



**Trabajo de Fin de Máster**

**Máster interuniversitario en Nutrición y Metabolismo - 18ª edición**

# **Estudio comparativo sobre digestibilidad de aceites mediante un modelo *in vitro***

**Autor: Jheferson José Rayo Diaz**

**Tutores: Dr. Agustí Romero**

**Mag. Montserrat Jiménez**

**Tarragona, 2024.**

## Resumen

La digestibilidad de los aceites es relevante debido al uso cotidiano de este ingrediente en todas las cocinas del mundo, los aceites vegetales exhiben una amplia variabilidad en su digestibilidad, que está estrechamente vinculada a su composición química. Algunos aceites pueden ser más bioaccesibles que otros, lo que puede tener repercusiones tanto positivas como negativas en relación con su consumo. La facilidad con la que el cuerpo puede absorber y utilizar los nutrientes presentes en los aceites puede influir en su efectividad y beneficios para la salud, lo que destaca la importancia de comprender y evaluar cuidadosamente la digestibilidad de los aceites vegetales en el contexto de la dieta humana. El presente estudio tuvo como objetivo comparar la digestibilidad de diez tipos de aceites vegetales mediante simulación digestiva *in vitro*. Se evaluaron, tanto el aceite virgen extra de aguacate, aceite virgen extra de oliva en variedades 'Picual' y 'Arbequina', aceite de oliva suave e intenso, aceite de orujo de oliva, aceite de coco, así como aceites refinados de girasol y alto oleico, y un aceite vegetal profesional mezclado. Se observó que los aceites de oliva virgen extra mostraron una mayor bioaccesibilidad en comparación con otros tipos de aceites, mientras que los aceites refinados, tanto de girasol como mezclado, presentaron una absorción menor. Los resultados sugieren que características como el contenido de polifenoles en los aceites de oliva y el tipo de cadena de ácidos grasos podrían influir en su capacidad de absorción. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la composición química de los aceites vegetales al evaluar su digestibilidad y biodisponibilidad, así como la preferencia de los consumidores según su demografía.

**Palabras clave:** Bioaccesibilidad, aceites, *in vitro*, digestibilidad, polifenoles, preferencia aceites.

## Índice

1. Introducción	
1.1. Aceites vegetales	6
1.1.1. Aceite de aguacate extra virgen	7
1.1.2. Aceite de oliva	7
1.1.3. Aceite de girasol	8
1.1.4. Aceite vegetal con aditivos	9
1.1.5. Aceite de coco virgen	9
2. Hipótesis	10
3. Objetivos	10
4. Materiales y métodos	11
4.1. Muestras objeto de estudio y reactivos.	11
4.2. Preparación de fluidos de digestión simulada.	11
4.3. Experimento de digestión	13
4.3.1. Procedimiento de separación de fases	13
4.4. Análisis de consumidores	15
4.5. procesamiento de datos	15
5. Resultados	15
5.1. Caracterización de los aceites.	15
5.2. Digestión in vitro	16
5.3. Análisis de consumo	21
6. Discusión	22
7. Conclusiones	24
8. Referencias	26
9. Agradecimientos	
10. Abreviaturas	
11. Anexos	

## 1. Introducció

El aceite ha sido un alimento usado por el ser humano hace miles de años, su empleo está presente en todas las cocinas del mundo, no obstante, en la actualidad poco se considera la importancia que tiene el aceite frente a las características de digestibilidad que puedan favorecer la elección adecuada según este atributo y en concordancia con la tolerancia individual, la investigación sobre la repercusión que poseen los aceites en la absorción y digestión humana hasta ahora es incipiente, sin embargo, relevante en la salud gastrointestinal. Esto se debe a que, dependiendo del aceite consumido se puede experimentar síntomas relacionados con la indigestión, (sensación de llenura, diarrea, flatos, distensión abdominal, etc.)[1-2]. Igualmente, puede afectar la adecuada captación de nutrientes[3]. Los factores que afectan este proceso son diversos, incluyendo el método de extracción y refinación del aceite, la sensibilidad individual, condiciones médicas y el tipo de cadena de los ácidos grasos[4] que lo conforman.

Algunos atributos destacables de los aceites están relacionados con la cantidad y calidad antioxidante. Los aceites virgen extra, por ejemplo, se caracterizan por poseer una mayor presencia de compuestos bioactivos, (vitamina A y E, carotenoides, flavonoides, taninos, fenoles y lignanos)[5], en contraposición con los aceites denominados refinados que por lo general contienen escasas o nulas proporciones, a excepción de la vitamina E, que a menudo se añade para prevenir la oxidación de sus compuestos, pudiendo contener la misma cantidad que los virgen extra.

La digestión y absorción humana implica varias fases para degradar los carbohidratos, proteínas y grasas. Los lípidos, considerados un importante macronutriente proveniente de la dieta, confieren un hedonismo innato a los alimentos que lo contienen. Están conformados principalmente por triacilgliceroles, colesterol y en menor cantidad, los denominados fosfolípidos, alactolípidos y ésteres vitamínicos[6]. Los triacilglicéridos (TAG), componente principal de los aceites, comparten una característica común, son insolubles en agua pero solubles en solventes orgánicos. Por lo tanto, requieren de reacciones químicas y físicas para metabolizarse, de modo que puedan ser transportados y biotransformados a nivel celular[7]. Dado que constituyen una interfaz lípido-agua, los lípidos requieren de diversas enzimas catalíticas y procesos fisicoquímicos para favorecer su hidrolización y transformarlos en micelas[8], que posteriormente han de

convertirse en ácidos grasos libres (AGL) y monoacilgliceroles (MAG), para ser absorbidos por las células entéricas y probióticos en proporciones distintas según corresponda al tipo de grasa ingerida. Esto depende de la longitud de cadena e insaturación que posean[9]. La biodisponibilidad de los lípidos conlleva una actividad de transformación inherente al alto valor energético que aportan en la dieta.

La digestión *in vitro* nos permite estudiar, en condiciones gástricas simuladas, las diferentes etapas del aceite una vez ingerido. Estas fases se dividen en oral, gástrica e intestinal (**Figura 2**). Los estudios de digestibilidad *in vitro* presentan varias ventajas sobre los ensayos clínicos en animales y humanos[9]. Este método evita aspectos deontológicos, es más económico, puede ser replicado en estudios *in vivo* y proporciona resultados en un tiempo más breve[10]. Por lo tanto, en el caso de los aceites, nos brinda la posibilidad de observar su comportamiento frente a diferentes mecanismos y compuestos digestivos.

Considerando que el proceso digestivo humano es altamente eficiente y logra absorber hasta un 95% de los lípidos ingeridos[11]. La digestibilidad del aceite *in vivo* comienza con la formación de grandes glóbulos en la boca, donde es expuesto a un ambiente acuoso. Las lipasas linguales presentes en la saliva desempeñan su papel requerido para este proceso, iniciando la primera fase de la degradación del aceite. Sin embargo, su función en este periodo es limitada en comparación con otras etapas de la digestión.

En la fase gástrica, el estómago puede contribuir entre un 5% y un 30% de la desintegración y atomización oleosa gracias a la acción de la lipasa gástrica, junto al pH (2 – 5)[12]. Una vez el pH se hace neutro y en presencia de excreción biliar, la lipasa gástrica tiende a degradarse. El páncreas es el que produce la mayor cantidad enzimática, de esto depende predominante la conversión al estado micelar de los aceites[13]. La lipasa pancreática secretada emulsifica los aceites formando MAG y AGL. Estos productos de la digestión lipídica se desplazan a lo largo del intestino delgado, donde tiene lugar la mayor parte del proceso de digestión de los aceites. Este logro también se produce gracias al peristaltismo, un movimiento muscular rítmico al que está sometido el intestino delgado que favorece la mezcla de alimentos con secreciones intestinales y bilis[14], denominado quilo. En condiciones *in vitro*, este proceso se lleva a cabo mediante un mecanismo de agitación continua, siguiendo los tiempos predefinidos

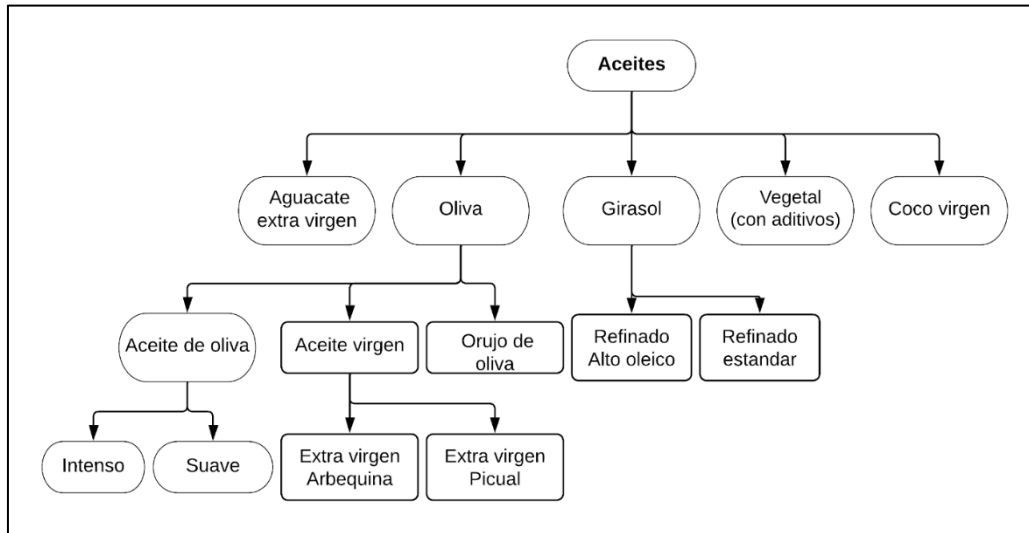
de digestión en las diferentes fases y manteniendo una temperatura análoga de simulación.

