


Alfredo Lizana Adrianzen

CUANTIFICACIÓN Y RELACIÓN MULTIVARIADA DE ÁCIDOS GRASOS Y COMPUESTOS VOLÁTILES DE HAMBURGUESA DE P...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3552389187

60 páginas

Fecha de entrega
27 abr 2026, 10:38 a.m. GMT-5

15.238 palabras

Fecha de descarga
27 abr 2026, 10:44 a.m. GMT-5

79.976 caracteres

Nombre del archivo
lfredo_Lizana_Adrianzen_-_Informe_-_ALFREDO_LIZANA_ADRIANZEN.pdf

Tamaño del archivo
5.1 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería




3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

Fuentes principales

- 3% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 1% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	hdl.handle.net	<1%
2	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
3	Publicación	Zhijie Liu, Yiqun Huang, Shanshan Kong, Junjian Miao, Keqiang Lai. "Selection and...	<1%
4	Internet	repositorio.uta.edu.ec	<1%
5	Publicación	Qiufeng Nong, Wanshan Liang, Haoxian Huang, Minjie Wang et al. "Effect of clov...	<1%
6	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional del Centro del Peru	<1%
7	Internet	www.researchgate.net	<1%
8	Internet	docplayer.com.br	<1%
9	Internet	www.kosfaj.org	<1%
10	Internet	agexporthoy.export.com.gt	<1%
11	Internet	dergipark.org.tr	<1%

12	Internet	link.springer.com	<1%
13	Trabajos del estudiante	Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador	<1%
14	Publicación	Aabha Gangwar, Geeta Tewari, Chitra Pande, Om Prakash, Lalit M. Tewari, Tanuja...	<1%
15	Internet	edepot.wur.nl	<1%
16	Internet	www.investigacion.biblioteca.uvigo.es	<1%
17	Internet	repositorio.chapingo.edu.mx	<1%
18	Internet	repositoriodigital.uns.edu.ar	<1%



2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN**FACULTAD DE INGENIERÍA****ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS****ALIMENTARIAS**

**CUANTIFICACIÓN Y RELACIÓN MULTIVARIADA DE
ÁCIDOS GRASOS Y COMPUESTOS VOLÁTILES DE
HAMBURGUESA DE POLLO ADICIONADO CON ACEITE
ESENCIAL DE NARANJA MICROENCAPSULADO**

**INFORME FINAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Autores : Bach. Alfredo Lizana Adrianzen

**Asesores : Dr. Juan Dario Rios Mera
Dra. Carmen Milagros Sinche Ambrosio**

Línea de investigación: LI_HIA_01: Cuantificación y Caracterización de Biomoléculas.

JAÉN – PERÚ, ABRIL, 2026.

ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. MATERIAL Y MÉTODOS	13
2.1. Investigación experimental previa	13
2.1.1. Matriz alimentaria.....	13
2.1.2. Perfil de ácidos grasos por cromatografía gaseosa	15
2.1.3. Perfil de compuestos volátiles por cromatografía gaseosa	15
2.2. Metodología del presente estudio	16
2.2.1. Cuantificación de los ácidos grasos	16
2.2.2. Cuantificación de los compuestos volátiles	16
2.2.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles	18
2.3. Diseño experimental	18
2.4. Análisis de datos	19
III. RESULTADOS.....	20
3.1. Perfil de ácidos grasos	20
3.2. Perfil de compuestos volátiles	22
3.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles	28
IV. DISCUSIÓN.....	33
4.1. Perfil de ácidos grasos	33
4.2. Perfil de compuestos volátiles	34
4.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles	37
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40

5.1. Conclusiones	40
5.2. Recomendaciones	41
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
AGRADECIMIENTO	48
DEDICATORIA	49
ANEXOS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Formulación de los tratamientos</i>	14
Tabla 2 <i>Ácidos grasos identificados</i>	20
Tabla 3 <i>Promedio de los ácidos grasos identificados</i>	21
Tabla 4 <i>Compuestos volátiles identificados (% área)</i>	22
Tabla 5 <i>Tabla auxiliar de los compuestos localizados en el Análisis de Componentes Principales</i>	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Esquema experimental del proyecto de tesis</i>	19
Figura 2 <i>Análisis de Componentes Principales de los Compuestos Volátiles con los tratamientos en hamburguesa cruda (a) y cocida (b)</i>	29

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Resultado de los ácidos grasos del T1</i>	50
Anexo 2 <i>Resultado de los ácidos grasos del T2</i>	51
Anexo 3 <i>Resultado de los ácidos grasos del T3</i>	52
Anexo 4 <i>Resultado de los ácidos grasos del T4</i>	53
Anexo 5 <i>Resultado de los ácidos grasos del T5</i>	54
Anexo 6 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T1 crudo</i>	55
Anexo 7 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T1 cocido</i>	55
Anexo 8 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T2 crudo</i>	56
Anexo 9 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T2 cocido</i>	56
Anexo 10 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T3 crudo</i>	57
Anexo 11 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T3 cocido</i>	57
Anexo 12 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T4 crudo</i>	58
Anexo 13 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T4 cocido</i>	58
Anexo 14 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T5 crudo</i>	59
Anexo 15 <i>Resultado de los compuestos volátiles del T5 cocido</i>	59
Anexo 16 <i>Data de procesamiento de los compuestos volátiles para establecer la relación multivariada</i>	60

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
AG	: Ácidos Grasos
CV	: Compuestos volátiles
AE	: Aceite Esencial
AEN	: Aceite Esencial de Naranja
AENM	: Aceite Esencial de Naranja microencapsulado
BHT	: Butilhidroxitolueno
T1	: Tratamiento 1 (tratamiento control)
T2	: Tratamiento 2 (0.09% BHT)
T3	: Tratamiento 3 (0.09% AEN libre)
T4	: Tratamiento 4 (0.09% AENM)
T5	: Tratamiento 5 (0.18% AENM)
LRI	: Índice de Retención Lineal
IRC	: Índice de Retención Calculado
TR	: Tiempo de Retención
GC	: Cromatografía de Gases
MS	: Espectrometría de Masas
GC-MS	: Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas
FAME	: Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos
MUFA	: Ácidos Grasos Monoinsaturados
PUFA	: Ácidos Grasos Poliinsaturados
SFA	: Ácidos Grasos Saturados
PCA	: Análisis de Componentes Principales
DBCA	: Diseño de Bloques Completos al Azar

RESUMEN

La degradación oxidativa en hamburguesas de pollo promueve la formación de compuestos volátiles asociados al deterioro de la calidad, esto ha motivado el uso de antioxidantes naturales como los aceites esenciales; sin embargo, existe escasa evidencia en cuantificación y relación multivariada de ácidos grasos y compuestos volátiles. El objetivo de esta investigación fue cuantificar ácidos grasos y compuestos volátiles en hamburguesas de pollo adicionadas con aceite esencial de naranja libre y microencapsulado, y establecer relaciones multivariadas entre tratamientos. Los datos fueron analizados bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y se realizó un análisis de la Varianza y análisis de componentes principales. No se encontraron diferencias significativas en el perfil de ácidos grasos, predominando los monoinsaturados, seguidos de poliinsaturados y saturados, con indicadores lipídicos favorables. Se identificaron 14 grupos de volátiles, observándose en el control mayor presencia de compuestos asociados a oxidación, mientras que los tratamientos con aceite esencial se caracterizaron por terpenos; tras la cocción se incrementaron aldehídos y cetonas. Se concluyó que el aceite esencial no modificó el perfil de ácidos grasos, pero sí el de compuestos volátiles y que la relación multivariada estuvo condicionada por la interacción entre la formulación y la cocción.

Palabras clave: ácidos grasos, compuestos volátiles, hamburguesa de pollo, aceite esencial de naranja

ABSTRACT

Oxidative degradation in chicken burgers promotes the formation of volatile compounds associated with quality deterioration; this has led to the use of natural antioxidants such as essential oils; however, there is little evidence regarding the quantification and multivariate relationships of fatty acids and volatile compounds. The aim of this study was to quantify fatty acids and volatile compounds in chicken burgers supplemented with free and microencapsulated orange essential oil, and to establish multivariate relationships between treatments. The data were analysed using a completely randomised block design with five treatments, and an analysis of variance and principal component analysis were performed. No significant differences were found in the fatty acid profile, with monounsaturated fatty acids predominating, followed by polyunsaturated and saturated fatty acids, and favourable lipid indicators. Fourteen groups of volatile compounds were identified; the control sample showed a higher presence of compounds associated with oxidation, whilst the treatments with essential oil were characterised by terpenes; following cooking, aldehydes and ketones increased. It was concluded that the essential oil did not alter the fatty acid profile, but did affect that of volatile compounds, and that the multivariate relationship was influenced by the interaction between the formulation and cooking.

Keywords: fatty acids, volatile compounds, chicken burger, orange essential oil

I. INTRODUCCIÓN

La carne de pollo es la especie cárnica de mayor consumo y crecimiento a nivel mundial; por ello, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2025) y Ravindran (2024) la ponderan como “la proteína número uno a nivel mundial”, ya sea por su aporte proteico así como por su costo reducido y versatilidad en producción y comercialización. Sin embargo, su perfil lipídico la hacen vulnerable porque sus ácidos grasos insaturados son propensos a oxidarse, generando compuestos volátiles (aldehídos, cetonas, alcoholes, etc.) responsables de rancidez que deterioran la calidad sensorial y esto se traduce en una drástica reducción de su vida útil y en pérdidas económicas significativas (Shankar et al., 2022).

La búsqueda de métodos efectivos y seguros para conservar la carne de pollo ha sido un objetivo primordial en la investigación alimentaria. Tradicionalmente, se han empleado aditivos sintéticos antioxidantes para retardar la oxidación lipídica y prolongar la vida útil de los productos cárnicos (da Silva et al., 2022). Sin embargo, Al et al. (2024) resalta que el creciente interés de los consumidores por productos naturales y saludables ha llevado a cuestionar el uso de estos aditivos debido a sus posibles efectos adversos en la salud. Ante este contexto, Gangwar et al. (2026) destacaron el potencial de los aceites esenciales (AE) como sustitutos naturales.

A pesar del creciente interés en el uso de AE, ya sea microencapsulado o no, la mayoría de las investigaciones se han centrado en su efecto antimicrobiano, dejando un vacío de conocimiento respecto a su influencia en la estabilidad oxidativa de los lípidos y la formación de compuestos volátiles (CV) en matrices alimentarias como la hamburguesa de pollo. Ante esto, Barrado et al. (2008) destacaron que las hamburguesas de pollo representan una opción estratégica debido a la versatilidad de esta matriz alimentaria en términos de formulación, procesamiento, homogeneidad y control, lo que las convierte en un vehículo ideal para la adición de insumos funcionales como los AE; asimismo, la naturaleza compacta y reproducible de la hamburguesa permite aplicar con eficacia diversas técnicas de estudio y/o análisis.

Por otro lado, Franco-Vega et al. (2016) mencionaron que el aceite esencial de naranja (AEN) posee un claro potencial antioxidante atribuible a su perfil químico dominado por monoterpenos, principalmente d-limoneno (entre ~80–95% según origen y método de extracción), acompañados de compuestos menores con capacidad radicalar (p. ej. myrceno, linalool, aldehídos C8–C10); ese conjunto confiere actividad antioxidante demostrada por

ensayos in vitro (DPPH/ABTS) y por aplicaciones en matrices alimentarias donde reduce la oxidación lipídica y la formación de volátiles de rancidez.

La aplicación directa del AEN en matrices alimentarias presenta limitaciones relacionadas con su volatilidad, inestabilidad frente a factores ambientales y posible impacto sensorial, lo que reduce su eficacia y viabilidad tecnológica. Heck et al. (2021) destacaron que la microencapsulación es la mejor técnica empleada en la adición de AE a matrices alimenticias, pues su gradual liberación ayuda a mejorar la estabilidad oxidativa y evitar la degradación térmica de los AE. Por otro lado, Timilsena et al. (2017) y Djihad et al. (2024) determinaron que el método más eficaz de microencapsulación en cítricos fue mediante coacervación compleja por la aplicación temperaturas no degradantes, porque no solo preserva los compuestos terpénicos al usar una temperatura promedio de 40 °C, sino que también modula su liberación, manteniéndola perceptible hasta 8 meses después de la preparación.

Respecto al análisis y/o cuantificación de ácidos grasos (AG) y compuestos volátiles, Rios-Mera et al. (2021) al igual que Ambrosio et al. (2019), realizaron una identificación de AG por cromatografía de gases (GC) y los CV fueron determinados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). Los resultados fueron comparados con datos de bibliotecas informáticas (Wiley 8, NIST 107 y FFNSC 1.3), relacionándolos mediante análisis estadístico multivariado.

Considerando la problemática planteada y los vacíos de conocimiento existentes, el problema que se investigó fue: ¿Cómo afecta la adición de aceite esencial de naranja microencapsulado en la cuantificación y relación multivariada de los ácidos grasos y compuestos volátiles de hamburguesa de pollo?

Este cuestionamiento se sustentó en la limitada evidencia científica existente sobre estudios que integren, de manera simultánea, la cuantificación de AG y CV junto con análisis multivariados. Asimismo, se reconoce la escasa investigación específica en productos cárnicos procesados, como las hamburguesas de pollo, y en sistemas que incorporen AE en forma microencapsulada, lo que restringe la comprensión integral de los mecanismos de oxidación.

En tal sentido, la justificación de este estudio radicó en la problemática de la degradación oxidativa de la carne de pollo y sus derivados como la hamburguesa. Desde una perspectiva teórica, el estudio contribuirá a ampliar el conocimiento sobre la interacción entre el perfil de

AG y la formación de CV bajo la influencia del AE. Desde el punto de vista práctico, permitirá evaluar la viabilidad del uso de aceite esencial de naranja microencapsulado (AENM); es decir, si contribuyó o no a retardar la oxidación lipídica y reducir la formación de compuestos volátiles no deseados, prolongando así la vida útil y mejorando la calidad del producto. Asimismo, desde un enfoque metodológico, la aplicación de análisis multivariado permitió analizar las relaciones de los compuestos volátiles con los tratamientos en hamburguesa cruda y cocida.

