

Un método para la determinación del contenido de agua de emulsiones de agua en aceite de oliva

Pedro Vallesquino Laguna, Manuel Sánchez Gómez

Dpto. Bromatología y Tecnología de los Alimentos. ETSIAM - Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales s/n, 14080, Córdoba (España).

✉ bt1valap@uco.es - villalon.manolo@hotmail.com

RESUMEN

En el proceso de elaboración del aceite de oliva se originan una serie de fluidos que en mayor o menor medida contienen cierta cantidad de agua. La determinación del agua que pueda haber presente en un aceite dado puede ser llevada a cabo por secado en estufa, aunque también es posible aplicar otros métodos basados en técnicas como la valoración química, la destilación, la espectrometría o el tratamiento de imágenes. En este contexto de estudio, y tratando de proponer una alternativa rápida y no costosa, se propone un método alternativo para determinar el contenido de agua presente en cualquier emulsión de agua en aceite, basado en la medida directa de variables físicas como el caudal, la pérdida de carga (presión) y la temperatura. Por las características del mismo, es destacable que su implementación podría ser 'en línea de proceso', lo que podría ser una ventaja, sobre otros métodos, a la hora de tomar decisiones en tiempo real.

Palabras clave: *aceite de oliva, viscosidad, temperatura, agua, emulsión, humedad.*

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de elaboración del aceite de oliva requiere de un conjunto de operaciones básicas que aplicadas sobre la aceituna entrante permiten la obtención de un producto final. En dicho proceso se generan normalmente una serie de fluidos (como el alperujo, el alpechín, el mosto de aceite o el aceite de oliva virgen extra) que en mayor o menor medida contienen cierta cantidad de agua. En las fases finales del proceso de elaboración se trata, precisamente, de eliminar el contenido de agua remanente en el aceite (junto a otras impurezas solubles y no solubles) aplicando operaciones como la centrifugación, la decantación natural o el filtrado. Aun así, y a pesar de los esfuerzos realizados, no es raro observar en el producto final cierto aspecto brillante que viene motivado, en buena medida, por la presencia de agua residual que se encuentra emulsionada con el aceite final (sobre todo en los primeros días o semanas tras su producción).

La determinación del agua, que pueda quedar en un aceite dado, es llevada a cabo habitualmente por secado en estufa (Hatzakis y Dais, 2008), aunque también es posible aplicar otros métodos basados en técnicas como la valoración química, la destilación, la espectrometría o el tratamiento de imágenes (Hatzakis y Dais, 2008; Gila et al., 2015; 2020; Breschi et al. 2021; García, 2022). Normalmente, los métodos referidos o son lentos o son costosos de aplicar, lo que hace pensar que el estudio de alternativas a los mismos pueda tener cierta utilidad. Teniendo en cuenta esto, en este trabajo se propone un método alternativo, útil para determinar el contenido de agua presente en cualquier emulsión de agua en aceite, basado en la medida directa de variables físicas como el caudal, la pérdida de carga (presión) y la temperatura. Por las características del mismo, es destacable que su implementación podría ser 'en línea de proceso', lo que podría ser una ventaja, sobre otros métodos, a la hora de tomar decisiones en tiempo real durante la producción.

2. FUNDAMENTO DEL MÉTODO

De acuerdo con la ecuación de Hagen-Poiseuille (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005; Singh y Heldman, 2009):

$$\Delta p = 128 \cdot L \cdot Q \cdot \mu / (\pi \cdot D^4), \quad (\text{ec. 1})$$

la pérdida de presión (Δp) que se produce en un fluido newtoniano cuando pasa a través de un tubo circular, bajo régimen laminar desarrollado y estacionario, depende del caudal circulante (Q), de variables geométricas como la longitud (L) y el diámetro interior (D) del tubo, así como de su viscosidad dinámica (μ). Puesto que las propiedades de un fluido dependen de la composición del mismo (Sahin y Sumnu, 2009), la cantidad de agua emulsionada (c , expresable en %) que pueda haber presente en un volumen dado de 'aceite limpio' (libre de otras impurezas que no sea agua) va a afectar a su viscosidad. Si dicha viscosidad se ve alterada, de acuerdo con la ec. (1) la caída de presión que pueda ocurrir en el conducto va a ser diferente (aunque se mantengan constantes el resto de variables), y esto puede ser utilizado para medir dicho contenido de agua. Junto con el contenido de agua, la temperatura también es una variable a tener en cuenta, pues es normal en líquidos que su viscosidad descienda cuando la temperatura crece (Steffe y Daubert, 2006; Giap, 2010). En este contexto, es posible establecer para el aceite de oliva que:

