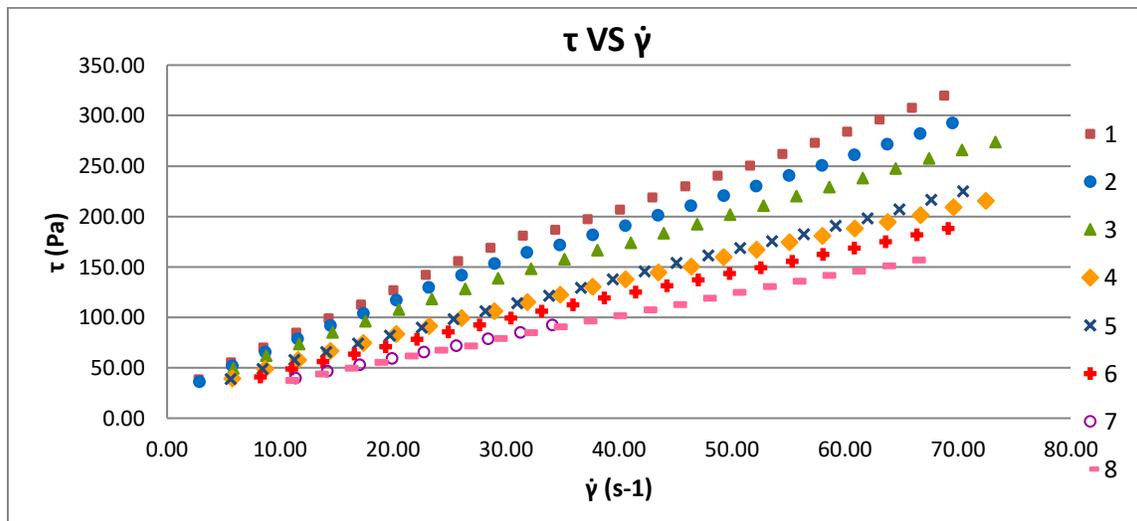


Figura 10.19. Gráfica 5: τ vs $\dot{\gamma}$

El comportamiento no newtoniano del chocolate se observa en esta gráfica pues “la relación esfuerzo cortante-velocidad de deformación no es una constante”⁸. La viscosidad entonces también variará si se varía la velocidad de deformación.⁸ El chocolate es un tipo de fluido no newtoniano plástico, que “se comportará como

sólido bajo condiciones estáticas. Una cierta cantidad de esfuerzo debe ser aplicado al fluido antes de que un flujo sea provocado, este esfuerzo es llamado esfuerzo de cedencia τ_0 (yield value en inglés). Posterior a este esfuerzo mantendrá un comportamiento de pseudoplástico.

Recordando la ecuación del modelo de Casson: $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_0 \dot{\gamma}}$, es debido graficar $\sqrt{\tau}$ vs $\sqrt{\dot{\gamma}}$ para obtener los parámetros τ_0 y η_0 a partir de este modelo:

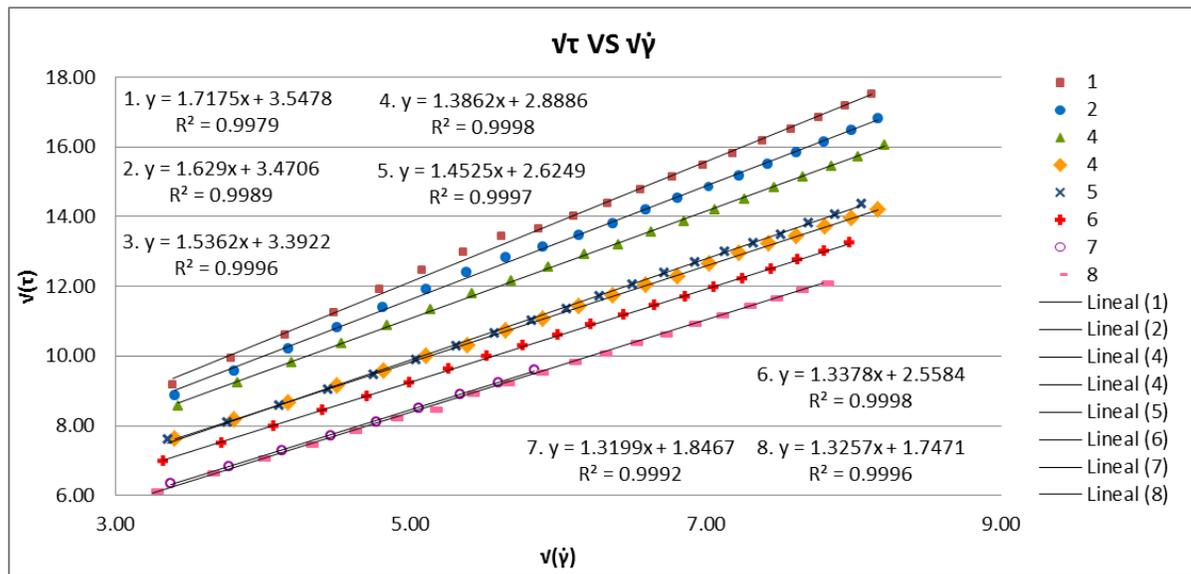


Figura 10.20. Gráfica 5: $\sqrt{\tau}$ vs $\sqrt{\dot{\gamma}}$

Tabla 9. Parámetros calculados con el modelo reológico de Casson

Formulación	τ_0 (Pa)	η_0 (Pa · s)
1	12.59	2.95
2	12.05	2.65
3	11.51	2.36
4	8.33	1.92
5	6.89	2.11
6	6.55	1.79
7	3.41	1.74
8	3.05	1.76

“La experiencia muestra que el término de la pendiente $\sqrt{\eta_0}$ (viscosidad plástica), indica la respuesta del chocolate a ser movido durante su procesamiento (mezclado,

bombeado). También, la intersección en el eje de las ordenadas, $\sqrt{\tau_0}$ (esfuerzo límite de Casson o viscosidad de cizalla cero), indica la fuerza requerida para iniciar/parar (moldeado, cobertura). Un particular lote de chocolate puede ser modificado para alcanzar las características de desempeño específicas requeridas para el siguiente paso de proceso”⁸.

El parámetro de esfuerzo límite de Casson τ_0 disminuye en forma directa a la disminución de pasta de sésamo y de forma inversa al aumento de la mezcla azúcar-productos de cacao. También η_0 sigue este comportamiento, excepto en la mezcla 7 debido a un error experimental: después del 9no dato presentó un remarcable comportamiento dilatante (aumento de la viscosidad al incrementar la velocidad de deformación). Se sospecha de filtración de agua durante la realización de las mediciones.

La pasta de sésamo contiene un 38% de parte grasa y la manteca de cacao un 50%. Con esta relación se puede saber que cada vez que se disminuye la pasta de sésamo un 5% a la mezcla pasta/azúcar/productos de cacao, como se hizo a las formulaciones, se disminuye un 1.9% de grasa vegetal de sésamo y se aumenta de un 1.3% a 1.7% de grasa vegetal de manteca de cacao (considerando un contenido del 10% al 20% de manteca de cacao en la cocoa) para las formulaciones 1 a 4, y 1.5% a 1.9% para las formulaciones 5 a 6. Es decir, la proporción en masa de grasa vegetal disminuye o queda igual.

Por otra parte, los sólidos provenientes de la pasta de sésamo disminuyen en un 1.55% y son reemplazados por un 2.1% a 2.4% de sólidos (cocoa y azúcar) de la mezcla de azúcar-productos de cacao para las formulaciones 1 a 4 y de 2.3% a 2.8% para las formulaciones 5 a 8. Es decir, la proporción en sólidos aumenta en cualquier caso.

Con el análisis del aumento de sólidos y disminución en general de la grasa vegetal en las mezclas se podría pensar en que el esfuerzo límite de Casson τ_0 y la viscosidad plástica η_0 deberían aumentar conforme se disminuye el porcentaje de pasta de sésamo. Pero el resultado es el contrario, lo que implica que el tamaño de

partícula de los sólidos (y forma) así como posiblemente también las propiedades de flujo de la manteca de cacao, son de gran impacto en el comportamiento reológico del sistema: la pasta de sésamo es el ingrediente con mayor tamaño de partícula de sólidos, a comparación de los sólidos del azúcar y de la cocoa. Así se explica que al disminuir el % de pasta de sésamo se disminuyan los valores de τ_0 y η_0 .