Por lo tanto, esta investigación contribuyó a generar un nuevo conocimiento sobre el potencial del AENM como antioxidante natural en productos cárnicos. Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas en la industria alimentaria, permitiendo desarrollar productos más saludables y satisfaciendo la creciente demanda de los consumidores por alimentos naturales y de alta calidad.

En consecuencia, la presente investigación tuvo como objetivo principal cuantificar y determinar la relación multivariada de ácidos grasos y compuestos volátiles de hamburguesa de pollo adicionado con aceite esencial de naranja microencapsulado. Asimismo, se tuvo los siguientes objetivos específicos: i) cuantificar los ácidos grasos de hamburguesa de pollo adicionado con aceite esencial de naranja microencapsulado, ii) cuantificar los compuestos volátiles de hamburguesa de pollo adicionado con aceite esencial de naranja microencapsulado, y iii) establecer relaciones multivariadas de los compuestos volátiles con los tratamientos de hamburguesa de pollo adicionado con aceite esencial de naranja microencapsulado.

Cabe precisar que la presente investigación es complementaria a la investigación titulada “Aplicación de un aceite esencial de naranja microencapsulado por coacervación compleja en hamburguesas de pollo: Efectos en las características fisicoquímicas, tecnológicas y sensoriales y en la vida útil”, dirigida por la Dra. Carmen Milagros Sinche Ambrosio. En consecuencia, es necesario mencionar que la presente tesis se enfoca específicamente en la cuantificación y relación multivariada de ácidos grasos y compuestos volátiles.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Investigación experimental previa

2.1.1. Matriz alimentaria

Como materiales, se utilizaron piernas y entrepiernas de pollo desprovistas de piel, grasa visible y tejido conectivo, obtenidos del comercio local de la ciudad de Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. Aditivos como la sal (NaCl), glutamato monosódico, ajo y cebolla en polvo, antioxidante sintético butilhidroxitolueno (BHT), y proteína aislada de soya (PAS) (92% contenido proteico) fueron abastecidos por Ibrac (Rio Claro, SP, Brasil). El material encapsulante, inulina (Orafti® GR, grado de polimerización ≥ 10 ; 92.9% contenido de inulina) fue suministrado por SweetMix (Sorocaba, SP, Brasil). El aceite esencial de naranja (AEN), Brazilian Orange Terpenes, fue suministrado por una empresa procesadora de jugo de naranja del Estado de São Paulo, Brasil. Para la producción de las micropartículas, se empleó transglutaminasa microbiana como agente de reticulación proteica.

El AEN fue microencapsulado con el método de coacervación compleja de acuerdo con Rios-Mera et al. (2019), en tres repeticiones. Una solución acuosa de PAS (2.5% p/v) fue ajustada a pH 8.0 utilizando 0.1 M NaOH (Molina Ortiz et al., 2009; Nori et al., 2011), a continuación se emulsionó esta solución con el aceite esencial de naranja (10%, 25%, 50% de la suma del peso de PAS + inulina) en ultra turrax a 14000 rpm por 2 minutos. En seguida, se adicionó la solución de inulina (1.0% p/v) a la emulsión y todo el sistema se mantuvo bajo agitación magnética a 40°C. Las micropartículas se formaron por modificación del pH con 1 M HCl hasta alcanzar pH 4.0, y en seguida, se añadió la enzima transglutaminasa disuelta en agua.

Posteriormente, las micropartículas fueron almacenadas a 10 °C hasta que se completó su decantación, luego se filtraron con una malla de 63 μm , enjuagadas con agua desionizada con pH 4.0, y finalmente se almacenaron en recipientes herméticos a una temperatura de congelación de -18°C, con el propósito de una futura deshidratación mediante liofilización (-96 °C, en condiciones de vacío y oscuridad).

Las hamburguesas fueron producidas de acuerdo al procedimiento establecido por Menegali et al. (2020), con ligeras modificaciones. La carne de pollo fue molida en un molidor

de carnes (disco de 0.8 cm) y dividida en 5 partes, correspondiente a 5 tratamientos. El tratamiento T1 fue el control (sin ningún aditivo antioxidante); el T2 estuvo adicionado de BHT (90 mg/100 g), el cual fue previamente disuelto en aceite de soya; el T3 estuvo adicionado de AEN de forma directa en el producto (90 mg/100 g); los tratamientos T4 y T5 fueron adicionados de AEN en forma microencapsulada, y contuvieron 90 mg/100 g, y 180 mg/100g respectivamente.

Tabla 1

Formulación de los tratamientos

Ingrediente	T1	T2	T3	T4	T5
Aceite esencial de naranja microencapsulado (AENM)	-	-	-	0.09%	0.18%
Aceite esencial de naranja libre (AEN libre)	-	-	0.09%	-	-
Butilhidroxitolueno (BHT)	-	0.09%	-	-	-
Agua	1.90%	1.81%	1.81%	1.81%	1.72%
Aceite de soya	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%
Sal	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
Glutamato monosódico	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%
Ajo	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
Cebolla en polvo	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
Carne de pollo molida	95.70%	95.70%	95.70%	95.70%	95.70%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Todos los tratamientos estuvieron adicionados de agua (1.90% para tratamiento control T1), aceite de soya (0.1%), sal (1.5%), glutamato monosódico (0.2%), y ajo (0.3%) y cebolla en polvo (0.3%). La cantidad de agua fue ajustada a la disminución gradual conforme se agregó BHT y AEN, tanto en forma libre como microencapsulada, con el objetivo de mantener la formulación total en un 100%. Además, se realizaron tres procesos independientes para cada tratamiento.

Las hamburguesas elaboradas para los análisis de perfil de ácidos grasos y compuestos volátiles fueron almacenadas en ultracongelación a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta realizar los análisis, con el propósito de paralizar todo proceso bioquímico que altere la composición del producto.

6

Los análisis químicos fueron realizados como servicio en los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, situado en la ciudad de Piracicaba del Estado de Sao Paulo. La cuantificación y relación multivariada de los AG y CV se realizó en la ciudad de Jaén, Cajamarca, Perú. La data fue obtenida y procesada en softwares que se mencionan en los apartados siguientes.

2.1.2. Perfil de ácidos grasos por cromatografía gaseosa

El perfil de ácidos grasos fue realizado en hamburguesas cocidas, las cuales fueron sometidas a plancha de fritura eléctrica a 150 °C, hasta que la temperatura interna de la hamburguesa alcance 75 °C. Las muestras de lípidos de la hamburguesa fueron obtenidas por el método de Bligh y Dyer (1959) y se metilaron según Hartman y Lago (1973), con modificaciones basadas en el método Ce 1b-89 de la (AOCS, 2003). Se inició desde la obtención de 5 g de muestra y la posterior recuperación de los lípidos. Después de la metilación, las muestras fueron inyectadas en un cromatógrafo de gases (Shimadzu, Serie 2010 Plus) según Rios-Mera et al. (2021), equipado con una columna Restek-Wax (30 m * 0,32 mm y 0,25 µm de espesor de película) acoplada a un detector de ionización de llama (FID) y se empleó hidrógeno como gas portador a una velocidad lineal de 21,0 cm/s.

1

La temperatura del horno se inició en 60 °C y hasta que alcance 130 °C se fue incrementando a una velocidad de 20 °C/min, permaneciendo a esa temperatura durante 7 minutos, mientras que las temperaturas del inyector y del detector se fijaron a 250 °C. El volumen de inyección fue 1,0 µL en un modo de división de 1/10. Las muestras se analizaron por triplicado y solo en hamburguesa cocida.

1

2.1.3. Perfil de compuestos volátiles por cromatografía gaseosa

El perfil de compuestos orgánicos volátiles (COV) fue determinado en las hamburguesas crudas y cocidas, siguiendo las metodologías de Ambrosio et al. (2019) y Rios-Mera et al. (2021), con algunas ligeras modificaciones. Muestras de 5 g se obtuvieron picando las hamburguesas y se colocaron en viales con espacio de cabeza SPME de 20 mL para añadirles 1 µL de 1,2-diclorobenceno en metanol (130,6 µL/mL) como patrón interno. Los viales se equilibraron a una temperatura de 45 °C durante 15 min y se expuso la fibra recubierta de carboxeno/polidimetilsiloxano (CAR/PDMS) (1 cm) al espacio de cabeza por encima de las muestras durante 30 min bajo agitación magnética a 600 rpm.

15

17 El análisis se realizó en un GC-MS (Shimadzu QP2010 GC-MS) utilizando una columna RTX5MS (30 m * 0,25 mm y 0,25 µm de espesor de película). Los COV se desorbieron durante 3 minutos a 200 °C en modo splitless. Las temperaturas del horno fueron 40 °C por 8 min, 200 °C a una velocidad de 4 °C/min y 280 °C a una velocidad de 10 °C/min (en total 56 minutos).

13 El espectro de masas se obtuvo por impacto de electrones a 70 eV, en el intervalo de 40 a 500 m/z en modo de barrido. Se utilizó helio como gas portador a un flujo constante de 1 mL/min. Los alcanos (C7-C30) se analizaron en las mismas condiciones para obtener los índices de retención lineal (LRI) de las muestras. Cabe precisar que no se hicieron repeticiones, pero sí se analizó los 5 tratamientos tanto en crudo como cocido.

2.2. Metodología del presente estudio

2.2.1. Cuantificación de los ácidos grasos

7 De acuerdo a Rios-Mera et al. (2021), la identificación de los ácidos grasos se realizó por comparación de sus tiempos de retención con los de una mezcla de patrones de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME C8-C22, Sigma-Aldrich). Las mediciones se realizaron por triplicado (tres extracciones de lípidos/tratamiento/lote).

18 Los resultados fueron emitidos por los laboratorios de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Brasil). A partir de ello, se determinó la suma de ácidos saturados, ácidos grasos monoinsaturados (MUFA y ácidos grasos poliinsaturados (PUFA, PUFA/saturados, n-6/n-3, índice aterogénico, índice trombogénico y los promedios de cada tratamiento. Estos se observan en la tabla de resultados del perfil de ácidos grasos (Tabla 3).

2.2.2. Cuantificación de los compuestos volátiles

La identificación de los compuestos volátiles se realizó en el software “GCMS Browser”, comparando los espectros de masas obtenidos con las bibliotecas espectrales Wiley 8, FENOLICOS y FFNSC 1.3, y utilizando los índices de retención lineal (LRI) o tiempos de retención (TR) como una herramienta adicional de confirmación, de acuerdo a Ambrosio et al. (2019). Los datos obtenidos de cada tratamiento (crudo y cocido) se copiaron en software Microsoft Excel versión 2021.

Para mayor precisión, se calculó el índice de retención de Kovats (o también comprendido como índice de retención calculado), un valor independiente de las condiciones cromatográficas. Luego, el valor obtenido se comparó con el TR estimado por el software para confirmar similitudes. Este cálculo, también permitió determinar que el mínimo número de carbonos fue 8 y el menor TR fue 4,860.

Para el cálculo del índice de retención de Kovats, se seleccionaron dos n-alcenos cuyos tiempos de retención (tR) englobaron el tiempo de retención del compuesto de interés. Estos n-alcenos tuvieron un número de átomos de carbono conocido (n y $n+1$). Para el cálculo del número de átomos de carbono equivalentes (i) se utilizó la siguiente ecuación y el índice de Kovats se calculó multiplicando el i resultante por 100 ($I = i * 100$):

$$i = n + \left[\frac{\log tR(\text{compuesto}) - \log tR(n)}{\log tR(n+1) - \log tR(n)} \right] * z$$

Donde:

i : átomos de carbono equivalentes del compuesto

n : átomos de carbono del n-alceno con un tiempo de retención menor al del compuesto

$n+1$: átomos de carbono del n-alceno con un tiempo de retención mayor al del compuesto

z : átomos de carbono que separan a los dos n-alcenos (generalmente $z=1$)

Solo se consideraron compuestos identificados a aquellos que cumplieron con tres condiciones: $\geq 0.1\%$ de porcentaje de área total, $\geq 90\%$ de similitud con las bibliotecas espectrales y similitud entre el índice de retención calculado (IRC) y el TR. En casos donde no se cumplía la segunda o tercera condición, se realizaba una comparación manual de los espectros o IRC con los establecidos en webs confiables como Nist, Webbook, Pherobase o según el informe de Babushok et al. (2011). Este criterio, también se utilizó cuando se presentaba más de un compuesto en el mismo TR para determinar el de mayor similitud según las condiciones establecidas; asimismo, permitió identificar el nombre más popular de cada compuesto. Cabe precisar que se retiró de todos los tratamientos al 1,2-diclorobenceno puesto que fue un patrón interno.

Los CV identificados se agruparon según tipo de compuesto y en orden ascendente del TR. Al final, se verificó que cada tratamiento, ya sea crudo o cocido, sume el 100 % de área total.

2.2.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles

Se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a los compuestos volátiles identificados en las hamburguesas de pollo crudas y cocidas con el fin de explorar patrones de variación y relaciones entre tratamientos, de acuerdo a Ahamed et al. (2024). Los datos fueron organizados en una matriz que incluyó los tratamientos como observaciones y los compuestos volátiles como variables. Posteriormente, los vectores (variables) obtenidos se relacionaron con los tratamientos.