Los ácidos grasos saturados e insaturados ingeridos, coinciden en proporción con la cantidad secretada de pancreatina, que es estimulada por señales hormonales de la secretina y colecistoquinina, liberadas en el intestino delgado en respuesta a la presencia de grasas, asegurando así la adecuada interfaz entre el aceite y el agua[15]. La bilis entretanto desempeña un papel fundamental al interactuar con lípidos, grasas y agua. Su naturaleza molecular anfipática le permite realizar esta función de manera eficiente. Esta característica molecular hace posible la transformación de las vesículas multilaminares en vesículas unilaminares[16]. Como resultado de esta transformación, las micelas formadas pueden integrarse de manera más efectiva en la membrana plasmática de los enterocitos, facilitando el proceso de absorción de lípidos y grasas en el tracto gastrointestinal. Por tanto, si la cantidad de bilis y pancreatina excretadas no son suficientes para emulsionar o el tipo de aceite ingerido en su composición es de difícil asimilación, este no será digerido completamente, quedando en el intestino para ser finalmente excretado en las heces. Asimismo, este proceso puede suponer indigestión cuando el aceite contiene componentes producto del refinamiento, que no resultan aprovechables.

### **1.1. Aceites vegetales**

Los aceites presentan características distintas en sus compuestos. Según el tipo de aceite, comportará cambios en la digestión, tanto en la velocidad de la absorción como en la solubilidad de estos lípidos. Debido a que este estudio *in vitro* evita algunos mecanismos que se presentan en el humano, es importante señalar que el vaciamiento gástrico y la posterior contracción de la vesícula biliar para el aprovechamiento de ácidos grasos, será directamente proporcional al tipo de cadena que estos presenten. Los ácidos grasos de cadena larga tienden a ser más lentos en la disolución para transformarse en microgotas que los de cadena media, con mayor biodisponibilidad intestinal[17]. En este proceso, es relevante destacar el tamaño de las gotas de aceite, debido a que gotas más pequeñas tienen mayor superficie activa. Esto permite una mejor adhesión de las lipasas presentes en la solución, generando como resultado una mayor bioaccesibilidad[18]. Por lo tanto, este fenómeno se reflejará en las pruebas de los aceites en estudio y en la

proporción de separación de las diferentes fases, lo cual resulta significativo en el diseño de dietas y la formulación de alimentos. Impacta en la percepción del consumidor en cuanto a la digestibilidad del aceite empleado.



**Figura 1.** Muestra los tipos de aceite utilizados en el estudio.

### 1.1.1. Aceite de aguacate extra virgen

El aceite vegetal derivado del fruto del aguacate (*Persea americana* Mill) se distingue de otros aceites en que no se extrae de la semilla, sino del mesocarpio del fruto. Este proceso se lleva a cabo mediante prensado mecánico a baja temperatura (<50°C), lo que permite conservar intactos los componentes bioactivos, así como el color, sabor y aroma[19] característicos del fruto.

Este aceite presenta un mayor porcentaje en su composición de ácido oleico, palmítico, linoleico y linolénico. En términos de digestibilidad, se presume que, debido a su menor tamaño de gota durante el proceso de emulsión, facilita la acción enzimática[20], por lo tanto, favorece la bioaccesibilidad y permite adecuada metabolización.

### 1.1.2 Aceite de oliva

Este aceite es ampliamente reconocido y utilizado en la cocina de todo el mundo. Según la Comisión Europea y el Consejo Oleícola Internacional, se clasifica en tres categorías: (i) Aceite de oliva virgen (ii) Aceite de oliva (iii) Aceite de oliva refinado[21]. En los aceites empleados para este estudio (**Figura 1**), se incluyen variedades de olivo como 'Picual' y 'Arbequina' en la categoría de aceite virgen extra. Estas dos variedades son reconocidas

como las más importantes del mundo debido a su excelente calidad, carentes de imperfecciones sensoriales y ricas en compuestos bioactivos[22], especialmente fenoles totales, destacados notablemente en la variedad 'Picual'. Los polifenoles y ácidos fenólicos presentes en el aceite virgen extra, en especial los derivados de secoiridoides exclusivos del olivo, son responsables de su distintivo sabor, así como de sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, que contribuyen a los efectos beneficiosos para la salud. Sin embargo, durante el proceso de refinado que da lugar tanto al aceite de oliva como el de orujo, estos compuestos desaparecen en su totalidad, para ser restituidos posteriormente y en cantidad muy pequeña, durante el proceso de mezcla con virgen para su envasado final.

Los aceites de oliva suave e intenso se obtienen mediante la combinación de aceite de oliva virgen extra con aceite de oliva refinado, derivado de aceitunas con defectos, en proporciones variables. Esta mezcla otorga a los aceites resultantes una característica organoléptica distintiva del olivo, a pesar de que el proceso de refinado implica cambios químicos y físicos significativos en el aceite base. En cuanto al aceite de orujo de oliva, se considera un aceite refinado subproducto del olivo y se obtiene mediante procesos químicos y posterior refinado, igualmente posee abundantes compuestos triterpénicos y alcoholes grasos alifáticos. En cuanto a su bioaccesibilidad intestinal, puede alcanzar hasta el 50% del consumo total debido a su método de obtención, siendo este porcentaje generalmente más alto en los aceites de oliva virgen extra[23-24].

Los ácidos grasos contenidos en estos aceites muestran variaciones que son influenciadas por factores como la región específica de cultivo y diversas condiciones ambientales. En España, en particular, tienden a ser más ricos en ácido oleico y a tener un contenido bajo de ácido linoleico-palmítico[25]. En los aceites refinados de oliva también está presente este compuesto, esto se debe en parte, al uso predominante de la variedad 'Picual' como base utilizada en su 'encabezado', lo que contribuye al color y sabor característicos de la mezcla final.

### **1.1.3 Aceite de girasol**

El aceite de girasol refinado estándar en contraste con el girasol alto oleico, tienen como distinción principal que, el segundo se destaca por un elevado contenido de ácido oleico, resultado de mutación genética inducida en las plantas. La extracción del aceite puede

llevarse a cabo mediante procesos mecánicos o mediante el uso de disolventes y posteriormente refinado. Como es el caso del aceite de oliva, el girasol alto oleico se caracteriza por poseer una mayor estabilidad térmica en comparación con la variedad estándar de girasol[26], lo que lo hace uno de los preferidos para uso en frituras. Además, estos aceites son ricos en grasas poliinsaturadas y presentan una proporción significativa de otros ácidos grasos, como el linoleico, palmítico y esteárico, siendo estos dos últimos especialmente aprovechables en términos de biodisponibilidad[27].

#### **1.1.4. Aceite vegetal con aditivos**

Las definiciones de este aceite se ajustan al tipo utilizado en este estudio, el cual consiste en una mezcla de varios aceites vegetales con un alto contenido de ácido oleico, complementado con antiespumantes y antioxidantes. Se caracteriza por tener un sabor neutro y mantener buen equilibrio a altas temperaturas sin generar humo ni formar espuma. Debido a las características químicas y físicas de las materias primas de este aceite, es necesario aplicar mejoras tecnológicas y realizar modificaciones que permitan el uso seguro en alimentos. Estas mejoras se logran mediante métodos como la hidrogenación, interesterificación, fraccionamiento y mezcla[28]. Estos procesos conllevan a que estas grasas transformen su composición química, principalmente en los enlaces dobles, pasando de la configuración cis a la trans. Este tipo de composición repercute negativamente sobre la salud, provocando diversas patologías[29]. En términos de digestibilidad, estos aceites suelen mostrar un comportamiento variable que depende de la composición específica de la mezcla con otros aceites y el proceso de refinamiento empleado.

#### **1.1.5 Aceite de coco virgen**

El aceite de coco se extrae del fruto maduro de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.), proporciona dos tipos de aceite de grasa saturada, obtenidos de fuentes diferentes: el aceite de coco o copra, que se deriva de la pulpa seca del coco y se somete a un proceso de refinado; mientras que el aceite de coco virgen proviene de la pulpa fresca del coco y no se somete a calor ni a procesos químicos, lo que preserva el sabor, color y aroma característicos del fruto[30]. Este último tipo de aceite presenta una mayor cantidad de nutrientes, entre los que destacan la vitamina A y E, flavonoides, compuestos bioactivos como los polifenoles, ácido láurico, ácido cafeico, ácido siríngico, entre otros.

Se caracteriza por su resistencia a la oxidación y polimerización durante la cocción[31]. Su componente principal es el ácido láurico, clasificado como un ácido graso de cadena media. En términos de digestión, se considera que el ácido láurico tiene una mejor solubilidad que los ácidos grasos de cadena larga en la fase acuosa del intestino[7].

La digestibilidad de los aceites es crucial para la salud humana, influye tanto en la absorción de nutrientes como en la salud gastrointestinal. Aunque se ha investigado sobre la biodisponibilidad de los aceites, aún existe escasez en estudios comparativos que permitan conocer estas diferencias entre los aceites vegetales, ya sean vírgenes, extra vírgenes o refinados. La interferencia directa de las grasas en la digestión y los posibles síntomas digestivos desagradables asociados con el consumo de alimentos preparados con diversos tipos de aceites, ya sea como ingrediente o medio de cocción, plantea un desafío para la satisfacción del consumidor y la reputación de los establecimientos. Comprender cómo estos factores afectan la experiencia de las personas permitirá el desarrollo de estrategias efectivas para optimizar la selección y uso del aceite. Esto proporcionará información valiosa para la industria alimentaria, que siempre enfrenta la presión constante de mantener un equilibrio entre la calidad de sus productos, la satisfacción del cliente y la rentabilidad económica.