Acorde a los datos de la tabla 9 se puede ver que los sólidos del azúcar tienen un impacto mayor en τ_0 que en η_0 cuando se comparan las muestras del mismo porcentaje de pasta de sésamo (1-5, 2-6, 3-7 y 4-8). Las muestras con menor porcentaje de azúcar (5 a 8) presentan un menor τ_0 y η_0 que las muestras con mayor porcentaje de azúcar (1 a 4). Éstas últimas exhiben aproximadamente el doble o más del doble del valor para τ_0 pero no tan diferente valor para η_0 .

El calentamiento de las formulaciones para el conchado y para las mediciones en el viscosímetro se hizo a baño maría, por lo que podría hallarse presencia de mayor o menor humedad en cada una. Esta humedad se despreció por ser mínima y no visible, sin embargo, no se descarta que cause ligeras modificaciones en el comportamiento reológico.

Las formulaciones con mayor cantidad de pasta de sésamo y azúcar sensorialmente son más dulces y consistentes, aunque un poco más arcillosas, sin embargo la textura es agradable y el sabor de la pasta en el chocolate les provee de una combinación sensorialmente interesante, más rica y diferente, especialmente en la mezcla 1 donde se resalta el sabor del sésamo porque el azúcar disminuye el amargor de la cocoa.

Estas mezclas exigen mayor gasto energético del procesamiento que las formulaciones con menor cantidad de azúcar y pasta de sésamo debido a sus características reológicas ya mencionadas. Se podrían utilizar para hacer productos en barra. Las formulaciones con menor cantidad de azúcar debido a sus características se podrían utilizar para hacer recubrimientos.

Conclusiones

La razón del presente trabajo de investigación, es desarrollar una fuente de información accesible a las empresas emergentes que desean trascender de la producción artesanal de chocolate, y que de igual manera busca que la información esté disponible también para los profesionales de la química, ante la posibilidad de apoyar a los pequeños productores de cacao que también son productores de chocolate artesanal, siendo así una forma de ayudar a estos pequeños productores a fin de que trasciendan en su producción hacia productos de mayor valor agregado, conservando al mismo tiempo la calidad (pureza) del chocolate.

Concluyendo; como primer paso se identificó el papel que desempeñan los parámetros de flujo: viscosidad y límite de fluencia (esfuerzo cortante o cizallamiento), durante todo el proceso de fabricación del chocolate. Aunado a estos factores principales se identificaron además factores extras o secundarios que influyen significativamente en la viscosidad que puede adquirir un chocolate como lo son; el tamaño de partícula (que determina la textura que puede tener el producto), la grasa (como efecto para disminuir la viscosidad y la forma en que se derrite el chocolate), la humedad (factor que puede aumentar la viscosidad y generar grumos de azúcar), y los diferentes emulsificantes (como lecitina y PGPR que ayudan a disminuir los efectos provocados por la humedad).

Como segundo paso se recopilaron las técnicas más usadas tanto en la investigación como en la industria (control de calidad) para definir el comportamiento viscométrico – reológico del chocolate producido y tener un rango de valores estándar de los diferentes parámetros anteriormente mencionados que influyen en la viscosidad. Y como tercer paso se describieron los modelos reológicos normalmente utilizados para describir el comportamiento de flujo del chocolate fundido, siendo el modelo de *Casson* la ecuación reológica estándar para el chocolate recomendado por ICA y la que abre la posibilidad de emplear curvas de interpolación aplicables en control de calidad, cumpliendo con todos los objetivos planteados.

Referencias Bibliográficas

1. Analytical characterisation of mouthfeel in chocolate. Malvern Panalytical.
2. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. Recuperado el 15 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>
3. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 43). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf
4. Barnes, H. A., *A Handbook of Elementary Rheology*. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales. 2000.
5. Liferder (Ene 27, 2021) Lecitina: estructura y funciones. Recuperado de <https://www.liferder.com/lecitina/>.
6. Hasenhuettl, Gerard L; Hartel, Richard W, eds. (2008). *Food Emulsifiers and Their Applications*. Springer Science & Business Media.
7. Andrade, C. (2007) *La viabilidad económica del cultivo del cacao en México a través de una economía sostenible*. Capítulo 2. Recuperado el 13 de octubre del 2016 de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lri/andrade_a_cm/capitulo_2.pdf
8. Baker, B. (1998) *Theoretical and practical considerations on the rheology of sugar products*. Recuperado el 20 de noviembre del 2016 de: http://www.sasta.co.za/wp-content/uploads/Proceedings/1990s/1998_Barker_Theoretical%20and%20practical%20considerations.pdf
9. Banco Centroamericano de Integración Económica y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (1982) *Informe de la situación actual, perspectivas del cultivo e industrialización del cacao en Centroamérica*. Impresa Turrialba. Recuperado el 1 de octubre del 2016, de:

<https://books.google.com.mx/books?id=Zd0OAQAAIAAJ&pg=PA64&dq=proceso+del+cacao&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjRuPnu7rrPAhVJMyYKHAlhAHoQ6AEIlzAC#v=onepage&q&f=false>

10. Bhattacharyya, S., Boger, D. V., Halmos A. L. y Tiu, C. (s.f.) *Rheological properties of molasses and their use in the design of flow systems*. Recuperado el 20 de noviembre del 2016 de: <https://www.assct.com.au/media/pdfs/4-72.pdf>
11. Cacao México (s.f.) "Principales países productores de cacao". Recuperado el 5 de noviembre del 2016 de: http://www.cacaomexico.org/?page_id=201
12. Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. y Weigend, M. (2011) *Hoja botánica: Cacao. Theobroma cacao L.* Recuperado el 16 de septiembre del 2016, de: http://www.botconsult.com/downloads/Hoja_Botanica_Cacao_2012.pdf
13. Laviana, M. y Guanche, J. (2011) "Historia del cacao: Documentos bases de la primera y segunda reunión de la ruta del cacao". Recuperado el 12 de octubre del 2016 de: http://www.lacult.unesco.org/cacao/menu_historia.php?uid_ext=&getipr=&lg=1&art=1
14. Morales, T. (2015) *Estudio del comportamiento de la viscosidad cortante y las propiedades reológicas, módulo elástico y módulo viscoso, en una formulación de chocolate oscuro, modificada con fosfatidos de amonio*. Tesis Facultad de Química UNAM- Dirección General de Bibliotecas.
15. Santos, E. (2010) *Cacao: cadena de valor de Costa Rica*. Recuperado el 5 de noviembre del 2016 de: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A7712E/A7712E.PDF>
16. United Cacao Limited (2015) "Mercado Mundial del Cacao". Recuperado el 5 de noviembre del 2016 de: <http://www.unitedcacao.com/index.php/es/corporate-profile-es/global-cocoa-market-es>

17. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del gobierno de Perú. (octubre – diciembre 2020). “Boletín de publicación trimestral. Observatorio de commodities”. Recuperado el 2 de mayo del 2021 de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1782245/Commodities%20Cacao:%20oct-dic%202021.pdf>
18. García Garrido, C. (1° de diciembre del 2016). Caracterización viscométrica mediante reómetro rotacional Brookfield de formulaciones de cocoa/manteca de cacao/pasta de sésamo (Trabajo de Liberación de Servicio Social). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.
19. D. Coe, Sophie (1996). The true history of chocolate (en inglés) (1ª edición). Londres: Thames & Hudson.
20. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/products/inline-viscometer-srv/>
21. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/products/inline-density-meter-srd/>
22. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/solutions-item/high-quality-swiss-chocolates-rely-on-in-line-viscosity-monitoring-for-consistent-rheology-texture/>
23. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/whitepapers/>

Referencias de Imágenes

Capítulo 1

Figura 1.1, 1.2, 1.3 y Tabla 1.1. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del gobierno de Perú. (octubre – diciembre 2020). “Boletín de publicación trimestral. Observatorio de commodities”. Recuperado el 2 de mayo del 2021 de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1782245/Commodities%20Cacao:%20oct-dic%202021.pdf>

Capítulo 2

Figura 1. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 82). Recuperado el 15 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 2. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 83). Recuperado el 15 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Capítulo 3

Figura 1. Sin autor. (2018). Diferencia entre el chocolate y el cacao, ¿No son lo mismo?. Recuperado el 16 de noviembre de 2021 de: <https://www.cestalia.com/blog/diferencia-entre-chocolate-y-cacao-son-lo-mismo>

Figura 2. Elías, L. (10 de febrero del 2017). Cacaotero, un árbol generoso y conservacionista. Viva el cacao [Fotografía]. Recuperado el 16 de noviembre del 2021 de: <https://vivaelcacao.com/cacaotero-un-arbol-generoso-y-conservacionista/>