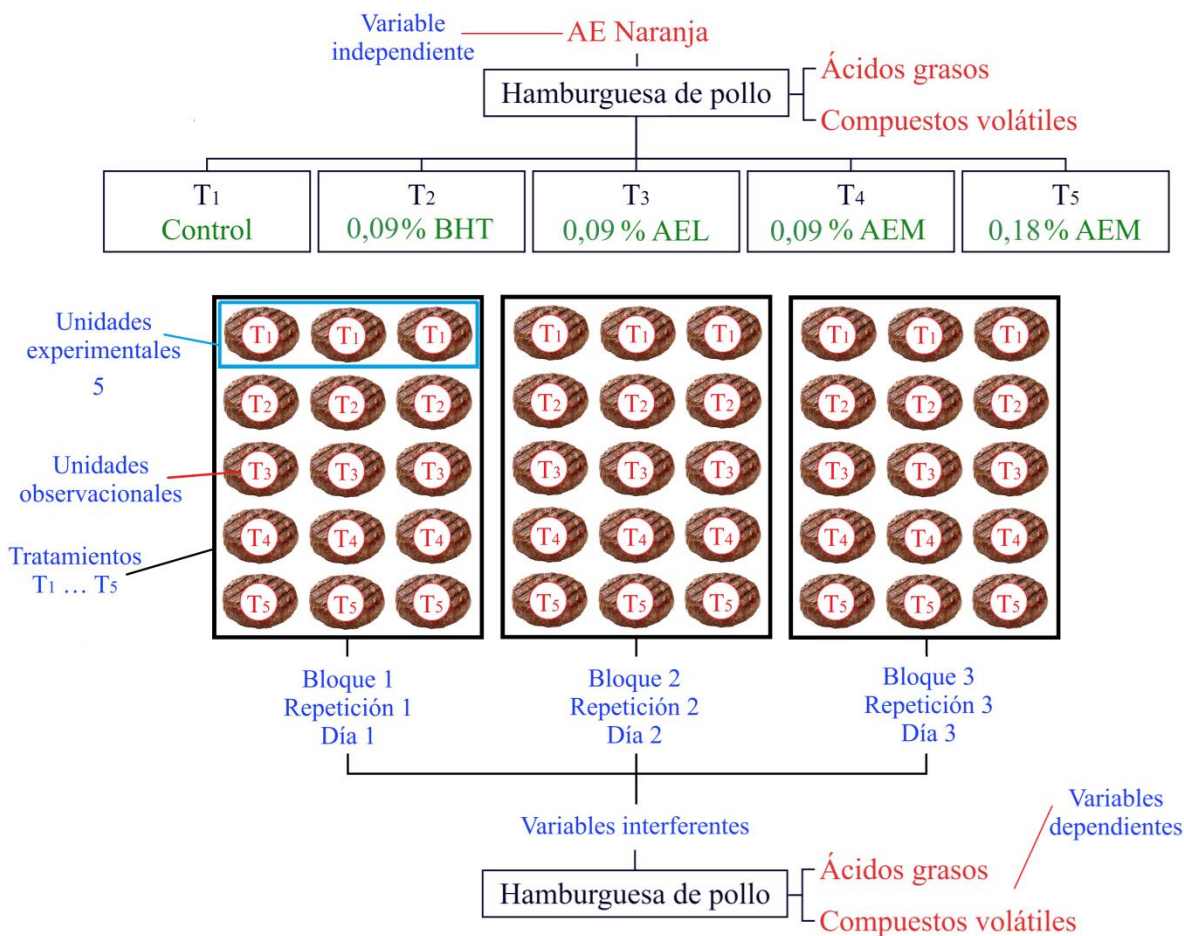
2.3. Diseño experimental

El proyecto se realizó bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) para minimizar el efecto de variables interferentes (Figura 1). Las fuentes de variación fueron los tratamientos (cinco tratamientos: T1 a T5) y el bloque (3 repeticiones del procesamiento de las hamburguesas), sumando un total de 15 unidades experimentales.

La elección del DBCA se justifica debido a la posible variabilidad asociada a las condiciones de procesamiento por lote, la cual pudo influir en las variables de respuesta. Al agrupar las unidades experimentales en bloques, se logró reducir el error experimental y aumentar la precisión en la estimación del efecto de los tratamientos. Las variables dependientes del estudio fueron los ácidos grasos y los compuestos volátiles presentes en las hamburguesas de pollo. Por su parte, la unidad experimental estuvo definida como cada lote de hamburguesa de pollo.

Figura 1

Esquema experimental del proyecto de tesis



2.4. Análisis de datos

Para el análisis de datos del perfil de ácidos grasos se aplicó Análisis de la Varianza (ANOVA), considerando el modelo $Y_{ij} = \mu + \text{Bloque}_j + \text{Tratamiento}_i + \text{Error}_{ij}$. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicaron pruebas de comparación de medias, como la prueba de Tukey. Estos análisis se llevaron a cabo utilizando un nivel de significancia estadística del 5%. Los compuestos volátiles con los tratamientos se relacionaron mediante análisis estadístico multivariado por Análisis de Componentes Principales (PCA) y se empleó el programa informático R 2017 (R Core Team).

III. RESULTADOS

3.1. Perfil de ácidos grasos

Se identificaron 15 ácidos grasos, de los cuales en la Tabla 2 se detallan 8 son Ácidos Grasos Saturados, 5 Ácidos Grasos Monoinsaturados (MUFA) y 2 Ácidos Grasos Poliinsaturados (PUFA).

Tabla 2

Ácidos grasos identificados

Tipo de Ácido Graso	Nombre
Saturados	Mirístico - C14:0
	Pentadecílico - C15:0
	Palmítico - C16:0
	Margárico - C17:0
	Esteárico - C18:0
	Araquídico - C20:0
	Behénico - C22:0
	Tricosanóico - C23:0
Monoinsaturados (MUFA)	Miristoleico - C14:1(9)
	Palmitoleico - C16:1(9)
	Elaídico - C18:1 (<i>trans</i> -9)
	Oleico - C18:1(9)
	Gadoleico - C20:1(9)
Poliinsaturados (PUFA)	Linoleico - C18:2(9,12)
	Linolénico - C18:3(9,12,15)

En la Tabla 3 se detallan el promedio de los bloques por tratamiento con su respectiva desviación estándar. Con un nivel de significancia estadística del 5% no se reportaron diferencias significativas entre los tratamientos. Asimismo, se detalla la suma de ácidos saturados, MUFA y PUFA, PUFA/Saturados, n-6/n-3, índice aterogénico e índice trombogénico.

Tabla 3*Promedio de los ácidos grasos identificados*

Ácidos grasos	T1	T2	T3	T4	T5
Mirístico - C14:0	0.4566 ± 0.01	0.4479 ± 0.01	0.4559 ± 0.00	0.467 ± 0.04	0.4538 ± 0.00
Miristoleico - C14:1(9)	0.1176 ± 0.00	0.1168 ± 0.01	0.1156 ± 0.00	0.1175 ± 0.01	0.1127 ± 0.01
Pentadecílico - C15:0	0.0732 ± 0.00	0.0697 ± 0.00	0.0684 ± 0.00	0.0735 ± 0.00	0.0717 ± 0.00
Palmítico - C16:0	19.8484 ± 0.34	19.846 ± 0.09	19.9754 ± 0.22	19.7333 ± 0.12	19.6319 ± 0.28
Palmitoleico - C16:1(9)	3.8942 ± 0.18	3.9092 ± 0.13	3.9915 ± 0.04	3.8323 ± 0.04	3.8108 ± 0.12
Margárico - C17:0	0.1052 ± 0.00	0.1047 ± 0.00	0.1058 ± 0.00	0.1131 ± 0.01	0.1103 ± 0.00
Estearico - C18:0	6.4546 ± 0.15	6.3399 ± 0.16	6.0451 ± 0.26	6.1705 ± 0.27	6.2026 ± 0.35
Elaídico - C18:1 (trans-9)	0.1783 ± 0.00	0.1783 ± 0.01	0.1757 ± 0.00	0.1461 ± 0.07	0.1856 ± 0.01
Oleico - C18:1(9)	33.4671 ± 0.38	33.4137 ± 0.44	34.1219 ± 0.35	33.8835 ± 0.21	34.0211 ± 0.95
N. I.	1.7288 ± 0.03	1.7259 ± 0.02	1.6643 ± 0.06	1.6498 ± 0.01	1.736 ± 0.04
Linoleico - C18:2(9,12)	29.3874 ± 0.51	29.6396 ± 0.30	29.4684 ± 0.34	29.9211 ± 0.32	29.571 ± 0.15
Araquídico - C20:0	0.1198 ± 0.01	0.1244 ± 0.01	0.1203 ± 0.01	0.1284 ± 0.00	0.1275 ± 0.01
Gadoleico - C20:1(9)	0.2368 ± 0.03	0.2295 ± 0.02	0.2025 ± 0.00	0.1979 ± 0.00	0.2233 ± 0.02
Linolénico - C18:3(9,12,15)	2.2206 ± 0.07	2.2432 ± 0.07	2.2434 ± 0.08	2.3043 ± 0.03	2.25 ± 0.06
Behénico - C22:0	0.0952 ± 0.00	0.1025 ± 0.01	0.0924 ± 0.00	0.1037 ± 0.00	0.1008 ± 0.01
Tricosanóico - C23:0	1.6162 ± 0.19	1.5086 ± 0.14	1.1533 ± 0.30	1.158 ± 0.15	1.3907 ± 0.31
Σ Saturados	28.77 ± 0.16	28.54 ± 0.27	28.02 ± 0.68	27.95 ± 0.51	28.09 ± 0.92
Σ MUFA	37.89 ± 0.47	37.85 ± 0.39	38.61 ± 0.31	38.18 ± 0.25	38.35 ± 0.93
Σ PUFA	31.61 ± 0.58	31.88 ± 0.37	31.71 ± 0.42	32.23 ± 0.33	31.82 ± 0.15
PUFA / Saturados	1.1 ± 0.03	1.12 ± 0.02	1.13 ± 0.04	1.15 ± 0.03	1.13 ± 0.04
n-6/n-3	13.24 ± 0.18	13.22 ± 0.29	13.14 ± 0.32	12.99 ± 0.20	13.15 ± 0.37
Índice Aterogénico	0.31 ± 0.01	0.31 ± 0.00	0.31 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.31 ± 0.01
Índice Trombogénico	0.25 ± 0.01	0.24 ± 0.00	0.24 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.24 ± 0.01

Nota. T1: control, T2: 0.09% de BHT, T3: 0.09% de AEN libre, T4: 0.09% de AENM y T5: 0.18% de AENM.

No hubo diferencias significativas entre tratamientos. Los compuestos mayoritarios fueron los ácidos monoinsaturados (MUFA), donde destacó el ácido oleico - C18:1(9) con porcentajes de 33.4671%, 33.4137%, 34.1219%, 33.8835% y 34.0211%, en T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente. Luego, se ubican los ácidos poliinsaturados (PUFA) donde destacó el

ácido linoleico - C18:2(9,12) con porcentajes de 29.3874%, 29.6396%, 29.4684%, 29.9211% y 29.5710%, respectivamente. Por último, en los ácidos saturados, destacó el palmítico - C16:0 con porcentajes de 19.8484%, 19.8460%, 19.9754%, 19.7333% y 19.6319%, respectivamente. Cabe precisar que los 3 ácidos grasos en mención son aquellos que poseen el mayor porcentaje entre los 15 ácidos identificados. Asimismo, el comportamiento de porcentajes cercanos se repite en todos los tratamientos.

En ese sentido, al no haberse identificado variaciones relevantes en los porcentajes de los AG entre tratamientos (desde 0.00% hasta 0.01%), se interpreta que la adición de AEN, libre o microencapsulado, no generó efectos significativos en el perfil de ácidos grasos de la hamburguesa de pollo.

3.2. Perfil de compuestos volátiles

Se identificaron 67 compuestos volátiles con un porcentaje de área mayor o igual a 0.1, agrupados en 14 grupos: alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos, aminas, éteres, nitrilos, compuestos sulfurados, terpenos, hidrocarburos, siloxanos, óxidos y antioxidantes.

Tabla 4

Compuestos volátiles identificados (% área)

Compuesto volátil	TR	IRC	Hamburguesa cruda					Hamburguesa cocida				
			T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Alcoholes												
1-Heptanol	17.095	1174.24	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.416	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
1-Octen-3-ol	17.51	1185.75	0.415	N.I.	0.805	1.010	0.901	1.402	0.243	0.794	0.855	0.589
1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimetil	21.031	1286.77	N.I.	N.I.	N.I.	0.153	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
2-Octen-1-ol	21.495	1300.06	N.I.	N.I.	0.112	0.132	0.123	0.118	N.I.	N.I.	0.112	0.112
1-Octanol	21.626	1304.01	N.I.	N.I.	0.234	0.341	0.484	0.201	N.I.	0.228	0.276	0.385
Linalool	22.812	1340.09	N.I.	N.I.	0.805	0.862	1.340	N.I.	N.I.	0.497	0.619	0.809
trans-Isocarveol	23.296	1354.78	N.I.	N.I.	0.163	N.I.	0.147	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Mentha-2,8-dien-1-ol	23.612	1364.36	N.I.	N.I.	0.153	0.141	0.182	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
p-Mentha-2,8-dien-1-ol, trans	23.635	1373.64	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.154	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.114
beta-Terpineol, cis	24.599	1394.3	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.109	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
1,8-Menthadien-4-ol	25.867	1434.57	N.I.	N.I.	0.183	0.186	0.340	N.I.	N.I.	0.114	0.135	0.195

Iso-Dihydrocarveol	26.283	1447.86	N.I.	N.I.	N.I.	0.169	0.249	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.126
Ciclohexanol	26.284	1447.89	N.I.	N.I.	0.224	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.119	N.I.	N.I.
Carveol, trans	27.456	1485.41	N.I.	N.I.	0.265	0.208	0.418	N.I.	N.I.	0.157	0.171	0.299
p-Mentha-2,8-dien-1-ol, cis	27.786	1495.96	N.I.	N.I.	N.I.	0.085	0.153	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.110
Carveol, cis	27.891	1499.34	N.I.	N.I.	0.133	0.183	0.357	N.I.	N.I.	N.I.	0.138	0.248
1,2-Ciclohexanodiol	31.711	1629.73	N.I.	N.I.	0.306	0.129	0.402	N.I.	N.I.	0.203	0.124	0.201
Subtotal			0.415	0.000	3.383	3.599	5.775	1.721	0.243	2.112	2.430	3.188

Aldehídos

Hexanal	7.762	908.36	N.I.	N.I.	N.I.	9.842	6.881	64.605	16.183	28.094	27.041	19.405
Heptanal	13.477	1073.74	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	1.495	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Octanal	18.594	1216.2	N.I.	N.I.	N.I.	1.547	N.I.	1.238	N.I.	0.765	1.509	1.698
Nonanal	22.982	1345.17	N.I.	N.I.	N.I.	0.274	0.234	1.335	0.631	1.187	1.234	1.361
Dodecanal	26.937	1468.75	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.099	N.I.	0.196	N.I.	0.295
Subtotal			0.000	0.000	0.000	11.663	7.115	68.772	16.814	30.242	29.784	22.759