## **2. Hipótesis**

Se plantea que los aceites refinados presentan una menor digestibilidad en comparación con los aceites vírgenes extra. Además, se postula que existe una diferencia significativa en la tasa de absorción entre los distintos tipos de aceite.

## **3. Objetivos**

- Evaluar la digestibilidad in vitro de diversos tipos de aceites, con especial atención en comparar la digestibilidad entre aceites refinados y aceites vírgenes extra.
- Identificar los tipos de aceites que exhiben una mayor o menor capacidad de digestión, para comprender mejor las diferencias en la digestibilidad entre distintos tipos de aceites y su posible impacto en la absorción de lípidos en el organismo humano.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1. Muestras objeto de estudio y reactivos.

El estudio emplea diez tipos de aceites, cada uno con tres muestras de 60 ml, obtenidas a partir de frutos y semillas. Los aceites seleccionados son: aceite de aguacate virgen extra (AAVE) de la variedad 'Hass' de marca Perseus, aceite virgen coco (AVC) marca Hacendado, adquiridos en un establecimiento de cadena de supermercados, aceite de oliva virgen extra (AOVE I) de la variedad 'Picual' de marca Oro de Cánava, aceite de oliva virgen extra (AOVE II) de la variedad 'Arbequina' de marca Nia Torrebesses, aceite de oliva suave (AOS) e intenso (AOI) de marca Manolete, aceite de orujo de oliva (AOO) de marca Dulceoliva, aceite refinado de girasol (ARG) y aceite refinado de girasol alto oleico (ARGAO) 80%, ambos de marca Amaflor, y aceite vegetal profesional mezclado (AVPM) de alto rendimiento de marca Manolete, proporcionados por IRTA Mas Bové.

Las enzimas digestivas empleadas en este estudio fueron de la marca Sigma-Aldrich (Saint Louis, MO, USA), que incluyeron  $\alpha$ -amilasa > 400 U/mg (A6814-1MU), pepsina de mucosa gástrica porcina liofilizada en polvo > 2.500 U/mg de proteína (P7125), ácidos biliares en mezcla de bovino y ovino > 50% (B8381) y pancreatina con actividad equivalente 8X\*U (P7545). Se aplica el protocolo estandarizado internacional INFOGEST[32], con adaptaciones menores inherentes al diseño del estudio.

Para las tres etapas de digestión (fase oral SSF, fase gástrica SGF, fase intestinal SIF), se preparan tres fluidos de simulación a un volumen total de 500mL. Todos los reactivos utilizados fueron procesados en el laboratorio de IRTA Fruitcentre (Lleida), tal como están descritos en el protocolo *in vitro* utilizado, INFOGEST[32].

### 4.2. Preparación de fluidos de digestión simulada.

Las pruebas de digestibilidad se realizaron en los laboratorios IRTA-Fruitcentre (Lleida) del Departamento de Fruticultura. Las muestras congeladas se llevaron al IRTA-Mas Bové (Constantí) donde se atemperaron y centrifugaron y pesaron las diferentes fases obtenidas.

Durante el proceso experimental, los fluidos de simulación fueron mantenidos a una temperatura de 37°C utilizando un baño termostático para replicar las condiciones de temperatura corporal. Para la fase oral, se prepararon muestras de aceite colocando 5g

en matraces de Erlenmeyer de 150mL, los cuales se mantuvieron en hielo hasta su utilización. En esta etapa, cada muestra de aceite se mezcló con 3.5mL de SSF y se homogeneizó utilizando un agitador de vórtex (Genie temp-shaker 300, Thermo Scientific, Moses Lake, USA.) durante 30 segundos. Posteriormente, se adicionaron 0.5mL de  $\alpha$ -amilasa, así como 25 $\mu$ L de una solución de  $\text{CaCl}_2$  (0.3M) y 975 $\mu$ L de agua desionizada, los cuales fueron mezclados adecuadamente. Finalmente, se tomó 1mL de cada muestra y se transfirió a tubos eppendorf de 2mL, los cuales fueron almacenados a  $<80^\circ\text{C}$  para su posterior análisis.

En la fase gástrica del proceso experimental, se añadieron 7.5 mL de SGF a la mezcla inicial. A esta solución se le incorporó 1.6 mL de pepsina porcina y 10  $\mu$ L de una solución de  $\text{CaCl}_2$  (0.15 M). Posteriormente, se adiciono 0.690 mL de agua desionizada para completar el volumen necesario. Aunque en los estudios *in vivo* está presente la lipasa gástrica que tiene una función importante en emulsionar las grasas, en este estudio *in vitro*, el método estático estandarizado INFOGEST no hace uso de esta lipasa debido a la poca fiabilidad de las fuentes existentes y su limitado uso comercial[18]. La mezcla resultante fue incubada con agitación continua utilizando la incubadora orbital (Genie temp-shaker 300, Thermo Scientific, Moses Lake, USA.) a 150 rpm durante un período de 2 horas a una temperatura constante de  $37.0^\circ\text{C}$ . Durante la incubación, se monitoreó el pH cada 30 minutos para asegurar que se mantuviera en 3.0, realizando ajustes con HCl 1M o NaOH 1M según fuera necesario. Transcurridas 2 horas desde el inicio de la incubación, se extrajeron 10 mL de muestra para su análisis posterior y se almaceno en el congelador a  $-80^\circ\text{C}$ , mientras el resto de la muestra se utilizó para la fase intestinal.

Para la fase intestinal del experimento, se combinó el quimo simulado con 62.5mL de pancreatina porcina, 1.25mL de bilis bovina, 20 $\mu$ L de una solución de  $\text{CaCl}_2$  (0.3M), 0.145mL de NaOH de concentración 1M para ajustar el pH a 7.0 y 0.585mL de agua desionizada para completar el volumen necesario. La mezcla resultante fue incubada con agitación continua con la incubadora orbital a 150 rpm durante un periodo de 4 horas a una temperatura de  $37.0^\circ\text{C}$ . Durante la incubación, se añadió HCl 1M cada 30 minutos para mantener el pH en 7.0, verificándolo regularmente. Una vez completada la incubación, los matraces Erlenmeyer fueron retirados de la estufa y colocados en un recipiente con hielo para detener la actividad enzimática. Se extrajeron 10mL de cada

muestra y se transfirieron a tubos falcón de 15mL, los cuales fueron almacenados en el congelador a  $-80^{\circ}\text{C}$  para su conservación hasta su análisis posterior.

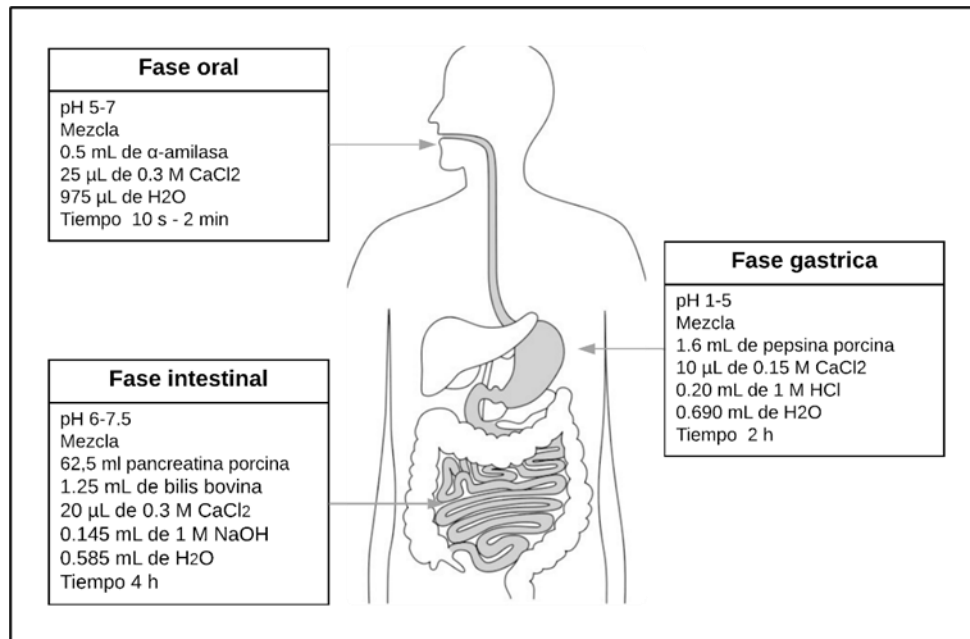


Figura 2. Diseño de simulación digestiva *in vitro*. Método internacional INFOGEST.

### 4.3. Experimento de digestión

Para estudiar el comportamiento de los aceites durante las diferentes etapas de la digestión y simular su proceso *in vivo*, se observa la extensión de la lipólisis en la boca, el estómago y el intestino delgado (saliva, jugo gástrico, bilis y jugo duodenal) de las mezclas previamente descritas. En contraste con otros estudios[33], donde estas mezclas se procesan de inmediato, en este caso se almacenan y mantienen congeladas a  $-80^{\circ}\text{C}$  hasta el momento del procedimiento de separación de fases.