$$\mu = f(T, c) = \Delta p \cdot \pi \cdot D^4 / (128 \cdot L \cdot Q), \quad (\text{ec. 2})$$

esto es, que la viscosidad dinámica μ de dicho aceite es una variable dependiente de la temperatura y de su contenido de agua emulsionada. Si las ecuaciones (1) y (2) son relacionadas, es posible proponer lo siguiente:

$$\Delta p = 128 \cdot Q \cdot L \cdot [f(T, c)] / (\pi \cdot D^4), \quad (\text{ec. 3})$$

expresión a partir de la cual sería posible determinar el contenido de agua c una vez que la función $f(T, c)$ fuese formulada de forma explícita, hecho que permitiría afirmar que:

$$c = \psi(\Delta p, Q, T, L, D). \quad (\text{ec. 4})$$

Tratando de verificar la certidumbre de la hipótesis plasmada en la ec. (4), válida para mezclas de aceite y agua (sin otro tipo de impurezas reseñables), se desarrolló un conjunto de experimentos que son descritos a continuación y cuyos resultados serán analizados posteriormente.

3. EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Para poder llevar a cabo esta parte del trabajo fue necesario construir dos pequeñas instalaciones (modelos a escala). Una de ellas estaba destinada a la creación de las emulsiones que debían ser estudiadas, y la otra fue desarrollada para llevar a cabo los ensayos de viscosidad propiamente dichos. En lo que sigue, se procede a describir las características, funcionamiento y utilidad de los modelos construidos.

3.1 Modelo empleado para la creación de emulsiones

Para crear las emulsiones que serían usadas en experimentos posteriores se utilizó un depósito de unos 30 litros, aproximadamente, montado sobre un soporte metálico de unos 70 cm de altura (véase la **Figura 1**). Formando un circuito cerrado, empleando fundamentalmente 3 m tubería de plástico transparente de 15 mm de diámetro interior, el citado recipiente fue conectado a una bomba de paletas cerradas (con caudal máximo de 1700 litros/h, velocidad nominal de rotación de 2850 r.p.m y presión máxima de 245 kPa). A la salida del depósito, y para facilitar la salida de la emulsión, se empleó de forma particular unos 50 cm de tubería transparente con diámetro interior de 25 mm. Para fijar o variar la temperatura de la mezcla, eventualmente se usó agua caliente o hielo confinados en recipientes de plástico herméticamente cerrados. Para aportar los volúmenes de agua y aceite se usaron diferentes probetas calibradas con capacidad entre 100 - 1000 ml.

La forma de manejo de este dispositivo era sencilla y estaba fundamentada en el poder de mezcla que podía ejercer la bomba sobre los fluidos que ingresaban en ella. Con esta premisa, en el recipiente se vertieron inicialmente 15 litros de aceite de oliva (libre de agua e impurezas). Para poder llevar a cabo las series de ensayos que serán comentadas más adelante se fueron añadiendo, poco a poco, cantidades crecientes de agua destilada hasta llegar a alcanzar una concentración c dada,

fijada en este caso en (litros de agua / litros de emulsión)*100. La creación de cada emulsión duraba unos 30 - 60 minutos a lo largo de los cuáles la bomba no dejaba de funcionar (hasta visualizar de forma efectiva que toda el agua destilada estaba mezclada con el aceite de oliva). Creada una emulsión dada, se paraba la bomba y el fluido resultante era trasvasado al dispositivo diseñado para la medida de viscosidades. De forma nominal, las concentraciones iniciales c previstas para las emulsiones fueron: 5%, 10%, 15%, 20%, 30% y 40%. Las temperaturas de ensayo estuvieron en el entorno de 20 – 30 °C.