Figura 3. Pérez, J.M. (28 de mayo del 2017). Ecotipos de Theobroma cacao. CACAO HERMANOS. Recuperado el 16 de noviembre del 2021 de: <https://cacaohermanos.wordpress.com/2017/05/28/ecotipos-de-theobroma-cacao/>

Figura 4. SANDRODESII. (04 de septiembre del 2018). Cacao, alimento de dioses. SANDRO DESII. Recuperado el 16 de noviembre del 2021 de: <https://www.sandrodesii.com/cacao-alimento-dioses/>

Figura 5. Flor Trejo, R. (sin fecha). Un encuentro con cacao y vino: los emisarios de Moctezuma suben al barco de Cortés, México, Noticonquista. Recuperado el 17 de noviembre del 2021 de: <http://www.noticonquista.unam.mx/amoxtli/601/598>.

Figura 6. (Sin autor y fecha). Fábrica de chocolates Menier en Noisiel-Sur-Marne. Arquitectura + acero, libertad & diseño. Recuperado el 17 de noviembre del 2021 de: <http://www.arquitecturaenacero.org/historia/industria/fabrica-de-chocolates-menier-en-noisiel-sur-marne>

Capítulo 4

Figura 1. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 12). Recuperado el 18 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 2. Torres, C. (2010). PLANTACIONES DE CACAO CLONADO DE 17 Y 20 MESES [Fotografía]. Recuperado el 18 de noviembre del 2021 de: <http://proyectocacaobertrania.blogspot.com/2010/09/plantaciones-de-cacao-clonado-de-17-y.html>

Figura 3. Ávila, A. Campos, M. Guharay, F. & Camacho, A. (2013). Aprendiendo e innovando sobre la cosecha, fermentación y secado del cacao. Lutheran World Relief, 8, 14. Recuperado el 18 de noviembre del 2021 de: http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/02/19_Guia_8_Beneficiado.pdf

Figura 4. Benítez Reascos. S.A. (2019). Evaluación in vitro del efecto supresivo de *Trichoderma* spp. Para el control de moniliasis (*Moniliophthora roreri*) del Cacao (*Theobroma cacao*). [Tesis Licenciatura]. (Pág. 15). PROPOSAL. Recuperado el 18

de noviembre del 2021 de:
<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/8171/1/142056.pdf>

Figura 5. Forrest, R. (11 de julio del 2018). Take a week-long chocolate tour in Belize. WICKEDLOCAL. Recuperado el 18 de noviembre del 2021 de:
<https://www.wickedlocal.com/story/carver-reporter/2018/07/11/take-week-long-chocolate-tour/11546589007/>

Figura 6. Ziegler, M. Three fresh cocoa fruits on white background, one fruit is open and one can see the cocoa beans [Fotografía]. Recuperado el 18 de noviembre del 2021 de: <https://www.dreamstime.com/stock-photo-fresh-cocoa-fruits-beans-image28057530>

Figura 7. Redacción. (18 de septiembre del 2016). ¿Cacao? Fermentado, porfavor. Viva el cacao. Recuperado el 19 de noviembre del 2021 de:
<https://vivaelcacao.com/cacao-fermentado-por-favor/>

Figura 8. Sin autor. (18 de febrero del 2019). Agronomía, Fitotecnia y más [Mensaje en un foro de Facebook]. Recuperado el 19 de noviembre de 2021 de:
<https://www.facebook.com/agrofitoymas/posts/1700071960095239>

Figura 9. Koch, C. (2016). Cacaos repartidos por el proceso de secado [Fotografía]. Recuperado el 19 de noviembre del 2021 de: <https://www.alamy.es/foto-cacao-repartidos-por-el-proceso-de-secado-119050789.html>

Figura 10. Nogales, J. (2020). Almacenamiento de granos de cacao [Fotografía]. Recuperado el 19 de noviembre del 2021 de:
<https://poscosechacacao.blogspot.com/2020/01/almacenamiento-de-granos-de-cacao.html>

Figura 11. Cubillos, G. Merizalde, G. & Correa, E. (2008). Manual de beneficio del cacao para: técnicos, profesionales del sector agropecuario y productores. (pág. 25). Recuperado el 19 de noviembre del 2021 de: https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/manual_beneficio_cacao.pdf