#### 4.3.1. Procedimiento de separación de fases

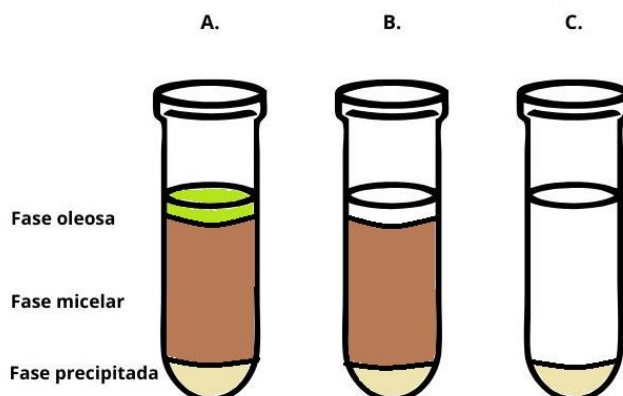
El proceso experimental comienza extrayendo los tubos de muestra del congelador. En el caso de las muestras de SIF, se transfieren a refrigeración durante un período de 12 horas antes de su procesamiento. Posteriormente, cada una de las muestras de las fases se deja a temperatura ambiente durante diferentes periodos de tiempo para garantizar la completa liquidez del contenido. Luego, se colocan en un baño termostático hasta alcanzar una temperatura interna de  $37^{\circ}\text{C}$ , utilizando una muestra de agua como

referencia para el ajuste de la temperatura. Los detalles sobre las temperaturas y los tiempos de atemperado para cada fase se presentan en la (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** *Temperatura y tiempos antes de centrifugar.*

Fases	Atemperado	Baño termostático
SSF	20 min	30 min
SGF	40 min	60 min
SIF	60 min*	120 min

Una vez completados estos pasos, los tubos se transfieren a una centrifugadora (Thermo Scientific, Ulm, Alemania) y se centrifugan a 3.441-rpm durante 40 minutos[33]. Posteriormente, se procede a la extracción de la fase oleosa en las muestras en fase salival y fase gástrica, mientras que en el caso de fase intestinal se extraen tres fases (oleosa, micelar y precipitada) utilizando una micropipeta, guardando tanto fracciones sobrenadantes (bioaccesibles) como residuales, siguiendo el procedimiento detallado en la (**Figura 3**). Se registra el peso de cada una de las fases extraídas para su posterior análisis.



**Figura 3.** *Proceso de extracción de las muestras. A. Después de la centrifugación, las fases se separan. B. Se extrae la fase oleosa. C. Se extrae la fase micelar (Bioaccesible).*

Además, los aceites (AAVE, AVC, AOVE I, AOVE II) fueron sometidos a estudio por parte del laboratorio agroalimentario (Departamento de acción climática, alimentación y agenda rural de la Generalitat de Catalunya) para identificar el perfil de ácidos grasos de cada

uno y adicionalmente, se analizó y determinó el contenido fenólico total de los aceites (AAVE, AOVE I, AOVE II, AOS, AOI, AOO), mediante el método de Folin-Ciocalteu.

#### 4.4. Análisis de consumidores

Se llevó a cabo una encuesta dirigida a cincuenta individuos en el Parc Rural del municipio EL Bruc, Cataluña y 59 personas de población colombiana. La encuesta constaba de cinco preguntas (**ver anexos**), diseñadas para indagar sobre las preferencias de elección de aceites para su uso en cocina, tanto en crudo como en cocción, así como las sensaciones experimentadas durante su consumo, en relación con la digestibilidad. Los datos recopilados fueron sometidos a un análisis estadístico detallado para obtener conclusiones.

#### 4.5. Procesamiento de datos

Para caracterizar los aceites en sus diferentes fases y comparar la bioaccesibilidad de los mismos se utilizó un software JMP V.16 (Cary, USA). Se calculó bajo método estadístico ANOVA si las diferencias observadas entre aceites son significativas con un valor de  $p \leq 0,05$ . De acuerdo con el peso obtenido en cada muestra, se tomó un acumulado de tres muestras para el análisis de cada aceite y se midieron los porcentajes de dos resultados (sobrenadante y residual) en la fase oral y gástrica, mientras que en la intestinal se midieron tres fases (oleosa, micelar y precipitado).

$$\text{Porcentaje de absorción} = \left( \frac{\text{Cantidad absorbida} - \text{Cantidad inicial}}{\text{Cantidad inicial}} \right) \times 100\%$$

En el estudio de preferencias de los consumidores en aceites se usó el método estadístico de análisis de distribución.

## 5. Resultados

### 5.1. Caracterización de los aceites.

Previo al procesamiento del estudio *in vitro* de los aceites se realizó la identificación de los diferentes ácidos grasos y contenido total de polifenoles, en algunos de ellos. En la (**Tabla 2**), se muestran los resultados obtenidos, revelando notables diferencias en la

composición de compuestos para cada uno de los aceites analizados. Sin embargo, es importante destacar que los aceites ARG, ARGAO, AVPM, no fueron considerados en este análisis, dado que la composición de PUFAS ya ha sido completamente identificada y no presentan compuestos fenólicos en su contenido.

**Tabla 2.** Caracterización de los aceites del estudio.

Aceite	Ácidos grasos (%)						Polifenoles totales (mg/kg) *
	Oleico C18:1	Linoleico C 18:2	Palmítico C16:0	Palmitoleico C 16:1	Láurico C 12:0	Mirístico C 14:0	
<b>AAVE</b>	63.81	9.39	17.92	7.0			11 ± 2
<b>AVC</b>	4.48		7.42		49.30	19.32	-
<b>AOVE I</b>	81.49	4.01	8.62				516 ± 64
<b>AOVE II</b>	66.39	14.08	13.65	1.97			65 ± 11
<b>AOS</b>	73.16	7.95	11.65	1.04			44 ± 8
<b>AOI</b>	76.70	6.10	10.57				46 ± 8
<b>AOO</b>	70.96	11.00	12.04				11 ± 2
<b>ARG</b>	27.25	61.28	6.02				
<b>ARGAO</b>	83.90	8.4	3.25				
<b>AVPM</b>	34.82	53.69	5.79				

\* Este valor está referenciado en base al ácido cafeico.

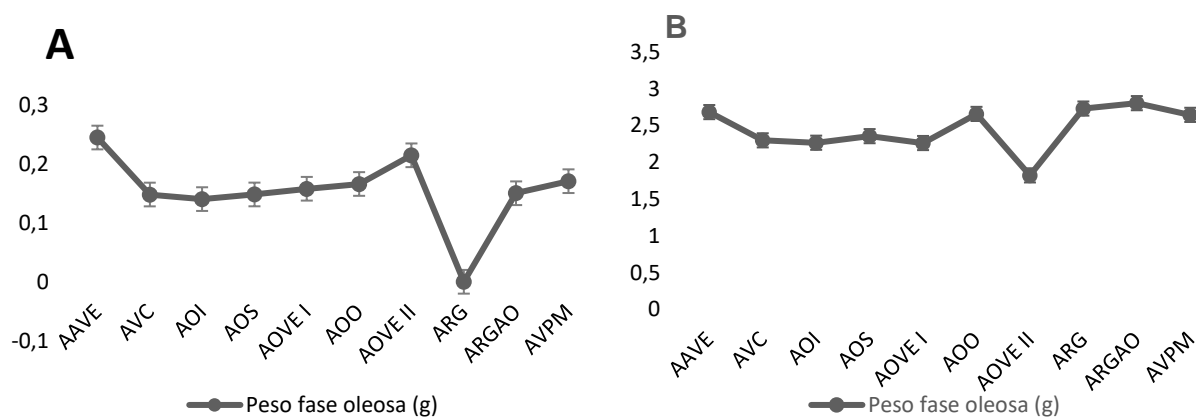
## 5.2. Digestión in vitro

El proceso de digestión simulada se realizó mediante la comparación del contenido inicial de aceite (5g) con la mezcla resultante después de simular la fase oral y gástrica, con adición enzimática. Este enfoque permitió analizar la degradación y modificación de los aceites durante la simulación en contraste con el proceso digestivo humano. Aunque solo la SIF proporciona información específica debido a la asociación lipásica con efecto en los aceites estudiados, las fases previas nos ofrecen perspectivas sobre cómo los aceites interactúan con los líquidos simulados relacionados con la digestión, causando cambios. Durante la simulación de la SSF (**Figura 4**), se observó un comportamiento diferencial entre los aceites estudiados, en algunos se obtuvo un resultado cero, debido a la dificultad de separación de la muestra, mientras en otros no se observó ninguna diferenciación de fase. Se encontró que el AAVE exhibió una mayor predominancia en fase continua (A/W), mientras que el ARG mostró una mayor presencia en fase dispersa (W/A) en términos de

emulsión. Estos resultados sugieren una variabilidad en la interacción de los aceites con el ambiente oral simulado de líquido salival, lo que puede influir en efectos fisiológicos posteriores.

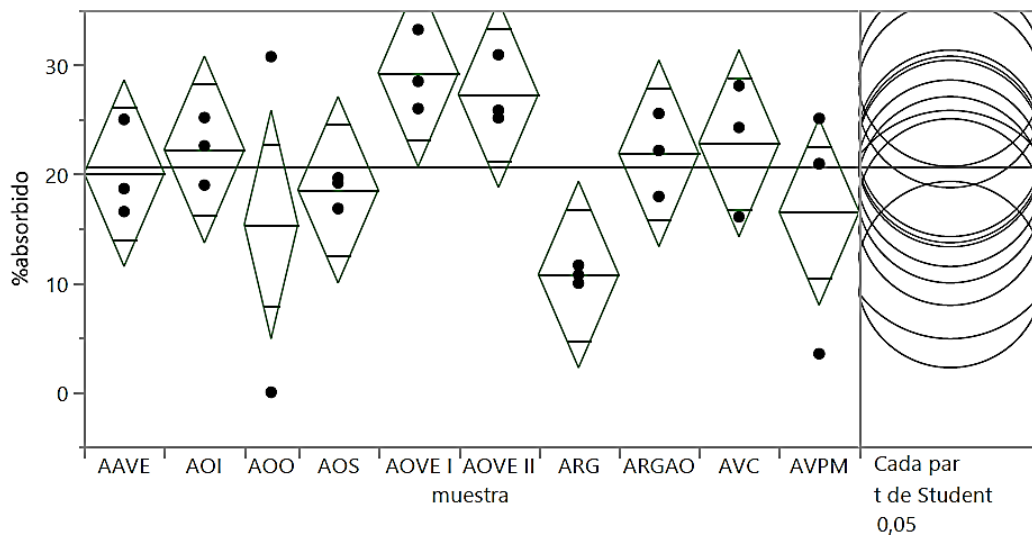
A pesar de las observaciones distintivas en cuanto a la emulsión de los aceites durante la simulación de la SSF, es importante destacar la potencial variabilidad y complejidad en la digestión *in vivo*, incluso con la estandarización del método utilizado. Se observó que, en algunos casos, aceites pertenecientes al mismo grupo no mostraron un comportamiento uniforme durante la simulación. Estas variaciones individuales podrían estar influenciadas por factores como la composición específica del aceite, el proceso mecánico de laboratorio o de la mezcla de líquido salival.