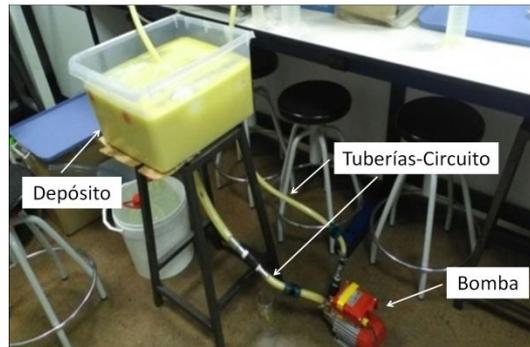


Figura 1. Modelo construido para crear las emulsiones

3.2 Modelo creado para la determinación de viscosidades

En las **Figuras 2 y 3** se muestra la instalación a escala que fue construida para estimar, en último término, los valores de viscosidad ligados a las emulsiones creadas según se describía en el apartado previo.

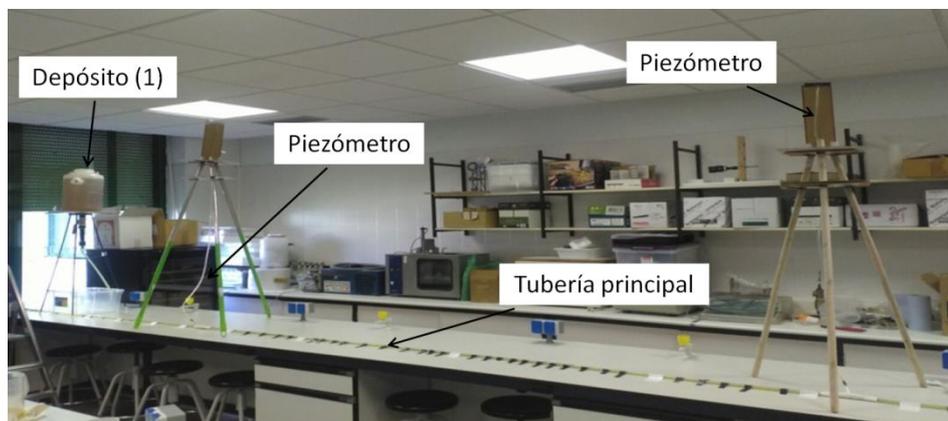


Figura 2. Modelo construido para determinar la viscosidad de las emulsiones

De este dispositivo son destacables los siguientes elementos:

- El depósito (1), de unos 15 litros aproximadamente, que servía para contener la emulsión que sería objeto de estudio en cada caso.
- Una bomba de paletas, sumergida en el depósito (1), con caudal máximo de 1350 litros/h, 1500 r.p.m de régimen nominal y 17.7 kPa de presión máxima. Su función era la de mantener el tanque agitado para conservar emulsionada la mezcla aceite/agua.
- 8.5 m de tubería (aproximadamente) formando parte del circuito principal (abierto en sus extremos). El diámetro interior nominal de este conducto era de 10 mm, no obstante, y dada su influencia en la determinación de μ , la medida exacta del mismo fue llevada a cabo

volumétricamente (Bagarello, 1997; Sánchez y Vallesquino, 2018) resultando finalmente un valor real de 9.45 mm.

- Dos piezómetros (con diámetro nominal de 4 mm) usados para poder medir las alturas de presión existentes en 2 puntos característicos.
- Dos válvulas de esfera usadas para regular el caudal circulante (una instalada a la salida del depósito (1) y otra en el extremo de salida de la tubería principal).
- Un depósito (2) de unos 20 litros, aproximadamente, usado para recoger el fluido transportado saliente de la tubería principal (dado que el circuito era abierto).
- Otro material auxiliar como trípodes, cinta adhesiva, cinta métrica (con precisión milimétrica), probetas calibradas de 250 cm³ (con precisión de ± 2 cm³), una báscula digital (con precisión de $\pm 0,1$ g) y dos termómetros digitales (con precisión de $\pm 1^\circ$ C) que fueron instalados, respectivamente, en el depósito (1) y justo a la salida del circuito principal (entre la válvula (2) y la entrada del depósito (2)), véase la **Figura 3**).