Cetonas

2,3-Octanediona	17.75	1192.43	N.I.	N.I.	0.571	N.I.	1.113	N.I.	N.I.	2.773	N.I.	N.I.
3-Octanona	17.756	1192.51	N.I.	N.I.	N.I.	0.954	N.I.	4.531	0.825	N.I.	2.902	2.708
Biciclo[2.2.1]heptan-2-ona, 1,3,3-trimetil	18.042	1200.58	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.770	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
3-Buten-2-ona	22.242	1322.79	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.234	0.279
Etanona, 1-(4-metil-3-ciclohexen-1-il)	24.045	1377.48	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.131	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.104
Dihidrocarvona	26.626	1468.37	N.I.	N.I.	0.204	0.269	0.326	N.I.	N.I.	N.I.	0.230	N.I.
Carvona, trans	26.637	1459.18	N.I.	N.I.	N.I.	0.248	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.136	N.I.
Dihidrocarvona, trans	26.781	1459.14	N.I.	N.I.	0.265	N.I.	0.312	N.I.	N.I.	0.154	N.I.	0.170
Carvona	28.374	1515.56	N.I.	N.I.	0.448	0.670	1.119	0.190	0.105	0.360	0.453	0.732
Subtotal			0.000	0.000	1.488	2.141	3.001	5.491	0.930	3.287	3.955	3.993

Ésteres

Etanol, 2-metoxi-, acetato	2.108	N.C.	N.I.	3.096	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Ácido butírico, éster	20.217	1263.29	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.152	N.I.	N.I.	N.I.
Triacetina	32.039	1641.42	N.I.	N.I.	N.I.	0.265	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Subtotal			0.000	3.096	0.000	0.265	0.000	0.000	0.152	0.000	0.000	0.000

Ácidos

Ácido 2-aminoetanosulfónico	2.283	N.C.	N.I.	N.I.	0.489	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
-----------------------------	-------	------	------	------	-------	------	------	------	------	------	------	------

Ácido 9-octadecén-12-inoico	22.233	1322.29	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.173	N.I.	0.223	N.I.	N.I.
Subtotal			0.000	0.000	0.489	0.000	0.000	0.173	0.000	0.223	0.000	0.000

Aminas

1,4-Butano-1,1,4,4-diamina	2.033	N.C.	3.590	N.I.	0.398	0.501	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Subtotal			3.590	0.000	0.398	0.501	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Éteres

Éter metil-d ₃ 1-dideuterio-2-propenílico	4.388	N.C.	N.I.	N.I.	0.632	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Subtotal			0.000	0.000	0.632	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nitrilos

Butanonitrilo	22.771	1338.85	0.130	0.141	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Subtotal			0.130	0.141	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Compuestos sulfurados

2-Propen-1-tiol	2.65	N.C.	67.329	48.972	13.923	9.395	1.828	8.856	36.376	5.711	3.605	2.265
1-Propeno, 3-(metilitio)	4.054	N.C.	10.182	5.938	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Sulfuro de dialilo	11.071	1007.01	6.145	3.562	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	3.652	N.I.	N.I.	N.I.
Disulfuro di-2-propenílico	15.787	1091.19	3.560	2.207	2.059	0.827	N.I.	0.787	0.975	N.I.	N.I.	N.I.
Disulfuro de alil metilo	21.888	1311.99	5.574	3.740	4.220	2.244	2.558	3.194	3.301	2.027	1.433	1.263
6-Metil-4,5-ditiahpteno	22.46	1329.42	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	1.139	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
Epitio-2,8-p-menteno-1	28.263	1511.84	N.I.	N.I.	0.194	0.246	0.123	N.I.	N.I.	0.158	0.162	0.176
Subtotal			92.790	64.419	20.396	12.712	4.509	13.976	44.304	7.896	5.200	3.704

Terpenos

Mirceno	18.057	1201.01	N.I.	N.I.	1.590	0.908	4.034	N.I.	N.I.	3.009	2.393	5.601
delta-Cadineno	18.594	1216.49	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.928	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
p-Cimeno	19.517	1242.89	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.940	0.206	N.I.	N.I.	N.I.
delta-2-Careno	19.527	1243.38	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.329	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.224
1,3,8-p-Mentatrieno	19.533	1243.57	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.201
Limoneno	19.924	1256.92	N.I.	N.I.	67.078	53.006	68.111	6.576	N.I.	49.756	43.747	55.134
b-Curcumeno	21.073	1287.98	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.245	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
alfa-Terpineno	21.2	1292.37	N.I.	N.I.	0.183	0.155	0.243	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
alfa-Humuleno	22.2	1321.54	N.I.	N.I.	N.I.	0.286	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.

p-Cimino	22.36	1326.32	N.I.	N.I.	N.I.	2.827	2.740	1.225	0.237	1.673	3.044	3.334
Subtotal			0.000	0.000	68.851	57.182	76.630	8.741	0.443	54.438	49.184	64.494

Hidrocarburos

Hepteno	21.079	1329.99	0.225	0.292	1.009	N.I.	1.110	N.I.	1.423	0.950	N.I.	N.I.
Ciclohexeno	22.83	1340.63	N.I.	N.I.	1.519	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	0.121
1,4-Ciclohexadieno, 1-metil-4-(1- metiletil)	38.134	1869.94	N.I.	N.I.	0.296	0.270	0.193	N.I.	N.I.	0.206	0.253	0.265
Subtotal			0.225	0.292	2.824	0.270	1.303	0.000	1.423	1.156	0.253	0.386

Siloxanos

Ciclotetrasiloxano	18.63	1217.52	N.I.	2.197	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	2.245	N.I.	N.I.	N.I.
Ciclopentasiloxano	25.148	1411.52	0.767	6.736	0.387	3.616	0.356	0.353	6.885	0.131	0.894	0.096
Ciclohexasiloxano	31.349	1616.93	1.207	8.476	0.510	5.260	0.541	0.576	8.652	0.207	4.260	0.508
Cicloheptasiloxano	36.863	1820.1	0.711	3.388	0.173	2.238	0.153	0.197	3.241	N.I.	3.209	0.405
Ciclooctasiloxano	41.792	2049.72	0.165	0.361	N.I.	0.253	N.I.	N.I.	0.387	N.I.	0.599	N.I.
Subtotal			2.850	21.158	1.070	11.367	1.050	1.126	21.410	0.338	8.962	1.009

Óxidos

Óxido de limoneno, cis	24.145	1380.52	N.I.	N.I.	0.204	N.I.	0.145	N.I.	N.I.	0.133	N.I.	0.147
Óxido de limoneno, trans	24.327	1386.03	N.I.	N.I.	0.265	0.300	0.470	N.I.	N.I.	0.177	0.233	0.316
Subtotal			0.000	0.000	0.469	0.300	0.615	0.000	0.000	0.310	0.233	0.463

Antioxidantes

Butilhidroxitolueno	37.324	1838.05	N.I.	10.894	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	14.281	N.I.	N.I.	N.I.
Subtotal			0.000	10.894	0.000	0.000	0.000	0.000	14.281	0.000	0.000	0.000

Suma total			100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
-------------------	--	--	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Nota. TR = Tiempo de Retención, IRC = Índice de Retención Calculado, N.I. = No identificado y N.C. = No calculado. Algunos compuestos no tienen IRC (N.C.) debido a que su TR era menor al valor mínimo de n-alcenos.

De manera general, en la hamburguesa cruda los tratamientos T1 (control) y T2 (con 0.09% de BHT) predominaron los compuestos sulfurados (con 92.790% y 64.419% de área, respectivamente) destacando el 2-propen-1-tiol con 67.329% y 48.972%, respectivamente. En cambio, en T3 (con 0.09% de AEN libre), T4 (con 0.09% de AENM) y T5 (con 0.18% de AENM) predominaron los terpenos (con 68.851%, 57.182% y 76.630%, respectivamente) destacando el limoneno con 67.078%, 53.006% y 68.111%, respectivamente.

En la hamburguesa cocida, el T1 presentó predominio de aldehídos (68.772%) destacando el hexanal con 64.605, en el T2 predominaron compuestos sulfurados (44.304%) destacando el 2-propen-1-tiol con 36.376%, y en T3, T4 y T5 predominaron los terpenos (con 54.438%, 49.184% y 64.494%, respectivamente) destacando el limoneno con 49.756%, 43.747% y 55.134%, respectivamente. Asimismo, se observó una reducción en los porcentajes del limoneno en comparación con las muestras crudas.

En los siguientes párrafos detallan los hallazgos relevantes, considerando la distribución de los porcentajes de área por grupos químicos:

Alcoholes. En la hamburguesa cruda, en T1 se detectó únicamente 1-octen-3-ol con el 0.415%, mientras que en T2 no se identificaron compuestos; en T3 (3.383% de área) y T4 (3.599 %) destacaron 1-octen-3-ol y linalool con porcentajes menores al 1%. El T5 con un porcentaje de área del 5.775% presentó la mayor presencia de alcoholes, con 16 de 17 compuestos y porcentajes cercanos entre sí. Tras el proceso de cocción, T1 (1.721%) y T2 (0.243%) destacó el 1-octen-3-ol (1.402% y 0.243%, respectivamente); en cambio, en T3 (2.112%), T4 (2.430%) y T5 (3.188%) se observó reducción en el número de compuestos y en el porcentaje de área, respecto a la hamburguesa cruda.

Aldehídos. En la hamburguesa cruda no se detectaron en T1, T2 y T3; pero sí en T4 (11.663%) y T5 (7.115%) destacando el hexanal con porcentajes de área de 9.842% y 6.881%, respectivamente. En la hamburguesa cocida, todos los tratamientos presentaron aldehídos: T1 = 68.772%, T2 = 16.814%, T3 = 30.242%, T4 = 29.784% y T5 = 22.759% destacando el hexanal con 64.605%, 16.183%, 28.094%, 27.041% y 19.405%, respectivamente.

Cetonas. En la hamburguesa cruda, no se detectaron en T1 y T2; pero, en T3, T4 y T5 se identificó un incremento moderado ascendente de 1.488%, 2.141% y 3.001%, respectivamente. En la hamburguesa cocida, el T1 presentó el mayor porcentaje de todos los tratamientos (5.491%), destacando la 3-octanona con 4.531%; el T2 mostró una reducción considerable a 0.930%; pero ascendió en T3 (3.287%) destacando la 2,3-octanediona con 2.773%; en T4 (3.955%) y T5 (3.993%) destacó la 3-octanona con 2.902% y 2.708%.

Ésteres. Se identificaron tres compuestos: etanol, 2-metoxi acetato (en T2 cruda) con 3.096%; ácido butírico éster (en T4 cocida) con 0.265%; y triacetina (en T2 cruda) con 0.152%.

Ácidos. Se identificó al ácido 2-aminoetanosulfónico (en T3 cruda) con 0.489% y al ácido 9-octadecén-12-inoico en hamburguesa cocida en T1 (0.173%) y T3 (0.223%).

Aminas, éteres y nitrilos. Se registró una presencia limitada, identificándose un único compuesto en cada grupo, exclusivamente en la hamburguesa cruda. En el grupo de las aminas,

se detectó 1,4-butano-1,1,4,4-d₄-diamina en T1, T3 y T4, con porcentajes de área de 3.590%, 0.398% y 0.501%, respectivamente. En cuanto a los éteres, se identificó únicamente el éter metil-d₃ 1-dideuterio-2-propenílico, presente solo en T3 con 0.632%. Por su parte, en los nitrilos se detectó butanonitrilo en T1 (0.130%) y T2 (0.141%).

Compuestos sulfurados. Se identificaron 2-propen-1-tiol y disulfuro de alil metilo en todos los tratamientos, crudos y cocidos. En la hamburguesa cruda, se observó un decrecimiento entre tratamientos, en T1 (92.790%), T2 (64.419%), T3 (20.396%), T4 (12.712%) y T5 (4.509%), destacando el 2-propen-1-tiol con 67.329%, 48.972%, 13.923%, 9.395% y 1.828%, respectivamente. En la hamburguesa cocida se evidenció un comportamiento similar en T1 (13.976%), T2 (44.304%), T3 (7.896%), T4 (5.200%) y T5 (3.704%), destacando el 2-propen-1-tiol con 8.856%, 36.376%, 5.711%, 3.605% y 2.265%, respectivamente.

Terpenos. En la hamburguesa cruda no se identificaron compuestos en T1 y T2, pero sí en T3 (68.851%), T4 (57.182%) y T5 (76.630%) destacando el limoneno con 67.078%, 53.006% y 68.111%, respectivamente. En la hamburguesa cocida, se evidenció una presencia reducida de terpenos en T1 (8.741%) y T2 (0.443%); en T3 (54.438%), T4 (49.184%) y T5 (64.494%) se observó una disminución de porcentajes en comparación con los tratamientos de hamburguesa cruda.

Hidrocarburos. Se identificaron 3 compuestos, en la hamburguesa cruda, solo hubo presencia de hepteno en T1 (0.225%) y T2 (0.292%); en el T3 (2.824%) predominó el ciclohexeno con 1.519%, en T4 se identificó únicamente 1,4-ciclohexadieno con 0.270% y en T5 (1.303%) predominó el hepteno con 1.110%. En la hamburguesa cocida, en T1 no hubo hidrocarburos, en T2 (1.423%) y T3 (1.156%) destacó el hepteno (con 1.423% y 0.950, respectivamente) y en T4 (0.253%) y T5 (0.386%) destacó el 1,4-ciclohexadieno (con 0.253% y 0.265%, respectivamente).