Durante la simulación de la SGF (**Figura 4**), se observó un comportamiento diferencial de los aceites en comparación con la fase anterior (SSF). A pesar de que el AAVE continuó mostrando una predominancia en fase continua (A/W), se identificaron otros aceites que siguieron una tendencia similar, incluyendo el AOO, el ARG, ARGAO y el AVPM. Sin embargo, el AOVE II mantuvo una tendencia declive en comparación con la observada en la fase anterior. Estos resultados indican una respuesta variable de los aceites a las condiciones *in vitro* de la fase gástrica, teniendo en cuenta que en esta fase existe adición enzimática.



**Figura 4.** Variabilidad en la emulsión de los aceites. **A.** Fase oral **B.** Fase gástrica.

En el proceso de separación de fases de SIF (**Figura 5**), se muestra una diferencia significativa en la cantidad total de alícuota respecto a la fase oleosa final entre los aceites virgen extra (AOVE I y II) y los aceites refinados (ARG, AVPM y AOS). En el análisis estadístico, se observa una tendencia en los aceites virgen extra a tener una mayor absorción en comparación al grupo los aceites refinados (**Figura 5**). Sin embargo, se destaca una excepción notable en el caso de AOO, el cual mostró un comportamiento variable entre las muestras estudiadas. Mientras una muestra presento una proporción de aceite no absorbido, las otras fueron absorbidas en su totalidad en la fase intestinal. Estos hallazgos sugieren una diversidad en la absorción intestinal del AOO en comparación con otros tipos de aceites, lo que podría tener implicaciones en términos de biodisponibilidad y metabolismo de nutrientes.



**Figura 5.** A la izquierda, análisis estadístico ANOVA del porcentaje de absorción de los aceites en fase intestinal y a la derecha test *t* de Student.

Se evidencio en el estudio que existe una similitud apreciable en la absorción entre el ARGAO y el AOI. Ambos aceites exhibieron perfiles de absorción comparables durante la simulación digestiva *in vitro*. Esta similitud puede atribuirse en gran medida a la presencia de cadenas de ácidos grasos similares[34], especialmente ácido oleico. Dada

la naturaleza estructural común, es plausible que compartan características similares de biodisponibilidad en el tracto digestivo.

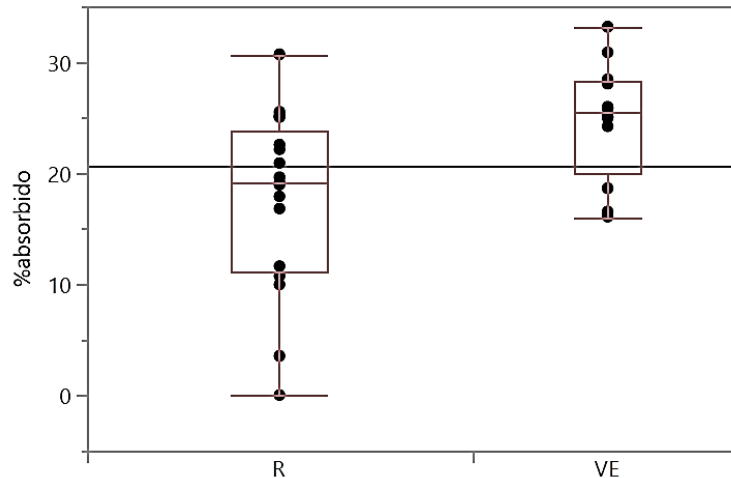
Además, los resultados indican que el AVC demostró una bioaccesibilidad *in vitro* bastante aceptable en comparación con el resto de los aceites estudiados. Aunque su absorción no alcanzó los niveles observados en los aceites de oliva virgen extra, el AVC exhibió una absorción significativa durante la simulación digestiva. Este resultado podría atribuirse a la presencia de ácidos grasos específicos, como el ácido láurico, linoleico y mirístico. Estos, han demostrado en estudios previos un considerable porcentaje de absorción en el tracto digestivo[35], lo que podría explicar en parte la capacidad de bioaccesibilidad del AVC observada en este estudio.

**Tabla 3.** *Test t de Student para la comparación de la absorción de las muestras.*

Aceites	Relevancia estadística			Absorción Media (%)
<b>AOVE I</b>	A			29,22
<b>AOVE II</b>	A	B		27,28
<b>AVC</b>	A	B	C	22,79
<b>AOI</b>	A	B	C	22,23
<b>ARGAO</b>	A	B	C	21,86
<b>AAVE</b>	A	B	C	20,05
<b>AOS</b>	A	B	C	18,54
<b>AVPM</b>		B	C	16,50
<b>AOO</b>		B	C	15,36
<b>ARG</b>			C	10,78

*Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos ( $p=0.05$ ).*

El AAVE no mostró el nivel esperado de absorción, contrariamente a las expectativas previas. Aunque este aceite se reconoce por su composición nutricionalmente beneficiosa y sus ácidos grasos saludables, su desempeño en términos de biodisponibilidad no se destacó como uno de los más altos entre los aceites estudiados. Es esencial reconocer las propiedades positivas del aceite de aguacate, incluyendo su perfil lipídico y sus demostrados efectos beneficiosos para la salud[36]. Sin embargo, estos hallazgos sugieren que otros aceites podrían ofrecer una mejor absorción durante la digestión, lo que tiene implicaciones importantes para la elección y recomendación de aceites en la dieta.



**Figura 6.** Comparativa de grupos de aceites (R) refinados y (VE) virgen extra con relación al porcentaje de absorción de la fase intestinal. Diagramas boxplot donde los límites superior e inferior de las cajas corresponden a los percentiles 75% y 25% respectivamente; los límites de las barras indican al último valor observado por debajo de 1.5 veces la desviación estándar.

La separación de fases igualmente reveló una clara disparidad entre los aceites refinados y los aceites virgen y virgen extra en la fase precipitada de la simulación intestinal (**Figura 6**). Se observó que, mientras los aceites virgen y extra mantuvieron un precipitado que conservó su turbidez con compuestos líquidos, los aceites refinados mostraron un comportamiento notablemente diferente. Tras el proceso de centrifugación, los aceites refinados se aglutinaron hasta solidificar en fase precipitada. Estos hallazgos resaltan diferencias en la estructura y composición de estos tipos de aceites, teniendo en cuenta que, en algunos, se emplean sustancias químicas para su extracción o coadyuvantes para la estabilidad de sus compuestos[37], lo que puede tener implicaciones en el comportamiento la digestión *in vitro* y biodisponibilidad en el organismo humano.

**Tabla 4.** Análisis de contrastes para evaluar diferencias de absorción intestinal entre los aceites.

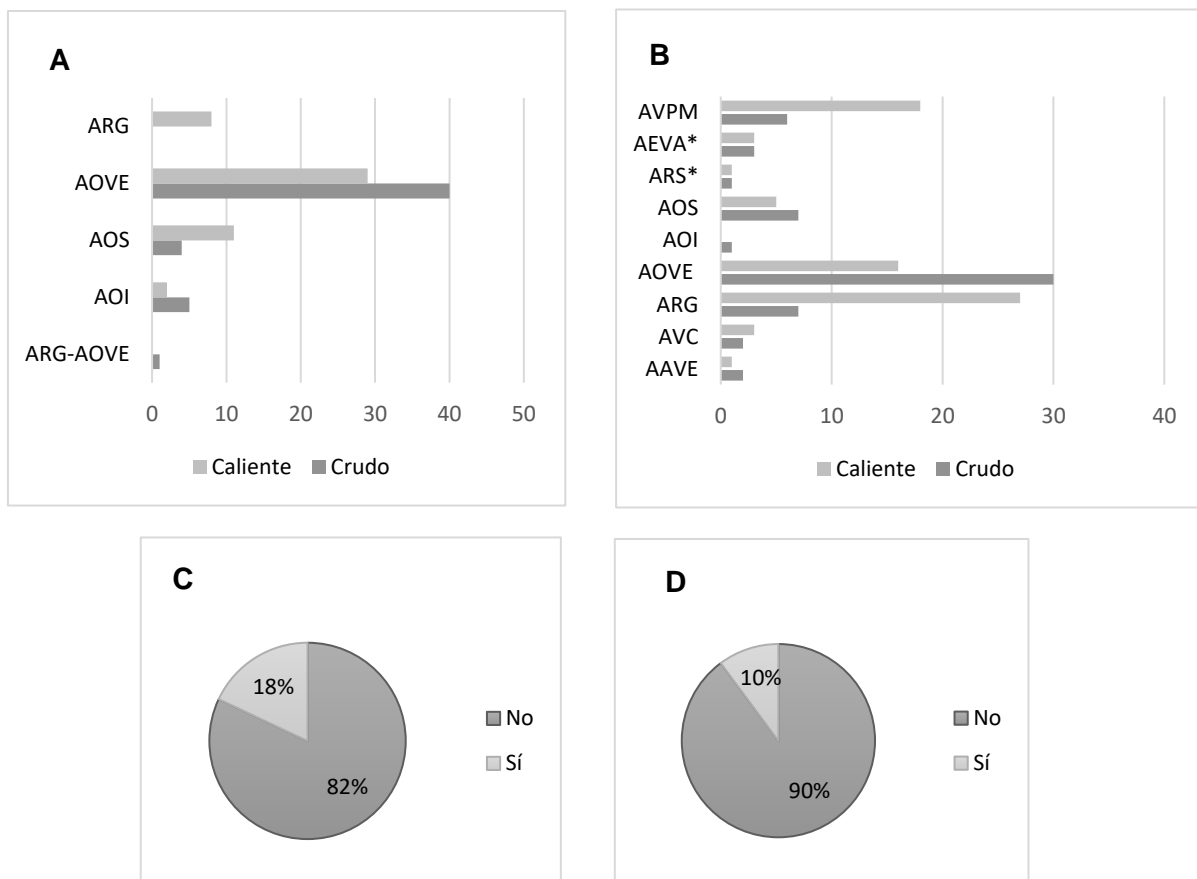
Factor	GL	SCT	SMC	F	p-valor
<b>Modelo</b>	9	792.1211	88.0135	1.7632	0.1426
<b>Error</b>	19	948.3952	49.9155		
<b>Total</b>	28	1740.5162			