El uso que se hizo de esta instalación a escala fue el siguiente: manteniendo el depósito (1) lleno de emulsión, se maniobraba sobre las válvulas de esfera (usadas como control) para fijar un caudal de circulación determinado (Q). En cada ensayo se medía la temperatura con los termómetros antes señalados (T_1 y T_2), así como la altura de fluido (h) alcanzada en cada piezómetro. En este punto, debe notarse que para evitar la separación de la emulsión en los piezómetros, éstos eran regularmente purgados y llenados con emulsión intacta. Complementariamente, los caudales se determinaban volumétricamente en cada caso vertiendo sobre una probeta, durante un tiempo determinado (t), el fluido que salía de la instalación hacia el depósito (2). Las densidades (ρ) de los caudales recogidos también eran estimadas a partir de la medida de los pesos y volúmenes ligados a cada caudal.

Con el modelo y método descritos en este apartado se llevaron a cabo 18 ensayos con cada una de las emulsiones creadas, así como con 15 litros de aceite de oliva intacto que fue usado como control (para tener un nivel de referencia con el que comparar los resultados). Las temperaturas de los fluidos ensayados oscilaron entre 20 – 30 °C.

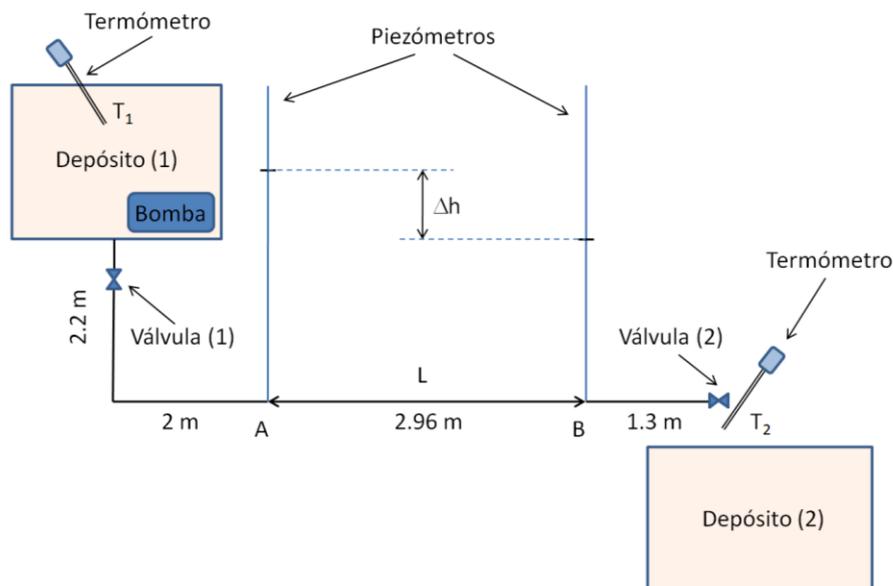


Figura 3. Esquema del modelo construido como viscosímetro

3.3 Determinación de viscosidades

De las ecuaciones (1) y (2) se deduce que μ puede ser fácilmente estimada si se dispone de los valores experimentales de Q , L , D y Δp . De acuerdo con el apartado anterior, en cada ensayo los valores de Q fueron medidos de forma volumétrica junto a las densidades (en un tiempo dado) y los valores de Δp podían ser determinados a partir de medidas piezométricas. Téngase en cuenta que para un montaje como el dispuesto en la **Figura 3** ocurre que:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h, \quad (\text{ec. 5})$$

esto es, que la caída de presión (Δp) entre dos puntos como A y B viene dada por el producto de la densidad (ρ), la aceleración gravitatoria (g) y la diferencia de altura piezométrica (Δh) entre dichos puntos. Asimismo, y de acuerdo con la **Figura 3**, L fue igual a 2.96 m (distancia entre A y B) y el diámetro D en dicho tramo fue de 9.45 mm (ver apartado 3.2), con lo que ya se tenía información suficiente para determinar μ en cada ensayo. Por otro lado, y dado que era esperado que la viscosidad variase con la temperatura, se consideró necesario medir esta variable tanto en el depósito (1) (valor correspondiente a T_1) como a la salida del conducto principal (valor de T_2) para llevar a cabo análisis posteriores. Aplicando interpolación lineal, la temperatura media del fluido (T) en el tramo de estudio (de longitud $L = 2.96$) fue estimada a partir de la siguiente ecuación en la que la constante empleada está ligada a la geometría del sistema:

$$T = T_2 + 0.3286 \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{ec. 6})$$