Siloxanos. Se identificaron cinco compuestos, entre los cuales el ciclopentasiloxano, ciclohexasiloxano y cicloheptasiloxano estuvieron presentes en todos los tratamientos. En la hamburguesa cruda, en T1 (2.850%), T2 (21.158%), T3 (1.070%), T4 (11.367%) y T5 (1.050%) destacó el ciclohexasiloxano con 1.207%, 8.476%, 0.510%, 5.260% y 0.541%, respectivamente. En la hamburguesa cocida se repite la tendencia, aunque con porcentajes menores, en T1 (1.126%), T2 (21.410%), T3 (0.338%), T4 (8.962%) y T5 (1.009%) destacó igualmente el ciclohexasiloxano con 0.576%, 8.652%, 0.207%, 4.260% y 0.508%, respectivamente.

Óxidos. Se identificó únicamente al óxido de limoneno cis y el óxido de limoneno trans, los cuales estuvieron presentes exclusivamente en T3, T4 y T5, tanto en hamburguesas crudas como cocidas. T3 y T5 presentaron ambos compuestos, mientras que en T4 se detectó únicamente el óxido de limoneno trans. En la hamburguesa cruda, en T3 (0.469%), T4 (0.300%) y T5 (0.615%) predominó el óxido de limoneno trans con 0.265%, 0.300% y 0.470%, respectivamente. En la hamburguesa cocida se observó un patrón similar, aunque con valores inferiores, igualmente en T3 (0.310%), T4 (0.233%) y T5 (0.463%) predominó el óxido de limoneno trans con 0.177%, 0.233% y 0.316%, respectivamente.

Antioxidantes. Se identificó al butilhidroxitolueno como el único antioxidante, detectándose exclusivamente en el T2, correspondiente a la formulación a la que fue adicionado. En la hamburguesa cruda, este compuesto presentó un porcentaje de área de 10.894%, mientras que en la hamburguesa cocida se incrementó a 14.281%.

En función a estos resultados, se evidenció que la adición de AEN, tanto en libre como microencapsulada, no logró ejercer un efecto positivo significativo en la reducción de CV asociados al deterioro lipídico en hamburguesas de pollo tras el proceso de cocción (por ejemplo: aldehídos, cetonas, etc.). Si bien, en estado crudo los tratamientos con AEN (T3, T4 y T5) mostraron un predominio de terpenos, especialmente limoneno, este comportamiento no se mantuvo tras la cocción, donde se observó una disminución de dichos compuestos, sugiriendo una pérdida por volatilización o degradación térmica.

Asimismo, la formación de aldehídos, particularmente hexanal (indicador clásico de oxidación lipídica) fue elevada en todos los tratamientos cocidos, incluyendo aquellos con AENM, lo que evidencia que ni la concentración ni la microencapsulación lograron inhibir eficazmente los procesos oxidativos. De igual manera, la presencia de cetonas y otros compuestos secundarios de oxidación en tratamientos con AEN refuerza la ausencia de un efecto protector consistente. Por otro lado, el antioxidante sintético (BHT) mostró un comportamiento más estable en ciertos grupos químicos, aunque tampoco evitó completamente la formación de compuestos indeseables.

3.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles

En la Figura 2 se detalla el Análisis de Componente Principales (PCA) que relaciona los compuestos con los tratamientos, ya sea en hamburguesa cruda (a) y hamburguesa cocida (b). Los vectores están denominados por números cuya interpretación está en la tabla auxiliar (Tabla 5).

Figura 2

Análisis de Componentes Principales de los Compuestos Volátiles con los tratamientos en hamburguesa cruda (a) y cocida (b)

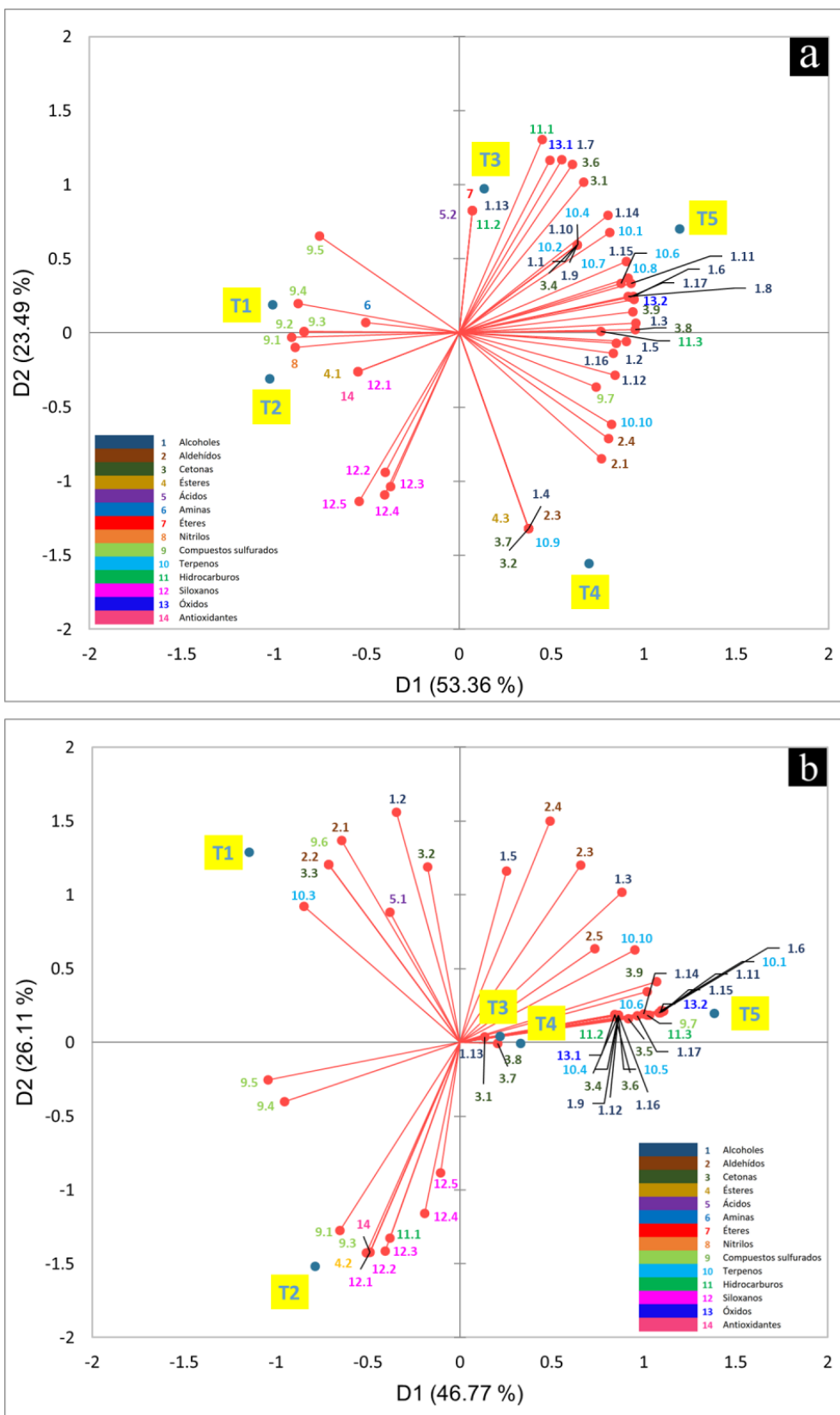


Tabla 5
Tabla auxiliar de los compuestos localizados en el Análisis de Componentes Principales

Grupo	Nombre del compuesto	Nº
Alcoholes	1-Heptanol	1.1
	1-Octen-3-ol	1.2
	1-Octanol	1.3
	1,6octadien-3-ol, 3,7-dimetil	1.4
	2-Octen-1-ol	1.5
	Linalool	1.6
	Isocarveol, trans	1.7
	Mentha-2,8-dien-1-ol	1.8
	p-Mentha-2,8-dien-1-ol, trans	1.9
	b-Terpineol, cis	1.10
	1,8-Menthadien-4-ol	1.11
	iso-Dihydrocarveol	1.12
	Cyclohexanol	1.13
	1,2-Ciclohexanediol	1.14
	Carveol, trans	1.15
	p-Mentha-2,8-dien-1-ol, cis	1.16
	Carveol, cis	1.17
Aldehídos	Hexanal	2.1
	Heptanal	2.2
	Octanal	2.3
	Nonanal	2.4
	Dodecanal	2.5
Cetonas	2,3-Octanodiona	3.1
	3-Octanona	3.2
	Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one, 1,3,3-trimethyl	3.3
	Etanona	3.4
	3-Buten-2-ona	3.5
	Dihydrocarvona, trans	3.6
	Carvona, trans	3.7
	Dihydrocarvona	3.8
	Carvona	3.9
Ésteres	Etanol, 2-methoxy, acetato	4.1
	Ácido butírico, éster	4.2
	Triacetin	4.3
Ácidos	Ácido 9-octadecen-12-inoico	5.1
	Ácido 2-aminoetanosulfónico	5.2
Aminas	1,4-Butane-1,1,4,4-d4-diamina	6
Éteres	Éter metil propenílico	7
Nitrilos	Butanonitrilo	8
Compuestos sulfurados	2-Propen-1-tiol	9.1
	1-Propeno, 3-(metiltio)	9.2

	Sulfuro de dialilo	9.3
	Disulfuro di-2-propenílico	9.4
	Disulfuro de alil metilo	9.5
	6-Metil-4,5-ditiahepteno	9.6
	Epitio-2,8-p-menteno-1	9.7
Terpenos	Mirceno	10.1
	delta-Cadineno	10.2
	p-Cimeno	10.3
	Delta-2-Careno	10.4
	1,3,8-p-Mentatrieno	10.5
	Limoneno	10.6
	beta-Curcumeno	10.7
	alfa-Terpineno	10.8
	alfa-Humuleno	10.9
	p-Cimineno	10.10
Hidrocarburos	Hepteno	11.1
	Ciclohexeno	11.2
	1,4-Ciclohexadieno	11.3
Siloxanos	Ciclotetrasiloxano	12.1
	Ciclopentasiloxano	12.2
	Ciclohexasiloxano	12.3
	Cicloheptasiloxano	12.4
	Ciclooctasiloxano	12.5
Óxidos	Óxido de limoneno, cis	13.1
	Óxido de limoneno, trans	13.2
Antioxidantes	BHT	14

Nota. Los colores del nombre de los grupos están relacionados con la Figura 2 para mayor interpretación visual.

En la hamburguesa cruda, la Dimensión 1 (D1) y Dimensión 2 (D2), explicaron respectivamente el 53,36% y 23,49%, sumando un total de 76.85% de la variabilidad total de los datos. Se identificó relaciones entre T1 y T2, en mayor proporción con compuestos sulfurados (2-Propen-1-tiol, 1-Propeno, 3-(metiltio), Sulfuro de dialilo, Disulfuro di-2-propenílico y Disulfuro de alil metilo) y en menor proporción con nitrilos (Butanonitrilo), aminas (1,4-Butane-1,1,4,4-d4-diamina) y ésteres (Etanol, 2-methoxy, acetate); sin embargo el T2 fue relacionado particularmente con Siloxanos (Ciclotetrasiloxano, Ciclopentasiloxano, Ciclohexasiloxano, Cicloheptasiloxano y Ciclooctasiloxano). Por otro lado, T3 y T5 presentaron relaciones mayoritarias en terpenos (Mirceno, delta-Cadineno, Delta-2-Careno, Limoneno, beta-Curcumeno, alfa-Terpineno) y alcoholes (1-Heptanol, Isocarveol, trans, p-Mentha-2,8-dien-1-ol, trans, b-Terpineol, cis, Cyclohexanol, 1,2-Ciclohexanediol, Carveol,

trans), y en menor proporción con cetonas, hidrocarburos y óxidos. Por último, T4 estuvo particularmente relacionado con aldehídos, cetonas, alcoholes y terpenos.

En la hamburguesa cocida, D1 y D2 explicaron respectivamente el 46,77% y 26,11%, sumando un total del 72,88% de la variabilidad total de los datos. T1 está relacionado con aldehídos, cetonas, compuestos sulfurados, terpenos y ácidos; T2 está relacionado en mayor proporción con siloxanos y en menor proporción con compuestos sulfurados, ésteres y el antioxidante sintético BHT. Mientras que T3 y T4 está relacionado mínimamente con cetonas y alcoholes; en la misma dimensión se encuentra T5 que se relaciona mayoritariamente con alcoholes, terpenos y cetonas, pero mínimamente con óxidos, hidrocarburos y compuestos sulfurados.

A modo general, los tratamientos que incorporaron AEN, tanto en forma libre como microencapsulada, se relacionaron principalmente con alcoholes, cetonas y, de manera predominante, con terpenos. Dentro de este grupo, T3 (0,09% de AEN libre) y T5 (0,18% de AENM) mostraron una mayor asociación con estos compuestos, mientras que T4 (0,09% de AENM) presentó una contribución relativamente menor y puede deberse a que contiene la menor dosis incorporada en comparación con T5, y podría asociarse a la microencapsulación.

IV. DISCUSIÓN

4.1. Perfil de ácidos grasos

El predominio de ácidos grasos monoinsaturados (MUFA), principalmente ácido oleico, seguido por los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), donde destacó el ácido linoleico, y los ácidos grasos saturados (SFA), representados principalmente por el ácido palmítico, coincide con perfiles reportados por Munyaneza et al. (2025) en carne de pollo donde estos constituyen las fracciones predominantes entre los tratamientos, esto confirma que la matriz cárnica evaluada presentó un comportamiento lipídico característico.

La ausencia de diferencias significativas en el perfil de AG entre los tratamientos sugiere que la incorporación de AEN, tanto en forma libre como microencapsulada, no alteró la composición lipídica intrínseca de la hamburguesa de pollo. Este comportamiento, según Rimini et al. (2014) puede explicarse porque el perfil de AG en carne de pollo está determinado principalmente por factores fisiológicos y nutricionales del animal, así como por la proporción de tejido adiposo y muscular, por lo que modificaciones en la formulación del producto durante el procesamiento tienen un efecto limitado sobre su composición lipídica estructural.