GL (Grados de Libertad), SCT (Suma de Cuadrados Total), SMC (Suma de Cuadrados Medios), F (Razón F), la razón F (1.7632) y el p-valor (0.1426) sugieren que no hay una diferencia significativa en general entre los grupos a nivel del modelo completo.

### 5.3. Análisis de consumo

En la encuesta realizada, que contó con la participación de 109 personas de dos grupos poblacionales diferentes, se obtuvo una clara preferencia por el AOVE tanto en los procesos que implican calor como en consumo en crudo en la población El Bruc. Mientras tanto, en Colombia, la preferencia del AOVE se mantuvo en crudo, sin embargo, en caliente destacaron más los aceites refinados (ARG, AVPM) (**Figura 7**). Este hallazgo sugiere los tipos de aceite de uso cotidiano en estas regiones.

En cuanto a la incidencia de síntomas de molestias gastrointestinales relacionados con el consumo de aceites, aunque no logró alcanzar el 20% (**Figura 7**). Los encuestados reportaron experimentar estos síntomas exclusivamente con el consumo de aceites refinados. Estos resultados proporcionan información relevante sobre los patrones de consumo de aceites y el posible impacto en la salud digestiva de la población.



**Figura 7.** Resultados de la encuesta de aceites. **A.** Preferencia de consumo en crudo y en caliente población del municipio el Bruc, Cataluña. **B.** Preferencia de consumo en crudo y en caliente población de Colombia. \*AEVA aceite extra virgen de ajonjolí, ARS aceite refinado de soja. **C.** Porcentaje de población que manifiesta sentir molestias digestivas relacionadas al consumo de aceites en EL Bruc, Cataluña. **D.** Porcentaje de población que manifiesta sentir molestias digestivas relacionadas al consumo de aceites en Colombia.

## 6. Discussión

El enfoque del estudio *in vitro* se dirige hacia la comprensión de las diferencias en la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de los aceites durante el proceso de digestión humana. Los resultados obtenidos en esta investigación apoyan la premisa de que ciertos aceites muestran una mayor capacidad de absorción en comparación con otros. Por ejemplo, el aceite de oliva virgen extra (AOVE I y II), caracterizado por su rica y variada composición de polifenoles (**Tabla 2**), como la oleuropeína, un secoiridoide exclusivo de la familia Oleaceae[38], demuestra una capacidad notable de ser absorbido durante la digestión[39] en comparación con otros tipos de aceites que tienen una concentración más escasa de los mismos[40] (AVC, AAVE, AOS, AOO y AOI), o carecen de estos compuestos[41] (ARG, ARGAO y AVPM).

Estos hallazgos resaltan la importancia de la composición fenólica en la determinación de la biodisponibilidad de los aceites de oliva y sugieren que los consumidores pueden beneficiarse de una mayor absorción de nutrientes cuando optan por AOVE de alta concentración de compuestos bioactivos[42]. También se debe considerar que el comportamiento variable observado en el AOO en nuestro estudio sugiere que factores adicionales pueden influir en la absorción intestinal del aceite, lo que requeriría una mayor investigación para comprender completamente su impacto en la digestibilidad.

La glicación de los aceites es un proceso que ocurre cuando se someten a altas temperaturas durante la cocción o fritura, especialmente en presencia de alimentos ricos en azúcares. Sí bien en este estudio no se efectuaron pruebas en los aceites para ver esta interacción, sí es importante destacar que en términos de digestibilidad los azúcares de los alimentos reaccionan con los lípidos del aceite, formando productos finales de glicación avanzada (AGEs)[43]. Estos compuestos no solo afectan el sabor, color e incluso la textura de los alimentos, sino que también puede alterar la estructura y la disponibilidad de los nutrientes en los alimentos, lo que podría afectar la absorción de estos en el tracto gastrointestinal.

Por tanto, al considerar la elección del aceite para el consumo diario, es importante tener en cuenta no solo la digestibilidad intrínseca del aceite, sino también su susceptibilidad a la glicación y la formación de AGEs durante el proceso de cocción o fritura, debido a que esto genera formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) e inflamación

gastrointestinal[44-45]. Aun se requiere más investigación para comprender completamente el impacto de la glicación en la digestibilidad de los aceites y la salud en general y poder mitigar los efectos negativos de este proceso en la dieta humana.

Además, se debe destacar que, durante el proceso de digestión de los aceites comestibles, las reacciones antes mencionadas no solo afectan a los ácidos grasos principales, sino también a los componentes menores del aceite. Los atributos y características de estos componentes influyen en el proceso digestivo de manera significativa[46]. Como ya es bien sabido, los aceites actúan como vehículos de vitaminas y compuestos bioactivos. Por lo tanto, es fundamental que la bioaccesibilidad de estos componentes menores sea lo más alta posible, ya que pueden tener efectos importantes en la salud humana. Una adecuada elección del aceite puede generar mayor nivel de bioaccesibilidad al favorecer su absorción en el tracto gastrointestinal y por lo tanto, potenciar los posibles beneficios a la salud de estos compuestos.

Es relevante destacar que, teniendo en cuenta que los AOVE, AAVE, AVC, presentan una mayor resistencia y estabilidad en sus compuestos durante el proceso de fritura[47] en comparación con los aceites refinados[48]. Específicamente, se ha observado el AOVE en diversos estudios[49] que, en cuanto a la degradación de sus compuestos después de múltiples usos, puede ser reutilizado sin experimentar una degradación significativa en sus propiedades. Ofrece una ventaja económica al permitir la reutilización del aceite, también puede contribuir a evitar síntomas desagradables en la digestión y reducir el riesgo de toxicidad relacionada con la formación de acrilamida durante la fritura de alimentos ricos en glúcidos[49], que pueda afectar la biodisponibilidad de otros compuestos alimenticios que acompañan al aceite en preparaciones de fritura.

Por otro lado, los aceites refinados (AVPM y ARG), al observar la formación de residuos de precipitado con solidificación *in vitro*, conduce a que, en términos de digestión humana, podría afectar la absorción de nutrientes y salud intestinal[50]. Es importante destacar la fragilidad de las microvellosidades intestinales (cilios y flagelos), así como el microbioma y células entéricas, que podrían ser sensibles a estos residuos y tener un impacto desfavorable en cuanto a la función digestiva.

A nivel de consumidores, la preferencia observada por parte de los participantes en cuanto a los aceites destaca la influencia inmanente a su demografía y aspectos

culturales en la elección de estos. En particular, se evidencia diferencias de consumo entre regiones como Cataluña y Colombia.

En Cataluña, donde la producción de aceites derivados del cultivo de olivo es ampliamente predominante, los participantes tienden a mostrar una preferencia por el aceite de oliva virgen extra. Esta preferencia podría atribuirse a la arraigada tradición culinaria, donde el aceite de oliva es un ingrediente fundamental en la mayoría de los alimentos elaborados localmente[51]. Por otro lado, en Colombia, donde los aceites refinados de palma o girasol suelen ser más asequibles y populares, la preferencia por estos aceites puede reflejar tanto consideraciones económicas como culturales. Además, la falta de promoción del consumo en caliente del aceite de oliva podría contribuir a una menor aceptación de este producto entre los consumidores, quienes podrían percibir que el calentamiento del aceite de oliva afecta negativamente sus atributos conferidos.

Es importante reconocer que, a pesar del consenso internacional sobre el método *in vitro* utilizado, existen ciertas dificultades que pueden afectar la precisión de este estudio. Una de estas dificultades radica en la complejidad del tracto digestivo humano, que funciona de manera coordinada y cohesionada. Esto puede dificultar la separación de los procesos digestivos y la replicación precisa de las condiciones fisiológicas reales. Además, la discontinuidad de la adición enzimática, los tiempos de exposición al medio, la estática del sistema y la fermentación microbiana en el intestino, junto con un pH no homogéneo[52], son limitaciones adicionales que pueden influir en los resultados y en nuestra comprensión del metabolismo oleico. Estas consideraciones subrayan la necesidad de interpretar nuestros hallazgos con el objetivo de continuar investigando de manera que se pueda mejorar la precisión de los métodos utilizados en futuros estudios.

## 7. Conclusiones

En este estudio, se ha demostrado que los aceites pueden presentar diferencias significativas en términos de digestibilidad y biodisponibilidad, lo cual parece estar influenciado por los compuestos que los conforman. Los resultados obtenidos indican que los AOVE, exhiben una mejor respuesta de absorción en comparación con otros aceites, como es el caso del AVPM y ARG. Esto sugiere que AOVE podrían ser una opción más

favorable en términos de digestión y absorción de lípidos. Por el contrario, en los aceites refinados, existe una posible limitación en su capacidad para ser absorbidos eficientemente por el organismo.