Hechas estas puntualizaciones, es momento de analizar los resultados obtenidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 4** se muestran los valores de la viscosidad dinámica μ (en Pa*s), para cada una de las emulsiones ensayadas, en función de la temperatura T (°C) y de la concentración c (litros de agua / litros de emulsión, expresados en %). En este contexto, $c = 0$ % se corresponde con el fluido usado como control (aceite de oliva sin agua añadida).

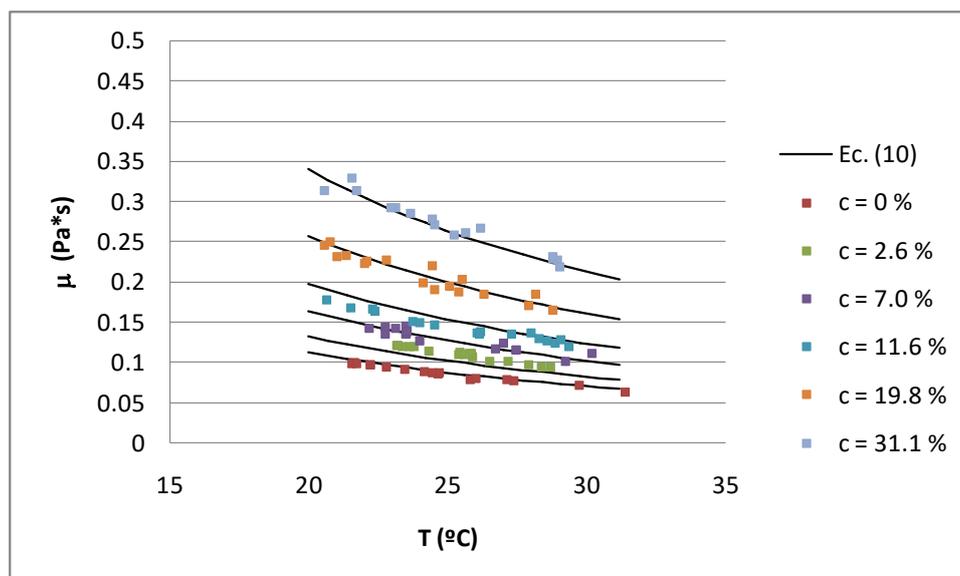


Figura 4. Viscosidad dinámica μ en función de T y c

La primera cuestión que es destacable de dicha **Figura 4** es que la concentración de agua c , finalmente alcanzada, no se corresponde con el contenido nominal inicialmente previsto (recuérdese

que se plantearon crear emulsiones al 5%, 10%, 15%, 20%, 30% y 40%, de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.1). La detección de esta desviación fue llevada a cabo al comprobar los valores de densidad ligados a cada emulsión. De acuerdo con un balance de materia, debía cumplirse que:

$$\rho_{\text{observada}} = X_{\text{aceite}} * \rho_{\text{aceite}} + X_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}, \quad (\text{ec. 7})$$