Por otro lado, de acuerdo a Fisher y Phillips (2008) el AE de cítricos está compuesto principalmente por monoterpenos, particularmente limoneno, y contiene cantidades insignificantes de lípidos o AG, lo que implica que su incorporación en bajas concentraciones (de 0,09 a 0,18 %) difícilmente pudo modificar el perfil de AG de la matriz cárnica. En este sentido, Rimini et al. (2014) explicaron que los aditivos antioxidantes o aromáticos aplicados durante el procesamiento tienden a influir principalmente en la estabilidad oxidativa o en el perfil de CV, pero no en la composición básica de AG, la cual permanece relativamente estable cuando la fuente lipídica de la formulación no cambia significativamente. Asimismo, la microencapsulación del aceite esencial, empleada en los tratamientos T4 y T5, está diseñada principalmente para proteger y liberar gradualmente CV, sin la intención de aportar lípidos adicionales que puedan alterar el perfil de AG (Gharsallaoui et al., 2007).

Por lo tanto, la invariabilidad del perfil de AG observada en los tratamientos no constituye una limitación del estudio, sino un resultado coherente con la naturaleza de los compuestos adicionados y con lo reportado por Gharsallaoui et al. (2007), Fisher y Phillips (2008) y Rimini et al. (2014), donde se ha evidenciado que la incorporación de AE, incluso

bajo diferentes estrategias tecnológicas, no modificó de manera significativa la composición de AG en productos cárnicos.

Los valores obtenidos para la suma de ácidos grasos saturados (Σ Saturados), monoinsaturados (Σ MUFA) y poliinsaturados (Σ PUFA), así como las relaciones PUFA/SFA y n-6/n-3, reflejan un perfil lipídico donde predominan los ácidos grasos insaturados sobre los saturados. Esta distribución se traduce en bajos índices aterogénico y trombogénico, y según Attia et al. (2017) son característicos de carne aviar y se han asociado con perfiles lipídicos más saludables frente a carnes rojas, lo que refuerza la calidad nutricional de la hamburguesa cocida independientemente del tratamiento.

4.2. Perfil de compuestos volátiles

En la hamburguesa cruda, los tratamientos control (T1) y con BHT (T2) se asociaron principalmente con compuestos sulfurados. La presencia de este tipo de compuestos, según McGorin, (2011) es frecuente en carne fresca y se relaciona con procesos oxidativos microbianos y de almacenamiento, los cuales poseen umbrales sensoriales bajos y contribuyen a olores característicos de la carne. La dominancia de terpenos en los tratamientos con AEN (libre y microencapsulado) concuerda con la rica composición terpénica de los AE cítricos, pues según González-Mas et al. (2019) y Guo et al. (2025), compuestos como el limoneno constituyen la fracción volátil más abundante. Este patrón sugiere que la presencia de terpenos en los perfiles volátiles está más directamente ligada a la adición de AE que a cambios en rutas internas de oxidación de la carne, lo que coincide con Marçal et al. (2022) que afirman terpenos derivados de fuentes exógenas modifican claramente el perfil volátil de matrices alimentarias sin desplazar completamente los compuestos endógenos, tales como los ácidos grasos.

En la hamburguesa cocida, la elevada contribución de aldehídos en el control (T1), con hexanal como marcador principal, se interpretó como resultado esperado de la oxidación lipídica inducida por el tratamiento térmico, pues Bak et al. (2021) y Domínguez et al. (2019) destacan al hexanal como indicador sensible de rancidez por oxidación de ácidos grasos insaturados en carnes cocidas. El predominio de compuestos sulfurados en T2 concordó con el papel de reacciones térmicas (Maillard y degradación de aminoácidos sulfurados) en generar tioles y sulfuros en matrices cárnicas cocidas (Kosowska et al., 2017; Yeo et al., 2022). En los tratamientos con AEN (T3, T4 y T5) persistió la presencia de terpenos, aunque con reducción

relativa del limoneno respecto a las muestras crudas, hecho atribuible a la volatilización y degradación térmica de monoterpenos; por lo tanto, la mayor retención observada en formulaciones microencapsuladas se alinea con lo reportado por Burgos-Díaz et al. (2024) e Ibáñez et al. (2020) sobre la estabilización y liberación controlada de limoneno mediante microencapsulación.

Respecto a los alcoholes, en la hamburguesa cruda, la presencia casi exclusiva de 1-octen-3-ol en T1 y su ausencia en T2, junto con la mayor diversidad de alcoholes en los tratamientos con AEN, sugiere que la incorporación de compuestos con perfil terpénico introduce alcoholes adicionales más allá de los derivados de oxidación lipídica. Esto concuerda con Ning et al. (2025) y Zhou et al. (2022), que tildaron al 1-octen-3-ol como un producto de autooxidación. Tras la cocción, la reducción del número de alcoholes en T3, T4 y T5 y el ligero incremento de 1-octen-3-ol en T1 y T2 reflejan la influencia simultánea de reacciones térmicas de oxidación de lípidos y la probable volatilización o transformación térmica de alcoholes introducidos por los AE, de acuerdo a Tianming-Zhou et al. (2022).

Acercas de los aldehídos, en hamburguesa cruda solo estuvieron presentes en los tratamientos con aceite esencial microencapsulado (T4 y T5). En contraste, en la hamburguesa cocida los aldehídos estuvieron presentes en todos los tratamientos, con hexanal como compuesto predominante, lo cual es coherente con lo que resalta Cartoni Mancinelli et al. (2021) y Ning et al. (2025) sobre los aldehídos como volátiles típicos derivados de la cocción, pues estos se forman por degradación de ácidos grasos insaturados (especialmente linoleico) y son indicadores de deterioro; sin embargo, en bajas concentraciones contribuyen con el aroma característico de la carne, pero debido a las altas concentraciones identificadas, su presencia está más relacionada con efectos negativos.

Las cetonas, en la hamburguesa cruda, la presencia solo en T3, T4 y T5, sugiere que la adición de AEN, en particular sus monoterpenos y sus derivados, pudo promover la formación de cetonas volátiles como 2,3-octanediona en ausencia de estrés térmico, lo cual coincide con lo que reportan Domínguez et al. (2019) y Mottram (1998) acerca de la formación de cetonas por autooxidación de lípidos en presencia de compuestos oxidables. Tras la cocción, el predominio de cetonas en T1 (control) y T2 (con BHT) reflejan la importancia de los mecanismos térmicos de oxidación lipídica; en los tratamientos con AE, la presencia de cetonas como 3-octanona indica que las cetonas volátiles resultan tanto de la oxidación térmica como de la interacción de los lípidos con compuestos presentes en el aceite esencial.

La baja presencia de ésteres, ácidos, aminas, éteres y nitrilos en las hamburguesas de pollo permitió interpretar que estos compuestos no tienen una relación directa con los tratamientos y pueden originarse por degradación de aminoácidos o residuos nitrogenados y tienden a disminuir o transformarse durante el tratamiento térmico. Esto concuerda con Ayseli et al. (2014) y Li et al. (2024) que indican que la presencia de estos compuestos influye mínimamente al perfil de CV, sin una relación directa y consistente con la adición de AE o antioxidante (BHT).

Acercas de los compuestos sulfurados, en la hamburguesa cruda, su alta proporción en T1 y T2 y su disminución progresiva en los tratamientos con AEN coinciden con la naturaleza de estos volátiles como subproductos de degradación de aminoácidos sulfurados (relacionados con ajo, cebolla y proteína de la carne de pollo, presentes en la formulación), esto coincide con lo documentado por Bleicher et al. (2022) y McGorin (2011), donde la adición de AE evitó la formación de estos compuestos. Tras la cocción, la presencia de estos en todos los tratamientos refleja tanto la influencia térmica de reacciones como la Maillard y degradación de aminoácidos sulfurados que generan sulfurados secundarios, de acuerdo a Bleicher et al. (2022). La mayor proporción en el T1 (control) comparada con los tratamientos con aditivos, coincide con el reporte de Devatkal et al. (2011) donde la adición de BHT o AE pudo atenuar parcialmente estas vías, pero no totalmente.

Los terpenos, en la hamburguesa cruda, en T1 y T2 y su marcada presencia en los tratamientos con AEN (T3, T4 y T5) se alineó con el hecho de que los AE cítricos están constituidos principalmente por compuestos terpénicos como el limoneno, el cual es el principal componente volátil de estos AE (González-Mas et al., 2019). Esto indica que la detección de terpenos estuvo determinada en mayor proporción por la adición del AE y en menor proporción por otros ingredientes, tales como el ajo o la cebolla. Tras la cocción, la disminución relativa de terpenos en todos los tratamientos refleja la volatilización y posible degradación térmica de terpenos como el limoneno durante procesos térmicos, un comportamiento similar fue reportado por Al-Khalili et al. (2025) y Kosowska et al. (2017) donde además se precisó que tras la cocción se forman compuestos sulfurados y aldehídos como reacción térmica.

Respecto a los hidrocarburos, la variación observada entre tratamientos sugiere según Ahamed et al. (2023) y Ning et al. (2025), que la adición de AEN y otros ingredientes moduló la disponibilidad de precursores de hidrocarburos o su volatilización y puede atribuirse a la combinación de: i) aportes directos de la matriz añadida (aceite de soya o aceites esenciales),

ii) efectos inhibitorios o moduladores de antioxidantes sobre vías de formación, y iii) transformaciones inducidas por calor que favorecen o reducen la detección de determinados hidrocarburos.

Los siloxanos detectados en todos los tratamientos, tanto en crudo como cocido, se atribuyen a un origen exógeno más que a la matriz, dado que no son metabolitos naturales de la carne de pollo y tampoco se relacionan con algún ingrediente de la formulación. English (2022) afirmó que la presencia de siloxanos se asocia a artefactos analíticos del sistema GC-MS, particularmente a la degradación térmica de la fibra SPME CAR/PDMS o de la columna cromatográfica. Asimismo, la presencia abundante de este compuesto en los tratamientos con BHT (T2) puede explicarse por la interacción del antioxidante con el sistema analítico, dado que la capacidad del BHT para modificar la disponibilidad de oxígeno pudo afectar la estabilidad del recubrimiento polimérico de la fibra y favorecer la liberación de siloxanos.

Los óxidos de limoneno cis y trans detectados exclusivamente en los tratamientos con AEN (T3, T4 y T5) en hamburguesa cruda y cocida se interpretaron como derivados oxigenados del limoneno, el principal terpeno presente en los AE de cítricos. González-Mas et al. (2019) indican que estos contienen limoneno como compuesto mayoritario y que, bajo condiciones de oxidación o procesamiento, puede formarse una fracción de oxidación de terpenos, incluidos los óxidos de limoneno; además, Shahbazi y Shavisi (2021) afirman que los compuestos oxidados del limoneno aparecen como productos secundarios cuando el limoneno se expone al oxígeno, luz o calor.

4.3. Relación multivariada del perfil de compuestos volátiles

El PCA confirmó que la variabilidad del sistema estuvo influenciada tanto por la formulación de los tratamientos como por los cambios inducidos durante el procesamiento, permitiendo identificar patrones químicos diferenciados en función de la composición y el estado del producto. En la hamburguesa cruda, la distribución de las muestras en el espacio multivariado reflejó una clara separación entre el tratamiento control y aquellos que incorporaron AEN, lo que indica que la adición de compuestos exógenos con alta intensidad aromática genera una reorganización de la varianza explicada por el modelo.

La asociación del tratamiento control con compuestos sulfurados, aminas y nitrilos sugiere un perfil dominado por compuestos derivados de rutas de degradación propias de la matriz cárnica, en ausencia de agentes antioxidantes o aromáticos. Este comportamiento es

consistente con lo reportado por Almeida et al. (2023) quienes señalaron que el PCA permite discriminar estados iniciales de deterioro vinculados a la formación de compuestos sulfurados y nitrogenados, los cuales, aunque pueden estar presentes naturalmente, tienden a incrementarse en sistemas con menor protección frente a procesos oxidativos.

El tratamiento T2 mostró una asociación particular con siloxanos, lo cual sugiere un comportamiento atípico no atribuible a la matriz alimentaria. Este resultado pudo explicarse como exógeno, ya que, según English (2022), la presencia de siloxanos suele originarse por la degradación térmica de la fibra SPME o de la columna cromatográfica, mas no por la matriz o el aditivo. En contraste, la agrupación de los tratamientos con AE (T3, T4 y T5) se explicó por la alta contribución de terpenos, óxidos y alcoholes, compuestos característicos del AEN, lo que coincide con Chen et al. (2025), quienes describen que la incorporación de ingredientes aromáticos introduce nuevas fuentes de variación que dominan la estructura multivariante del sistema.

Tras la cocción, el PCA mostró una reorganización de los patrones de agrupamiento, evidenciando que el tratamiento térmico actúa como un factor determinante en la generación de CV y en la redistribución de la varianza. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado por Zhou et al. (2022), quienes indican que los procesos térmicos inducen transformaciones químicas que pueden ser capturadas eficazmente mediante técnicas multivariantes, permitiendo diferenciar muestras en función de su grado de transformación.

En este contexto, la asociación del tratamiento control con aldehídos, cetonas, hidrocarburos y ácidos reflejó un perfil característico de oxidación lipídica térmica, donde la degradación de ácidos grasos insaturados dio lugar a la formación de compuestos secundarios volátiles. Este patrón concuerda con lo descrito por Andaleeb et al. (2023), quienes reportaron incrementos significativos de aldehídos y cetonas tras la cocción, destacando su papel como marcadores de oxidación. No obstante, es importante considerar que estos compuestos, si bien son indicadores de deterioro en altas concentraciones, también forman parte del aroma típico de productos cárnicos cocidos en niveles moderados, lo que reforzó la necesidad de interpretar su presencia en función de su proporción relativa dentro del sistema.

Por su parte, la posición del tratamiento con BHT dentro del espacio multivariado, aún asociado parcialmente a aldehídos y cetonas, sugirió que, si bien el antioxidante ejerce un efecto modulador sobre la oxidación lipídica, no impide completamente la formación de compuestos derivados del tratamiento térmico. Este comportamiento ha sido reportado por Li et al. (2024), quienes señalaron que los antioxidantes sintéticos reducen la velocidad de

oxidación, pero no eliminan las rutas de formación de compuestos volátiles inducidas por calor, especialmente en sistemas ricos en ácidos grasos insaturados.