Estos hallazgos refuerzan la hipótesis inicial, debido a que esta información es importante para orientar la selección de aceites en la dieta diaria, con el objetivo de promover una mejor salud digestiva y una mayor biodisponibilidad de nutrientes.

Se sugiere que futuras investigaciones exploren más a fondo los mecanismos subyacentes detrás de estas diferencias en la digestibilidad de los aceites, así como también evalúen su impacto en la salud a largo plazo. Además, es fundamental considerar otros factores, como el procesamiento y el almacenamiento de los aceites, para obtener una comprensión completa de su papel en la salud humana.

## 8. Referencias

- [1] McLaughlin JT, Troncon LEA, Barlow J, Heggie LJ, Thompson DG. Evidence for a lipid specific effect in nutrient induced human proximal gastric relaxation. *Gut* 1998;43:248–51.  
<https://doi.org/10.1136/GUT.43.2.248>.
- [2] Generalidades sobre la malabsorción - Trastornos gastrointestinales - Manual MSD versión para profesionales n.d. <https://www.msmanuals.com/es-es/professional/trastornosgastrointestinales> (accessed March 15, 2024).
- [3] Khosla P. Efectos del aceite de palma en la salud humana. Más allá del perfil de ácidos grasos. *Palmas* 2014;35:59–72. <https://doi.org/10.56866/ISSN.0121-2923>.
- [4] Zumbado ME, Scheele CW, Kwakernaak C. Chemical Composition, Digestibility, and Metabolizable Energy Content of Different Fat and Oil By-Products. *Journal of Applied Poultry Research* 1999;8:263–71. <https://doi.org/10.1093/JAPR/8.3.263>.
- [5] Vista de Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática n.d. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/9575/9371> (accessed March 11, 2024).
- [6] Ljungqvist O. Metabolic Regulation: A Human Perspective. *Clinical Nutrition* 2011;30:133–133. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2010.12.002>.
- [7] Ramírez M, Amate L, Gil A. Absorption and distribution of dietary fatty acids from different sources. *Early Hum Dev* 2001;65:S95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-3782\(01\)00211-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3782(01)00211-0).
- [8] Guerra A, Etienne-Mesmin L, Livrelli V, Denis S, Blanquet-Diot S, Alric M. Relevance and challenges in modeling human gastric and small intestinal digestion. *Trends Biotechnol* 2012;30:591–600. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.08.001>.
- [9] Nieva-Echevarría B, Goicoechea E, Guillén MD. Food lipid oxidation under gastrointestinal digestion conditions: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2020;60:461–78. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1538931>.
- [10] Hur SJ, Lim BO, Decker EA, McClements DJ. In vitro human digestion models for food applications. *Food Chem* 2011;125:1–12. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2010.08.036>.
- [11] Sitrin MD. Digestion and absorption of dietary triglycerides. *The Gastrointestinal System: Gastrointestinal, Nutritional and Hepatobiliary Physiology* 2014:159–78. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8771-0\\_7/COVER](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8771-0_7/COVER).
- [12] Zhang Y, Zhang T, Liang Y, Jiang L, Sui X. Dietary Bioactive Lipids: A Review on Absorption, Metabolism, and Health Properties. *J Agric Food Chem* 2021;69:8929–43. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.1C01369>.
- [13] McQuilken SA. Digestion and absorption. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* 2024. <https://doi.org/10.1016/J.MPAIC.2024.01.009>.
- [14] Infantes-García MR, Verkempinck SHE, Guevara-Zambrano JM, Andreoletti C, Hendrickx ME, Grauwet T. Enzymatic and chemical conversions taking place during in vitro gastric lipid digestion: The effect of emulsion droplet size behavior. *Food Chem* 2020;326:126895. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.126895>.
- [15] Porter CJH, Trevaskis NL, Charman WN. Lipids and lipid-based formulations: optimizing the oral delivery of lipophilic drugs. *Nature Reviews Drug Discovery* 2007 6:3 2007;6:231–48. <https://doi.org/10.1038/nrd2197>.



- [16] Kłosowska K, del Castillo-Santaella T, Maldonado-Valderrama J, Macierzanka A. The bile salt/phospholipid ratio determines the extent of in vitro intestinal lipolysis of triglycerides: Interfacial and emulsion studies. *Food Research International* 2024;187:114421. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2024.114421>.
- [17] Fatouros DG, Mullertz A. In vitro lipid digestion models in design of drug delivery systems for enhancing oral bioavailability. *Expert Opin Drug Metab Toxicol* 2008;4:65–76. <https://doi.org/10.1517/17425255.4.1.65>.
- [18] Tan Y, Zhou H, McClements DJ. Application of static in vitro digestion models for assessing the bioaccessibility of hydrophobic bioactives: A review. *Trends Food Sci Technol* 2022;122:314–27. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.02.028>.
- [19] Tan CX. Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *J Funct Foods* 2019;54:381–92. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2018.12.031>.
- [20] Maldonado A, Riquelme N, Muñoz-Fariña O, García O, Arancibia C. Stability and bioaccessibility of  $\alpha$ -tocopherol-enriched nanoemulsions containing different edible oils as carriers. *LWT* 2023;174:114419. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.114419>.
- [21] Reglamento (UE) N o 1308/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo n.d.
- [22] Bernardini E, Visioli F. High quality, good health: The case for olive oil. *European Journal of Lipid Science and Technology* 2017;119:1500505. <https://doi.org/10.1002/EJLT.201500505>.
- [23] los tipos de aceite de oliva en el diccionario de la lengua española. *Boletín de la Real Academia Española* n.d. <https://revistas.rae.es/brae/article/view/492> (accessed March 13, 2024).
- [24] Ribeiro TB, Campos D, Oliveira A, Nunes J, Vicente AA, Pintado M. Study of olive pomace antioxidant dietary fibre powder throughout gastrointestinal tract as multisource of phenolics, fatty acids and dietary fibre. *Food Research International* 2021;142:110032. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.110032>.
- [25] Boskou D, Blekas G, Tsimidou M. Olive Oil Composition. *Olive Oil: Chemistry and Technology: Second Edition* 2006:41–72. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-88-2.50008-0>.
- [26] González-Rámila S, Mateos R, García-Cordero J, Seguido MA, Bravo-Clemente L, Sarriá B. Olive Pomace Oil versus High Oleic Sunflower Oil and Sunflower Oil: A Comparative Study in Healthy and Cardiovascular Risk Humans. *Foods* 2022;11:2186. <https://doi.org/10.3390/FOODS11152186/S1>.
- [27] White DA, Fisk ID, Makkhun S, Gray DA. In vitro assessment of the bioaccessibility of tocopherol and fatty acids from sunflower seed oil bodies. *J Agric Food Chem* 2009;57:5720–6. [https://doi.org/10.1021/JF9003412/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2009-003412\\_0003.JPEG](https://doi.org/10.1021/JF9003412/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2009-003412_0003.JPEG).
- [28] Hashempour-Baltork F, Torbati M, Azadmard-Damirchi S, Savage GP. Vegetable oil blending: A review of physicochemical, nutritional and health effects. *Trends Food Sci Technol* 2016;57:52–8. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.09.007>.
- [29] Pipoyan D, Stepanyan S, Stepanyan S, Beglaryan M, Costantini L, Molinari R, et al. The Effect of Trans Fatty Acids on Human Health: Regulation and Consumption Patterns. *Foods* 2021, Vol 10, Page 2452 2021;10:2452. <https://doi.org/10.3390/FOODS10102452>.
- [30] Zuknik MH, Nik Norulaini NA, Wan Nursyazreen Dalila WS, Ali NR, Omar AKM. Solubility of virgin coconut oil in supercritical carbon dioxide. *J Food Eng* 2016;168:240–4. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2015.08.004>.
- [31] Wallace TC. Health Effects of Coconut Oil—A Narrative Review of Current Evidence. *J Am Coll Nutr* 2019;38:97–107. <https://doi.org/10.1080/07315724.2018.1497562>.