$$1 = X_{\text{aceite}} + X_{\text{agua}}, \quad (\text{ec. 8})$$

en donde los valores de X representan las fracciones volumétricas (de aceite o agua) presentes en cada emulsión, $\rho_{\text{observada}}$ es la densidad medida de la emulsión y ρ_{aceite} , ρ_{agua} son las densidades correspondientes al aceite y al agua. Tomando como referencia $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (valor intermedio de temperatura considerado en estos ensayos), en la que $\rho_{\text{agua}} = 997.1 \text{ kg/m}^3$ (Singh y Heldman, 2009) y $\rho_{\text{aceite}} = 907.8 \text{ kg/m}^3$ (valor observado para el aceite de oliva utilizado), se pudieron constatar los valores de $\rho_{\text{observada}}$ y ρ_{esperada} (densidad esperada para c nominal) que se presentan en la **Tabla 1**. De forma sistemática, es destacable en dicha tabla que $\rho_{\text{observada}} < \rho_{\text{esperada}}$, lo que viene a indicar que *en todas las emulsiones faltaría algo de agua por mezclar* (dado que al ser el agua más densa que el aceite, a mayor fracción de agua, mayor densidad esperable en la emulsión). Teniendo presente esto, los valores de $c = 100 * X_{\text{agua}}$ fueron calculados de nuevo aplicando las ecuaciones 7 y 8 considerando como datos los valores de $\rho_{\text{observada}}$, ρ_{aceite} y ρ_{agua} .

En la **Tabla 2** se muestran dichos valores en contraposición de los nominales inicialmente esperados. En este punto, puede comentarse que la causa de las divergencias observadas pudo residir en la forma del depósito usado para contener/mezclar las emulsiones (véase la **Figura 1**), dado que las cantidades de agua fueron cuidadosamente medidas y aportadas. En este sentido, puede indicarse que dicho depósito tenía un fondo plano y, a posteriori, se observó que en el mismo quedaban 'zonas muertas' (sobre todo en las esquinas) en las que el agua tendía a acumularse sin recircular por la bomba. Por este motivo, los ensayos relativos al caso con $c = 5\%$ (nominal) no presentaron una diferencia reseñable respecto de los de la muestra de control, lo que llevó a descartarlos finalmente.

Tabla 1. Densidades observadas y esperadas de las emulsiones ensayadas

c nominal	0%	5%	10%	15%	20%	30%	40%
$\rho_{\text{observada}}$ (kg/m^3)	907.8	907.6	910.1	914	918.2	926.7	935.5
ρ_{esperada} (kg/m^3)	907.8	912.3	916.7	921.2	925.7	934.6	943.5

Tabla 2. Correspondencia entre concentraciones de las emulsiones ensayadas

c nominal	0%	5%	10%	15%	20%	30%	40%
c final	0%	~ 0%	2.6%	7.0%	11.6%	19.8%	31.1%

A la vista de las ecuaciones (7) y (8), y de lo hasta ahora comentado, es evidente que la medida de la densidad puede ser un método efectivo para determinar concentraciones en emulsiones de agua/aceite aplicando los balances correspondientes. No obstante, su aplicación en continuo, sobre línea de proceso, requiere de equipamiento que puede tener cierto coste, lo que hace que el estudio de otros métodos alternativos (como el aquí tratado) pueda estar justificado.

Es por ello que volviendo a examinar la **Figura 4**, en lo referente a la relación existente entre T y μ , se puede comentar que, dado que el rango de temperatura observado en los experimentos no era amplio (entre $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente), las variaciones de μ con respecto a la temperatura son cuasi-lineales y decrecientes, de forma semejante a lo presentado por Nierat et al. (2013) o por Tirado y Vallesquino (2020). Otros autores (Herschel, 1922; Giap, 2010; Sahasrabudhe et al., 2017), que abordaron el estudio de la viscosidad de distintos aceites (incluido el de oliva) respecto de la temperatura en rangos más amplios, han encontrado relaciones más complejas pero igualmente

decrecientes al aumentar T . No obstante, para rangos cortos de temperatura estos estudios presentan valores y tendencias similares a las aquí mostradas.

En lo relativo a la relación entre μ y c , es destacable que la viscosidad de las emulsiones aumenta al incrementarse c : el fluido se hace más viscoso a medida que la emulsión contiene más agua. Este hecho podría parecer contradictorio a priori, pues si el aceite es más viscoso que el agua cabría pensar que la mezcla debería ser menos viscosa al aumentar la concentración de agua. En la práctica, no obstante, diversos autores (Sahin y Sumnu, 2009; Plasencia et al., 2013; Ariffin et al., 2016; Wong et al., 2018) constatan que en emulsiones del tipo ‘*agua en aceite*’ es normal que la viscosidad aumente cuando se incrementa la concentración de la fase dispersa. La razón de tal fenómeno reside en el hecho de que al aumentar la concentración de agua (asumiendo no variación en el tamaño de las gotas dispersadas) se aumenta la superficie de contacto y el rozamiento interno entre fases, lo que lleva a un aumento de viscosidad. Esto es similar a lo establecido por la ley de Einstein para suspensiones de sólidos en líquidos (Sahin y Sumnu, 2009) que propone un aumento de la viscosidad al incrementarse la concentración de la fase dispersada.