Figura 12. Martin, T. Mauri (1993). Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural. Capitulo 2. Limpieza de los granos. Recuperado el 2 de mayo de 2022 de: <https://www.fao.org/3/x5027s/x5027S00.htm#Contents>

Figura 13. Founding Alchemist. (10 de julio del 2011). Chocolate alchemy's diy winnower. CHOCOLATE ALCHEMY ®. Recuperado el 19 de noviembre del 2021 de: <https://chocolatealchemy.com/blog/2011/07/11/chocolate-alchemys-diy-winnower>

Figura 14. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 46). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 15. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 47). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 16. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 48). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 17. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 41). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 18. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 42). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 19. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 43). Recuperado el 20 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 20. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 50). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 21. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 51). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 22. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 52). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 23. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 53). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 24. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 54). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 25. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 56). Recuperado el 21 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 26. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 63). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 27. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 64). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 28. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 65). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 29. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 43). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf

Figura 30. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 67). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 31. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 69). Recuperado el 22 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 32. Cedeño, F. (2018) Formacion de compuestos con aroma y sabor (Flavor) a través de la reacción de Maillard. Recuperado el 2 de mayo de 2022 de: https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/11535/mod_resource/content/3/REA_CCI%C3%93N%20DE%20MAILLARD%2008-09-2021.pdf

Figura 33. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 71). Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 34. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 72). Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 35. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 73). Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 36. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 44). Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de: http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-

Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-
Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf

Figura 37. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 74).
Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 38. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 75).
Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 39. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 76).
Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 40. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 77).
Recuperado el 23 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 41. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 127).
Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 42. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 129).
Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de:
<https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 43. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 45).
Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de:
[http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-
Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-
Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf](http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf)

Figura 44. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 46).
Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de:

http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf

Figura 45. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 130). Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 46. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 131). Recuperado el 24 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 47. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 133). Recuperado el 25 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 48. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 134). Recuperado el 25 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 49. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 135). Recuperado el 25 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 50. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 140). Recuperado el 25 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 51. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 145). Recuperado el 25 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Capítulo 5

Figura 1. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 81). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 2. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 84). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 3. Afoakwa, E. (2010). *Chocolate Science and Technology*. (pág. 48). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: http://ssu.ac.ir/cms/fileadmin/user_upload/ivfen/ensite/lib/075-Chocolate_Science_and_Technology-Emmanuel_Ohene_Afoakwa-1405199067-Wiley_Blackwell-2010-310-_.pdf

Figura 4. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 86). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 5. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 87). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 6. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 89). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 7. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 89). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 8. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 91). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 9. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 94). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 10. Parada Puig, R. (29 de enero de 2020). Lecitina: estructura y funciones [imagen]. Lifeder. Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.lifeder.com/lecitina/>

Figura 11. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 95). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 12. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 96). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 13. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 96). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 14. Parada Puig, R. (05 de junio de 2020). Polirricinoleato de poliglicerol: estructura y funciones [imagen]. Lifeder. Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.lifeder.com/>

Figura 15. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 99). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 16. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 101). Recuperado el 26 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Capítulo 6

Sin Imágenes.

Capítulo 7

Figura 1. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 155). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 2. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 159). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 3. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 160). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 4. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 161). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 5. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 162). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 6. Beckett, S. (2008). *The Science of Chocolate*. 2nd Edition. (pág. 163). Recuperado el 29 de noviembre del 2021 de: <https://www.coursehero.com/file/56341191/beckett-the-science-of-chocolatepdf/>

Figura 7. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/products/inline-viscometer-srv/>

Figura 8. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/products/inline-density-meter-srd/>

Figura 9. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de:

<https://es.rheonics.com/solutions-item/high-quality-swiss-chocolates-rely-on-in-line-viscosity-monitoring-for-consistent-rheology-texture/>

Figura 10. Rheonics ® (2020). Documentos técnicos. Tecnología de sensores vibratorios Rheonics desmitificada. Recuperado el 8 mayo del 2022 de: <https://es.rheonics.com/whitepapers/>

Capítulo 8

Sin Imágenes.

Capítulo 9

Sin Imágenes.

Capítulo 10

Todas las imágenes y tablas de datos fueron obtenidas de:

García Garrido, C. (1° de diciembre del 2016). Caracterización viscométrica mediante reómetro rotacional Brookfield de formulaciones de cocoa/manteca de cacao/pasta de sésamo (Trabajo de Liberación de Servicio Social). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.