- [32] Minekus M, Alminger M, Alvito P, Ballance S, Bohn T, Bourlieu C, et al. A standardised static in vitro digestion method suitable for food - an international consensus. *Food Funct* 2014;5:1113–24. <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>.
- [33] Jimenez-Moya B, Martin D, Soler-Rivas C, Barroeta AC, Tres A, Sala R. Acid versus crude oils for broiler chicken diets: In vitro lipid digestion and bioaccessibility. *Anim Feed Sci Technol* 2021;276:114926. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2021.114926>.
- [34] Ye Z, Cao C, Liu Y, Cao P, Li Q. Triglyceride Structure Modulates Gastrointestinal Digestion Fates of Lipids: A Comparative Study between Typical Edible Oils and Triglycerides Using Fully Designed in Vitro Digestion Model. *J Agric Food Chem* 2018;66:6227–38. [https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B01577/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2018-01577D\\_0007.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B01577/ASSET/IMAGES/LARGE/JF-2018-01577D_0007.JPEG).
- [35] Prasadani WC, Senanayake CM, Jayathilaka N, Ekanayake S, Seneviratne KN. Effect of three edible oils on the intestinal absorption of caffeic acid: An in vivo and in vitro study 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179292>.
- [36] Cervantes-Paz B, Yahia EM. Avocado oil: Production and market demand, bioactive components, implications in health, and tendencies and potential uses. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2021;20:4120–58. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12784>.
- [37] Mishra SK, Belur PD, Iyyaswami R. Use of antioxidants for enhancing oxidative stability of bulk edible oils: a review. *Int J Food Sci Technol* 2021;56:1–12. <https://doi.org/10.1111/IJFS.14716>.
- [38] Lu Y, Zhao J, Xin Q, Yuan R, Miao Y, Yang M, et al. Protective effects of oleic acid and polyphenols in extra virgin olive oil on cardiovascular diseases. *Food Science and Human Wellness* 2024;13:529–40. <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250047>.
- [39] Duque-Soto C, Quirantes-Piné R, Borrás-Linares I, Segura-Carretero A, Lozano-Sánchez J. Characterization and Influence of Static In Vitro Digestion on Bioaccessibility of Bioactive Polyphenols from an Olive Leaf Extract. *Foods* 2022;11:743. <https://doi.org/10.3390/FOODS11050743/S1>.
- [40] Zeng YQ, He JT, Hu BY, Li W, Deng J, Lin QL, et al. Virgin coconut oil: A comprehensive review of antioxidant activity and mechanisms contributed by phenolic compounds. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2024;64:1052–75. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2113361>.
- [41] Zeb A. A comprehensive review on different classes of polyphenolic compounds present in edible oils. *Food Research International* 2021;143:110312. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2021.110312>.
- [42] Rodríguez-López P, Lozano-Sanchez J, Borrás-Linares I, Emanuelli T, Menéndez JA, Segura-Carretero A. Structure–Biological Activity Relationships of Extra-Virgin Olive Oil Phenolic Compounds: Health Properties and Bioavailability. *Antioxidants* 2020, Vol 9, Page 685 2020;9:685. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9080685>.
- [43] Chhabra A, Bhatia A, Ram AK, Goel S. Increased advanced glycation end product specific fluorescence in repeatedly heated used cooking oil. *J Food Sci Technol* 2017;54:2602–6. <https://doi.org/10.1007/S13197-017-2682-9/FIGURES/2>.
- [44] Moura FA, Goulart MOF, Campos SBG, da Paz Martins AS. The Close Interplay of Nitro-Oxidative Stress, Advanced Glycation end Products and Inflammation in Inflammatory Bowel Diseases. *Curr Med Chem* 2018;27:2059–76. <https://doi.org/10.2174/0929867325666180904115633>.
- [45] Phuong-Nguyen K, McNeill BA, Aston-Mourney K, Rivera LR. Advanced Glycation End-Products and Their Effects on Gut Health. *Nutrients* 2023, Vol 15, Page 405 2023;15:405. <https://doi.org/10.3390/NU15020405>.



- [46] Martin-Rubio AS, Sopelana P, Guillén MD. Influence of minor components on lipid bioaccessibility and oxidation during in vitro digestion of soybean oil. *J Sci Food Agric* 2019;99:4793–800. <https://doi.org/10.1002/JSFA.9734>.
- [47] Teli A. The best oils for cooking. *Journal of the Scientific Society* 2023;50:134. [https://doi.org/10.4103/JSS.JSS\\_103\\_22](https://doi.org/10.4103/JSS.JSS_103_22).
- [48] Holgado F, Ruiz-Méndez MV, Velasco J, Márquez-Ruiz G. Performance of Olive-Pomace Oils in Discontinuous and Continuous Frying. Comparative Behavior with Sunflower Oils and High-Oleic Sunflower Oils. *Foods* 2021;10. <https://doi.org/10.3390/FOODS10123081>.
- [49] Ambra R, Lucchetti S, Pastore G. A Review of the Effects of Olive Oil-Cooking on Phenolic Compounds. *Molecules* 2022, Vol 27, Page 661 2022;27:661. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27030661>.
- [50] Rohr MW, Narasimhulu CA, Rudeski-Rohr TA, Parthasarathy S. Negative Effects of a High-Fat Diet on Intestinal Permeability: A Review. *Advances in Nutrition* 2020;11:77–91. <https://doi.org/10.1093/ADVANCES/NMZ061>.
- [51] Romana IE. Estimación de las elasticidades de la demanda de aceites comestibles en España, 1999-2019 2022.
- [52] Colombo R, Ferron L, Frosi I, Papetti A. Cite this: *Food Funct* 2021;12:7619. <https://doi.org/10.1039/d1fo01089a>.

## 9. Agradecimientos

### **A mis tutores.**

Dr. Agustí Romero. Quiero expresarle mi más sincero agradecimiento por su invaluable contribución a mi formación académica. Durante mi tiempo de prácticas profesionales en su departamento, compartió generosamente sus conocimientos sobre el mundo de los aceites de oliva y frutos, guiándome con precisión y rigor en cada paso del proyecto. Su comprensión y apoyo fueron fundamentales en el desarrollo de mis actividades académicas, y su disposición para brindar ayuda y orientación fueron invaluable para el éxito de este trabajo. Agradezco por su mentoría, que no solo enriqueció mi comprensión del tema, sino que también dejó una marca en mi desarrollo profesional. Por su paciencia y compromiso, muchas gracias.

Mag. Montserrat Jiménez. Le expreso mi más profundo agradecimiento por su invaluable contribución a la realización de este trabajo. Sin su dedicación, paciencia y constancia, este proyecto no habría sido posible. Sus valiosos consejos y aportes profesionales fueron fundamentales en cada etapa del proceso, brindándome orientación y apoyo cuando más lo necesite. Agradezco especialmente su capacidad para inspirar confianza y su disposición constante para ayudarme en cada uno de los múltiples requerimientos que surgieron durante el desarrollo de este trabajo. Sus palabras de aliento fueron un estímulo invaluable en los momentos de duda y dificultad, y su guía fue fundamental para alcanzar los objetivos propuestos. Por todo ello, mi total gratitud y aprecio.

### **Al Instituto.**

A IRTA. Mi más sentido agradecimiento a sus directivos y colaboradores de laboratorio que siempre estuvieron prestos ayudarme y bríndame su apoyo en cada una de las labores realizadas.

A la coordinadora académica Dra. Ingrid Aguilo, le agradezco su apoyo y gestión para facilitar los recursos logísticos para el desarrollo de este proyecto.

A la Mag. Ángela Chic, agradezco por la ayuda prestada en la ejecución del proceso de laboratorio de este estudio.

## 10. Tabla de abreviaturas

AAVE:	Aceite de aguacate virgen extra
AGEs:	Productos finales de glicación
AGL:	Ácidos grasos libres y
AOI:	Aceite de oliva intenso
AOO:	Aceite de orujo de oliva
AOS:	Aceite de oliva suave
AOVE I:	Aceite de oliva virgen extra 'Picual'
AOVE II:	Aceite de oliva virgen extra 'Arbequina'
ARG:	Aceite refinado de girasol
ARGAO:	Aceite refinado de girasol alto oleico
AVC:	Aceite virgen coco
AVOE:	Aceite de oliva virgen extra
AVPM:	Aceite vegetal profesional mezclado
MAG:	Monoacilgliceroles
ROS:	Especies reactivas de oxígeno
SGF:	Fase gástrica simulada
SIF:	Fase intestinal simulada
SSF:	Fase oral simulada
TAG:	Triacilgliceroles

## 11. Anexos

### Anexo I: Formato de encuesta

1. ¿Cuál es el aceite que prefiere usar en la preparación de alimentos en crudo?

- Aceite de coco
- Aceite de aguacate
- Aceite de girasol
- Aceite de oliva extra virgen
- Aceite de oliva suave
- Aceite de oliva intenso
- Orujo de oliva
- Aceite técnico de cocina
- | Otros

2. ¿Cuál es el aceite que prefiere usar en la preparación de alimentos en caliente?

- Aceite de coco
- Aceite de aguacate
- Aceite de girasol
- Aceite de oliva extra virgen
- Aceite de oliva suave
- Aceite de oliva intenso
- Orujo de oliva
- Aceite técnico de cocina
- | Otros

3. ¿Cocina frituras en casa? Sí. No.

4. ¿Qué aceites utiliza para freír?

- Aceite de coco
- Aceite de aguacate
- Aceite de girasol
- Aceite de oliva extra virgen
- Aceite de oliva suave
- Aceite de oliva intenso
- Orujo de oliva
- Aceite técnico de cocina
- | Otros

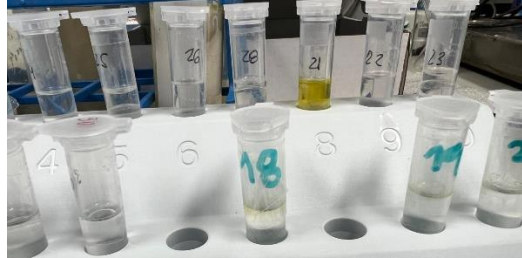
5. ¿Cuál es el factor predominante a la hora de realizar su compra de aceite?

6. ¿Ha consumido algún aceite que haya provocado malestar digestivo o pesadez?  
Sí. No.

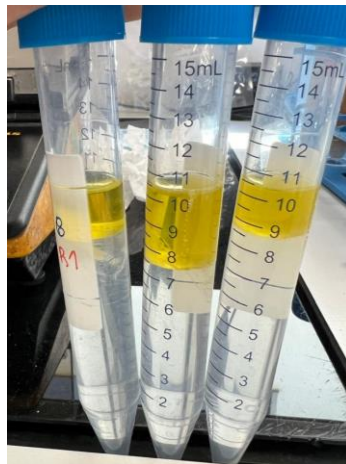
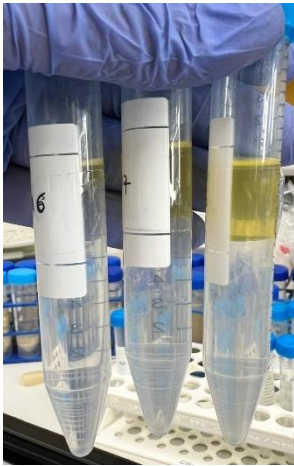
7. ¿Recuerda qué tipo de aceite fue?

## Anexo II: Fotografías

### Fase oral



### Fase gástrica



### Fase intestinal