Considerando lo anterior, y teniendo presente la distribución de los datos de la **Figura 4** junto con el planteamiento propuesto en el apartado 2, como aproximación se puso a prueba el siguiente modelo matemático en el que de forma simple se compilan las dos tendencias referidas (el aumento de μ con c y el descenso de μ con T):

$$\mu \approx (a_1 * c + a_2) * (a_3 / T + a_4), \quad (\text{ec. 9})$$

en donde a_1 , a_2 , a_3 y a_4 son parámetros de ajuste a determinar a partir de un conjunto de datos conocido. Usando como herramienta auxiliar el software SPSS, todos los datos de μ fueron ajustados a la ecuación anterior, dando como resultado la siguiente expresión:

$$\mu \approx (0.260 * c + 4.023) * (0.631 / T - 0.003), \quad (\text{ec. 10})$$

de la que resultó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.986$ y un residuo medio cuadrático R.M.S = 0.033 Pa*s. Considerando este ajuste, en la **Figura 4** se presentan con trazo negro los valores resultantes de la ec. (10) frente al conjunto de datos observados (con diferentes colores según el valor de c), mostrando visualmente la bondad del planteamiento propuesto. Nótese en este punto que para que los resultados de la ec. (10) sean coherentes, el contenido de agua c debe ser introducido en porcentaje (%), T en grados centígrados y μ , como resultado, saldrá en Pa*s. Deducida la ecuación (10) es posible introducir su contenido en la ec. (2):

$$\mu = (0.260 * c + 4.023) * (0.631 / T - 0.003) = \Delta p * \pi * D^4 / (128 * L * Q) \quad (\text{ec. 11})$$

para dar lugar a un modelo como el expresado en la ec. (4):

$$c = \frac{\frac{\Delta P * \pi * D^4}{128 * L * Q}}{0.260 * (0.631 / T - 0.003)} - \frac{4.023}{0.260}, \quad (\text{ec. 12})$$

en el que se establece que para una emulsión dada es posible estimar el contenido de agua c (%) a partir del conocimiento de parámetros básicos de la instalación (como L y D), así como de variables físicas como ΔP , Q y T . Si bien la ec. (12) sólo es válida, como aproximación, para emulsiones semejantes a las aquí estudiadas, su planteamiento abre la posibilidad de estudiar modelos semejantes que podrían ser aplicados en instalaciones industriales con emulsiones de aceite reales (como las normalmente presentes en las almazaras). Bastaría con disponer de algunos sensores sencillos en puntos clave de la instalación (capaces de medir ΔP , Q y T) para poder estimar “on-line” el contenido de agua presente en los aceites en fase de elaboración.

Finalmente, y como aclaración, merece indicarse que la comprobación de la existencia de flujo laminar fue llevada a cabo en todos los ensayos para sustentar las premisas establecidas en el

apartado 2. En este sentido, se comprobó que el número de Reynolds $Re = 4 \cdot \rho \cdot Q / (\pi \cdot D \cdot \mu)$ fue muy inferior a 2000 en todos los experimentos. Concretamente, no llegó a superar el valor de 10 para el aceite intacto y quedó por debajo de 1 con la emulsión más viscosa. Como ejemplo, nótese que el caso con el mayor número de Reynolds obtenido fue para el aceite intacto con un valor de 7.33 cuando el caudal era de $3,76 \cdot 10^{-6}$ m³/s. Con estos valores se puede asegurar que el flujo establecido en todos los experimentos fue laminar, con lo que la aplicación de la ecuación (1) está justificada.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que es posible estimar el contenido de agua c , presente en emulsiones de agua en aceite que circulan por conductos, si son conocidas en un caso dado variables físicas como la caída de presión, el caudal y la temperatura. En este contexto, y para un rango de temperaturas característico ($T = 20$ °C – 30 °C), se observa que la viscosidad de las emulsiones ensayadas presenta un comportamiento descendente y casi lineal con el aumento de T . Asimismo, se constata que conforme se aumenta la cantidad de agua añadida a una emulsión ésta se vuelve más viscosa.