En cuanto a los tratamientos con AEN, su agrupación estuvo determinada principalmente por la contribución de terpenos, óxidos y alcoholes, lo que evidencia que estos compuestos no solo están presentes, sino que dominan la variabilidad multivariante del sistema incluso después de la cocción. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Marçal et al. (2022), quienes indicaron que los CV propios de los AE pueden mantenerse como variables discriminantes en análisis multivariados, aun cuando se produzcan pérdidas por volatilización durante el tratamiento térmico.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El perfil de AG de las hamburguesas de pollo se mantuvo estable en todos los tratamientos, evidenciando que la adición de AEN, tanto en forma libre como microencapsulada, no alteró la composición lipídica de la matriz. En todos los casos predominó un patrón característico de carne aviar, con mayor proporción de MUFA, principalmente ácido oleico, seguido de PUFA como el ácido linoleico y saturados como el ácido palmítico. Esta invariabilidad responde a que el perfil de AG está determinado principalmente por factores intrínsecos de la materia prima, como la alimentación y fisiología del animal, mientras que modificaciones en la formulación tienen un efecto limitado. En este contexto, el AEN, constituido mayoritariamente por compuestos terpénicos y con contenido insignificante de lípidos, no posee capacidad para modificar el perfil de AG. En consecuencia, la ausencia de diferencias entre tratamientos constituye un resultado esperado y coherente, confirmando que el perfil lipídico se conserva estable y mantiene características nutricionales favorables independientemente del tratamiento aplicado.
2. El perfil de CV de las hamburguesas de pollo evidenció que la adición de AEN, tanto en forma libre como microencapsulada, influyó principalmente en la modulación del perfil de CV mediante la incorporación de terpenos. En la hamburguesa cruda, los tratamientos con AE se caracterizaron por el predominio de limoneno, en contraste con el control y el tratamiento con BHT, donde dominaron compuestos sulfurados propios de la carne. No obstante, tras la cocción, todos los tratamientos presentaron un incremento marcado de aldehídos y cetonas, especialmente hexanal, confirmando la predominancia de la oxidación lipídica térmica como principal vía de generación de CV. Aunque los tratamientos con AE, en particular los microencapsulados, mostraron una mayor retención relativa de terpenos, estos disminuyeron respecto al estado crudo debido a procesos de volatilización y degradación térmica. En consecuencia, ni la concentración ni la microencapsulación del AE lograron inhibir de manera consistente la formación de compuestos secundarios de oxidación; sin embargo, sí permitieron diferenciar el perfil volátil al aportar compuestos aromáticos característicos, evidenciando que su efecto es predominantemente modificador del perfil sensorial más que protector frente al deterioro oxidativo.

3. El PCA demostró que la variabilidad del perfil de CV estuvo condicionada por la interacción entre la formulación y el tratamiento térmico. En la hamburguesa cruda, la diferenciación se explicó principalmente por la presencia de compuestos sulfurados en el control y el tratamiento con BHT, frente al predominio de terpenos, alcoholes y otros compuestos derivados del AE en los tratamientos con AEN. Tras la cocción, se produjo una redistribución de la varianza, donde el control se asoció principalmente con compuestos derivados de la oxidación lipídica, mientras que los tratamientos con AEN conservaron su agrupación por la presencia de terpenos, aunque con menor intensidad debido a procesos de volatilización y degradación térmica. Asimismo, el efecto de la concentración fue determinante, evidenciándose una mayor asociación de compuestos característicos en los tratamientos con mayor contenido de AE.

5.2. Recomendaciones

1. Se recomienda evaluar el efecto del AEN en concentraciones mayores o en combinación con otras fuentes lipídicas para determinar si es posible inducir modificaciones en el perfil de AG del producto final. Asimismo, se recomienda analizar el comportamiento de estos tratamientos durante periodos prolongados de almacenamiento, con el fin de determinar su influencia sobre la estabilidad oxidativa de los lípidos y la conservación del perfil de ácidos grasos.
2. Se recomienda evaluar el efecto del AEN en diferentes concentraciones y sistemas de encapsulación para optimizar la retención de compuestos aromáticos durante el procesamiento térmico. Asimismo, sería pertinente analizar la evolución del perfil de CV durante el almacenamiento, con el fin de determinar la estabilidad aromática y la posible formación de compuestos asociados al deterioro. Además, se sugiere complementar estos resultados con estudios sensoriales que permitan relacionar los cambios en el perfil de CV con la percepción aromática y la aceptación del consumidor.
3. Se recomienda ampliar el análisis multivariante incorporando variables relacionadas con almacenamiento y tiempo de conservación, a fin de evaluar la evolución del perfil de CV y su impacto en la diferenciación de tratamientos. Asimismo, sería pertinente integrar el PCA con análisis sensoriales y parámetros de oxidación lipídica para establecer relaciones más completas entre la composición volátil, las características aromáticas y la estabilidad del producto.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahamed, Z., Seo, J. K., Eom, J. U., & Yang, H. S. (2024). Volatile Compounds for Discrimination between Beef, Pork, and Their Admixture Using Solid-Phase-Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry (SPME-GC-MS) and Chemometrics Analysis. *Food Science of Animal Resources*, 44(4), 934. <https://doi.org/10.5851/KOSFA.2024.E32>
- Ahamed, Z., Seo, J. kyu, Eom, J. U., & Yang, H. S. (2023). Optimization of volatile compound extraction on cooked meat using HS-SPME-GC-MS, and evaluation of diagnosis to meat species using volatile compound by multivariate data analysis. *LWT*, 188, 115374. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.115374>
- Al-Khalili, M., Pathare, P. B., Rahman, S., & Al-Habsi, N. (2025). Aroma compounds in food: Analysis, characterization and flavor perception. *Measurement: Food*, 18, 100220. <https://doi.org/10.1016/J.MEAFOO.2025.100220>
- Al, F., Haskaraca, G., & Yildiz, S. (2024). Ultrasound-assisted chilling to minimize sodium hypochlorite use while reducing pathogens and preserving quality in chicken breast meat. *LWT*, 213, 117107. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.117107>
- Almeida, L. C. de, Bertolo, M. R. V., Cardoso, D. R., & Bogusz, S. (2023). Effect of Hop β -Acids Extract Supplementation on the Volatile Compound Profile of Roasted Chicken Meat. *Processes*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/PR11010153/S1>
- Ambrosio, C. M. S., Ikeda, N. Y., Miano, A. C., Saldaña, E., Moreno, A. M., Stashenko, E., Contreras-Castillo, C. J., & Da Gloria, E. M. (2019). Unraveling the selective antibacterial activity and chemical composition of citrus essential oils. *Scientific Reports 2019 9:1*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54084-3>
- Andaleeb, R., Zhang, D., Jiang, S., Zhang, Y., & Liu, Y. (2023). Volatile profile and multivariant analysis of Sanhuang chicken breast in combination with Chinese 5-spice blend and garam masala. *Food Science and Human Wellness*, 12(1), 57–68. <https://doi.org/10.1016/J.FSHW.2022.07.023>
- AOCS. (2003). *Official methods and recommended practices...* - Google Académico.
- Ayseli, M., Filik, G., & SELLİ, S. (2014). Evaluation of volatile compounds in chicken breast meat using simultaneous distillation and extraction with odour activity value. *JOURNAL OF FOOD AND NUTRITION RESEARCH*, 53(2).

<https://avesis.cu.edu.tr/yayin/63ce0448-06d2-4fb1-8894-6026a441059d/evaluation-of-volatile-compounds-in-chicken-breast-meat-using-simultaneous-distillation-and-extraction-with-odour-activity-value>

- Babushok, V. I., Linstrom, P. J., & Zenkevich, I. G. (2011). Retention Indices for Frequently Reported Compounds of Plant Essential Oils. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 40(4). <https://doi.org/10.1063/1.3653552/951258>
- Bak, K. H., Richards, M. P., Bak, K. H., & Richards, M. P. (2021). Hexanal as a Predictor of Development of Oxidation Flavor in Cured and Uncured Deli Meat Products as Affected by Natural Antioxidants. *Foods* 2021, Vol. 10, 10(1). <https://doi.org/10.3390/FOODS10010152>
- Bleicher, J., Ebner, E. E., Bak, K. H., Bleicher, J., Ebner, E. E., & Bak, K. H. (2022). Formation and Analysis of Volatile and Odor Compounds in Meat—A Review. *Molecules* 2022, Vol. 27, 27(19). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27196703>
- Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911–917. <https://doi.org/10.1139/O59-099>
- Burgos-Díaz, C., Leal-Calderon, F., Mosi-Roa, Y., Chacón-Fuentes, M., Garrido-Miranda, K., Opazo-Navarrete, M., Quiroz, A., & Bustamante, M. (2024). Enhancing the Retention and Oxidative Stability of Volatile Flavors: A Novel Approach Utilizing O/W Pickering Emulsions Based on Agri-Food Byproducts and Spray-Drying. *Foods*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/FOODS13091326/S1>
- Cartoni Mancinelli, A., Silletti, E., Mattioli, S., Dal Bosco, A., Sebastiani, B., Menchetti, L., Koot, A., van Ruth, S., & Castellini, C. (2021). Fatty acid profile, oxidative status, and content of volatile organic compounds in raw and cooked meat of different chicken strains. *Poultry Science*, 100(2), 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2020.10.030>
- Chen, X., Sun, S., Mi, M., Ding, L., Zhao, Y., Zhu, M., Wang, Y., Khan, M. Z., Wang, C., Li, M., & Man, L. (2025). Characterization and discrimination of quality and volatiles in beef hotpot based on GC-IMS and multivariate analysis. *Food Chemistry: X*, 29, 102682. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2025.102682>
- da Silva, B. D., do Rosário, D. K. A., Weitz, D. A., & Conte-Junior, C. A. (2022). Essential oil nanoemulsions: Properties, development, and application in meat and meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.01.026>

- Devatkal, S. K., Thorat, P. R., Manjunatha, M., & Anurag, R. K. (2011). Comparative antioxidant effect of aqueous extracts of curry leaves, fenugreek leaves and butylated hydroxytoluene in raw chicken patties. *Journal of Food Science and Technology* 2011 49:6, 49(6), 781–785. <https://doi.org/10.1007/S13197-011-0511-0>
- Djihad, N., Naima, F. O., Petronilho, S., Hamid, S., Bedjou, F. N. E., & Coimbra, M. A. (2024). Microencapsulation of Citrus limon essential oil by complex coacervation and release behavior of terpenic and derived volatile compounds. *Food Hydrocolloids*, 152, 109830. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.109830>
- Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., Lorenzo, J. M., Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., & Lorenzo, J. M. (2019). A Comprehensive Review on Lipid Oxidation in Meat and Meat Products. *Antioxidants* 2019, Vol. 8, 8(10). <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8100429>
- E. Barrado, M. T. Mayo, A. Tesedo, H. Romero, & F. de la Rosa. (2008). *Composición grasa de diversos alimentos servidos en establecimientos de “comida rápida.”*
- English, C. (2022). Understanding the Origins of Siloxane Ghost Peaks in Gas Chromatography | LCGC International. In *Understanding the Origins of Siloxane Ghost Peaks in Gas Chromatography | LCGC International* (06 ed., Vol. 18, pp. 10–15). <https://www.chromatographyonline.com/view/understanding-the-origins-of-siloxane-ghost-peaks-in-gas-chromatography>
- Fisher, K., & Phillips, C. (2008). Potential antimicrobial uses of essential oils in food: is citrus the answer? *Trends in Food Science & Technology*, 19(3), 156–164. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2007.11.006>
- Franco-Vega, A., Reyes-Jurado, F., Cardoso-Ugarte, G. A., Sosa-Morales, M. E., Palou, E., & López-Malo, A. (2016). Sweet Orange (*Citrus sinensis*) Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 783–790. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00089-4>
- Gangwar, A., Tewari, G., Pande, C., Prakash, O., Tewari, L. M., Kabdal, T., & Joshi, M. (2026). Molecular docking insights and comparative GC-MS analysis of fresh and dried *Hedychium spicatum* Buch.-Ham. essential oils with a focus on antioxidant activity. *Biochemical Systematics and Ecology*, 125, 105199. <https://doi.org/10.1016/J.BSE.2025.105199>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research*

- International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- González-Mas, M. C., Rambla, J. L., López-Gresa, M. P., Amparo Blázquez, M., & Granell, A. (2019). Volatile compounds in citrus essential oils: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science*, 10, 433929. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00012/FULL>
- Guo, J., Mäkinen, M., & Jänis, J. (2025). Comprehensive chemical profiling of citrus peel essential oils by direct-infusion ultrahigh-resolution FT-ICR MS and high-resolution GC–QTOF MS. *Journal of Food Composition and Analysis*, 148, 108204. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2025.108204>
- Hartman, L., & Lago, R. C. A. (1973). *Rapid Preparation of Fatty Acid Methyl Esters from Lipids. Laboratory Practices*, 22, 475-476. - References - Scientific Research Publishing.
- Heck, R. T., Lorenzo, J. M., Dos Santos, B. A., Cichoski, A. J., de Menezes, C. R., & Campagnol, P. C. B. (2021). Microencapsulation of healthier oils: an efficient strategy to improve the lipid profile of meat products. *Current Opinion in Food Science*, 40, 6–12. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2020.04.010>
- Ibáñez, M. D., Sanchez-Ballester, N. M., Blázquez, M. A., Ibáñez, M. D., Sanchez-Ballester, N. M., & Blázquez, M. A. (2020). Encapsulated Limonene: A Pleasant Lemon-Like Aroma with Promising Application in the Agri-Food Industry. A Review. *Molecules* 2020, Vol. 25, 25(11). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25112598>
- Kosowska, M., Majcher, M. A., & Fortuna, T. (2017). Volatile compounds in meat and meat products. *Food Science and Technology*, 37(1), 1–7. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.08416>
- Li, H., Zhao, X., Qin, S., Li, J., Tang, D., & Xi, B. (2024). GC-IMS and multivariate analyses of volatile organic components in different Chinese breeds of chickens. *Heliyon*, 10(8), e29664. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29664>
- Marçal, J. O., Oliveira, G. P., Rubim, F. M., Correa, L. F., dos Santos, D. B., Assis, L. G. A., Geraldo, A., Faria, P. B., & Lima, L. M. Z. (2022). The volatile compound profile in the meat of chickens raised in a free-range system varies with sexual maturity. *Food Chemistry Advances*, 1, 100098. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100098>
- McGorin, R. J. (2011). The significance of volatile sulfur compounds in food flavors. *ACS Symposium Series*, 1068, 3–31. <https://doi.org/10.1021/BK-2011-1068.CH001>
- Menegali, B. S., Selani, M. M., Saldaña, E., Patinho, I., Diniz, J. P., Melo, P. S., Pimentel Filho, N. de J., & Contreras-Castillo, C. J. (2020). Pink pepper extract as a natural antioxidant in chicken burger: Effects on oxidative stability and dynamic sensory profile using