Aunque los ensayos realizados han sido desarrollados con muestras relativamente simples, en comparación con la complejidad que en algún caso pueden presentar los fluidos de proceso que se manejan en la industria alimentaria, futuras investigaciones pueden dar la oportunidad de estudiar modelos de ajuste (similares al aquí presentado) que sean aplicables, por ejemplo, a la estimación en tiempo real del contenido de agua (e impurezas) presente en aceites de oliva en fase de elaboración. Dicho conocimiento se entiende que es importante por las repercusiones que puede tener sobre la calidad final de los aceites obtenidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ariffin, T. S. T., Yahya, E., Husin, H. (2016). The rheology of light crude oil and water-in-oil-emulsion. *Procedia engineering*, 148, 1149-1155.
- Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., Pumo, D. (1997). "Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123(1), 1-7.
- Breschi, C., Guerrini, L., Corti, F., Calamai, L., Domizio, P., Parenti, A., Zanoni, B. (2021). Quality of veiled olive oil: Role of turbidity components. *Italian Journal of Food Science*, 33(3), 33-46.
- García Martín, J. F. (2022). Potential of near-infrared spectroscopy for the determination of olive oil quality. *Sensors*, 22(8), 2831.
- Giap, S. G. E. (2010). The hidden property of Arrhenius-type relationship: viscosity as a function of temperature. *Journal of Physical Science*, 21(1), 29-39.
- Gila, D. M., Marchal, P. C., García, J. G., Ortega, J. G. (2015). On-line system based on hyperspectral information to estimate acidity, moisture and peroxides in olive oil samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 1-7.
- Gila, A., Bejaoui, M. A., Beltrán, G., Jiménez, A. (2020). Rapid method based on computer vision to determine the moisture and insoluble impurities content in virgin olive oils. *Food Control*, 113, 107210.
- Hatzakis, E. and Dais, P. (2008). Determination of water content in olive oil by 31P NMR spectroscopy. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(6), 1866-1872.
- Herschel, W. H. (1922). The change in viscosity of oils with the temperature. *Industrial & Engineering Chemistry*, 14(8), 715-722.
- Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G.V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Nierat, T. H., Musameh, S. M., Abdel-Raziq, I. R. (2013). Temperature and storage age (weekly basis)-dependence of olive oil viscosity.
- Plasencia, J., Pettersen, B., & Nydal, O. J. (2013). Pipe flow of water-in-crude oil emulsions: Effective viscosity, inversion point and droplet size distribution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 101, 35-43.
- Sahasrabudhe, S. N., Rodriguez-Martinez, V., O'Meara, M., Farkas, B. E. (2017). Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. *International Journal of Food Properties*, 20(sup2), 1965-1981.
- Sahin, S., y Sumnu, S. (2009). "Physical Properties of Foods". Springer-Verlag. New York.
- Sanchez, M. y Vallesquino, P. (Dir). (2018). Estudio de la densidad y la viscosidad en emulsiones de aceite de oliva y agua. Trabajo Fin de Grado. Facultad de Veterinaria. Universidad de Córdoba.
- Singh, P.R. y Heldman, D.R. (2009). *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*. Acribia. Zaragoza
- Steffe, J.F. y Daubert, C.R. (2006). *Bioprocessing Pipelines: Rheology and Analysis*. Freeman Press. Michigan. USA.

- Tirado, A. y Vallesquino, P. (Dir). (2020). Estudio de la densidad y la viscosidad de fluidos oleosos procedentes de almazara. Trabajo Fin de Grado. ETSIAM. Universidad de Córdoba.
- Wong, S. F., Dol, S. S., Wee, S. K., Chua, H. B. (2018). Miri light crude water-in-oil emulsions characterization—Rheological behaviour, stability and amount of emulsions formed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, 58-66.