15 **Temporal Dominance of Sensations. LWT, 121, 108986.**
<https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108986>

Molina Ortiz, S. E., Mauri, A., Monterrey-Quintero, E. S., Trindade, M. A., Santana, A. S., & Favaro-Trindade, C. S. (2009). Production and properties of casein hydrolysate microencapsulated by spray drying with soybean protein isolate. *LWT - Food Science and Technology*, 42(5), 919–923. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2008.12.004>

Mottram, D. S. (1998). Flavour formation in meat and meat products: a review. *Food Chemistry*, 62(4), 415–424. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00076-4)

9 **association studies of the fatty acid composition of Korean native chicken breast meat.**
Journal of Animal Science and Technology, 67(2), 314.
<https://doi.org/10.5187/JAST.2024.E24>

5 **flavor compounds identification in chicken meat and deodorizing effects of polyphenol and spice extracts. Food Chemistry: X, 29, 102659.**
<https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2025.102659>

Nori, M. P., Favaro-Trindade, C. S., Matias de Alencar, S., Thomazini, M., de Camargo Balieiro, J. C., & Contreras Castillo, C. J. (2011). Microencapsulation of propolis extract by complex coacervation. *LWT - Food Science and Technology*, 44(2), 429–435. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2010.09.010>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Producción avícolas*. <https://www.fao.org/poultry-production-products/production/es/>

Ravindran, V. (2024). Nutrition of meat animals: Poultry. *Encyclopedia of Meat Sciences*, 8–16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00209-X>

Rimini, S., Petracci, M., & Smith, D. P. (2014). The use of thyme and orange essential oils blend to improve quality traits of marinated chicken meat. *Poultry Science*, 93(8), 2096–2102. <https://doi.org/10.3382/PS.2013-03601>

Rios-Mera, J. D., Saldaña, E., Patinho, I., Selani, M. M., & Contreras-Castillo, C. J. (2021). Enrichment of NaCl-reduced burger with long-chain polyunsaturated fatty acids: Effects on physicochemical, technological, nutritional, and sensory characteristics. *Meat Science*, 177, 108497. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2021.108497>

Rios-Mera, J. D., Saldaña, E., Ramírez, Y., Auquiñivín, E. A., Alvim, I. D., & Contreras-Castillo, C. J. (2019). Encapsulation optimization and pH- and temperature-stability of

the complex coacervation between soy protein isolate and inulin entrapping fish oil. *LWT*, 116, 108555. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108555>

Shahbazi, Y., & Shavisi, N. (2021). Limonene. *A Centum of Valuable Plant Bioactives*, 77–91. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822923-1.00016-9>

Shankar, S., Karboune, S., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2022). Development of antimicrobial formulation based on essential oils and gamma irradiation to increase the shelf life of boneless chicken thighs. *Radiation Physics and Chemistry*, 192, 109893. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2021.109893>

Timilsena, Y. P., Wang, B., Adhikari, R., & Adhikari, B. (2017). Advances in microencapsulation of polyunsaturated fatty acids (PUFAs)-rich plant oils using complex coacervation: A review. *Food Hydrocolloids*, 69, 369–381. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2017.03.007>

Yeo, H., Balagiannis, D. P., Koek, J. H., Parker, J. K., Yeo, H., Balagiannis, D. P., Koek, J. H., & Parker, J. K. (2022). Comparison of Odorants in Beef and Chicken Broth—Focus on Thiazoles and Thiazolines. *Molecules* 2022, Vol. 27, 27(19). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27196712>

Zhou, H., Cui, W., Gao, Y., Li, P., Pu, X., Wang, Y., Wang, Z., & Xu, B. (2022). Analysis of the volatile compounds in Fuliji roast chicken during processing and storage based on GC-IMS. *Current Research in Food Science*, 5, 1484–1493. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2022.09.005>

Zhou, T., Gao, H., Xing, B., Bassey, A., Yang, L., Li, C., & Li, C. (2022). Effect of heating temperature and time on the formation of volatile organic compounds during reactions between linoleic acid and free amino acids or myofibrillar proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 7644–7652. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16107>

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente al Dr. Juan Darío Ríos Mera y a la Dra. Carmen Milagros Sinche Ambrosio por la oportunidad brindada, por su paciencia, tiempo y constante apoyo a lo largo del prolongado proceso que consumió esta tesis. Su guía ha sido invaluable, y mi gratitud hacia ustedes es eterna.

DEDICATORIA

Dedico este camino a los sueños que me sostuvieron cuando todo parecía incierto. Con mucha valentía, asumí riesgos y con escasos recursos y apoyo, inicié esta travesía que hoy se convierte en aprendizaje, carácter y propósito.

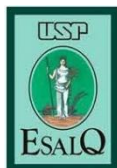
Es el camino, es el aprendizaje, es la Ingeniería de Industrias Alimentarias la que me enseñó a persistir, a caer y levantarme, a construir desde la dificultad y a creer incluso cuando las circunstancias no eran favorables.

A mi familia y a quienes, de alguna u otra forma, fueron luz en los momentos más complejos, y a la fuerza interior que nunca dejó de impulsarme, dedico este logro que no solo representa un título, sino la huella de cada esfuerzo, cada duda superada y cada sueño que se negó a rendirse.

Es entonces, ahora y para siempre.

ANEXOS

Anexo 1

Resultado **de los ácidos grasos** del T1

Universidade De São Paulo
Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz"
Departamento De Agroindústria, Alimentos E Nutrição
Laboratório Multiusuário De Bioquímica E Análise Instrumental



Ref.: Perfil de Ácidos Graxos em Óleos
Requerente: Juan Dario Rios Mera

RELATÓRIO

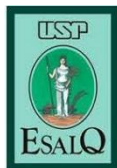
1. Amostra

Hamburguer T1

	AM. T1.B1	AM. T1.B2	AM. T1.B3
ÁCIDO GRAXO	% ÁREA	% ÁREA	% ÁREA
Mirístico - C14:0	0,4645	0,4464	0,4589
Miristoleico - C14:1(9)	0,1153	0,1154	0,1220
Pentadecílico - C15:0	0,0745	0,0743	0,0707
Palmítico - C16:0	19,6662	19,6345	20,2446
Palmitoleico - C16:1(9)	3,8716	3,7240	4,0871
Margárico - C17:0	0,1051	0,1093	0,1011
Esteárico - C18:0	6,4086	6,6218	6,3334
Elaídico - C18:1 (trans-9)	0,1810	0,1790	0,1749
Oleico - C18:1(9)	33,0455	33,5570	33,7987
N. I.	1,7285	1,7610	1,6969
Linoleico - C18:2(9,12)	29,9299	29,3080	28,9243
Araquídico - C20:0	0,1233	0,1241	0,1121
Gadoleico - C20:1(9)	0,2437	0,2622	0,2045
Linolênico - C18:3(9,12,15)	2,2973	2,2003	2,1643
Behênico - C22:0	0,0960	0,0958	0,0938
Tricosanóico - C23:0	1,6490	1,7869	1,4127

Prof. Dr. Severino M. Alencar
ESALQ/USP

Avenida Pádua Dias, 11 - V. Independência - CEP 13418-900 - Piracicaba, SP Brasil
Fones (19) 3447-6002, 3447-8693, 3447-6011

Anexo 2**Resultado de los ácidos grasos del T2**

Universidade De São Paulo
Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz"
Departamento De Agroindústria, Alimentos E Nutrição
Laboratório Multiusuário De Bioquímica E Análise Instrumental



Ref.: Perfil de Ácidos Graxos em Óleos

Requerente: Juan Dario Rios Mera

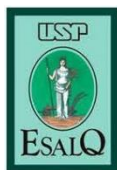
RELATÓRIO**1. Amostra**

Hamburguer T2

	AM. T2.B1	AM. T2.B2	AM. T2.B3
ÁCIDO GRAXO	% ÁREA	% ÁREA	% ÁREA
Mirístico - C14:0	0,4533	0,4481	0,4424
Miristoleico - C14:1(9)	0,1115	0,1262	0,1127
Pentadecílico - C15:0	0,0714	0,0677	0,0701
Palmítico - C16:0	19,8861	19,7390	19,9130
Palmitoleico - C16:1(9)	3,7649	4,0135	3,9491
Margárico - C17:0	0,1079	0,1036	0,1027
Esteárico - C18:0	6,5253	6,2632	6,2312
Elaídico - C18:1 (trans-9)	0,1736	0,1910	0,1704
Oleico - C18:1(9)	33,4289	32,9625	33,8498
N. I.	1,7441	1,7238	1,7098
Linoleico - C18:2(9,12)	29,4919	29,9889	29,4379
Araquídico - C20:0	0,1222	0,1139	0,1370
Gadoleico - C20:1(9)	0,2457	0,2357	0,2072
Linolênico - C18:3(9,12,15)	2,1886	2,3243	2,2167
Behênico - C22:0	0,0983	0,1087	0,1004
Tricosanóico - C23:0	1,5863	1,5898	1,3497

Prof. Dr. Severino M. Alencar
ESALQ/USP

Avenida Pádua Dias, 11 - V. Independência - CEP 13418-900 - Piracicaba, SP Brasil
Fones (19) 3447-6002, 3447-8693, 3447-6011

Anexo 3**Resultado de los ácidos grasos del T3**

Universidade De São Paulo
Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz"
Departamento De Agroindústria, Alimentos E Nutrição
Laboratório Multiusuário De Bioquímica E Análise Instrumental



Ref.: Perfil de Ácidos Graxos em Óleos

Requerente: Juan Dario Rios Mera

RELATÓRIO**1. Amostra**

Hamburguer T3

ÁCIDO GRAXO	AM. T3.B1 % ÁREA	AM. T3.B2 % ÁREA	AM. T3.B3 % ÁREA
Mirístico - C14:0	0,4614	0,4537	0,4526
Miristoleico - C14:1(9)	0,1188	0,1126	0,1155
Pentadecílico - C15:0	0,0686	0,0680	0,0685
Palmítico - C16:0	20,1002	19,7256	20,1003
Palmitoleico - C16:1(9)	3,9997	3,9467	4,0281
Margárico - C17:0	0,1102	0,1036	0,1036
Esteárico - C18:0	5,9254	5,8641	6,3459
Elaídico - C18:1 (trans-9)	0,1791	0,1770	0,1711
Oleico - C18:1(9)	34,1830	34,4331	33,7497
N. I.	1,6137	1,6437	1,7355
Linoleico - C18:2(9,12)	29,6008	29,7251	29,0792
Araquídico - C20:0	0,1277	0,1226	0,1105
Gadoleico - C20:1(9)	0,1990	0,2071	0,2014
Linolênico - C18:3(9,12,15)	2,2692	2,3079	2,1531
Behênico - C22:0	0,0912	0,0952	0,0908
Tricosanóico - C23:0	0,9519	1,0139	1,4942

Prof. Dr. Severino M. Alencar
ESALQ/USP

Avenida Pádua Dias,11 - V. Independência - CEP 13418-900 – Piracicaba, SP Brasil
Fones (19) 3447-6002, 3447-8693, 3447-6011

Anexo 4**Resultado de los ácidos grasos del T4**

Universidade De São Paulo
Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz"
Departamento De Agroindústria, Alimentos E Nutrição
Laboratório Multiusuário De Bioquímica E Análise Instrumental



Ref.: Perfil de Ácidos Graxos em Óleos

Requerente: Juan Dario Rios Mera

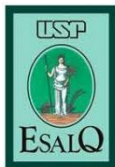
RELATÓRIO**1. Amostra**

Hamburguer T4

	AM. T4.B1	AM. T4.B2	AM. T4.B3
ÁCIDO GRAXO	% ÁREA	% ÁREA	% ÁREA
Mirístico - C14:0	0,4438	0,4495	0,5078
Miristoleico - C14:1(9)	0,1084	0,1221	0,1221
Pentadecílico - C15:0	0,0685	0,0758	0,0763
Palmítico - C16:0	19,7523	19,6070	19,8407
Palmitoleico - C16:1(9)	3,7927	3,8445	3,8596
Margárico - C17:0	0,1078	0,1061	0,1253
Esteárico - C18:0	6,1727	5,9029	6,4358
Elaídico - C18:1 (trans-9)	0,1780	0,1934	0,0669
Oleico - C18:1(9)	33,6772	34,0897	33,8836
N. I.	1,6409	1,6618	1,6468
Linoleico - C18:2(9,12)	30,0467	30,1615	29,5550
Araquídico - C20:0	0,1251	0,1340	0,1261
Gadoleico - C20:1(9)	0,1981	0,2010	0,1945
Linolênico - C18:3(9,12,15)	2,2726	2,3395	2,3009
Behênico - C22:0	0,1034	0,1006	0,1072
Tricosanóico - C23:0	1,3118	1,0108	1,1513

Prof. Dr. Severino M. Alencar
ESALQ/USP

Avenida Pádua Dias, 11 - V. Independência - CEP 13418-900 - Piracicaba, SP Brasil
Fones (19) 3447-6002, 3447-8693, 3447-6011

Anexo 5*Resultado de los ácidos grasos del T5*

Universidade De São Paulo
Escola Superior De Agricultura "Luiz De Queiroz"
Departamento De Agroindústria, Alimentos E Nutrição
Laboratório Multiusuário De Bioquímica E Análise Instrumental



Ref.: Perfil de Ácidos Graxos em Óleos

Requerente: Juan Dario Rios Mera

RELATÓRIO**1. Amostra**

Hamburguer T5

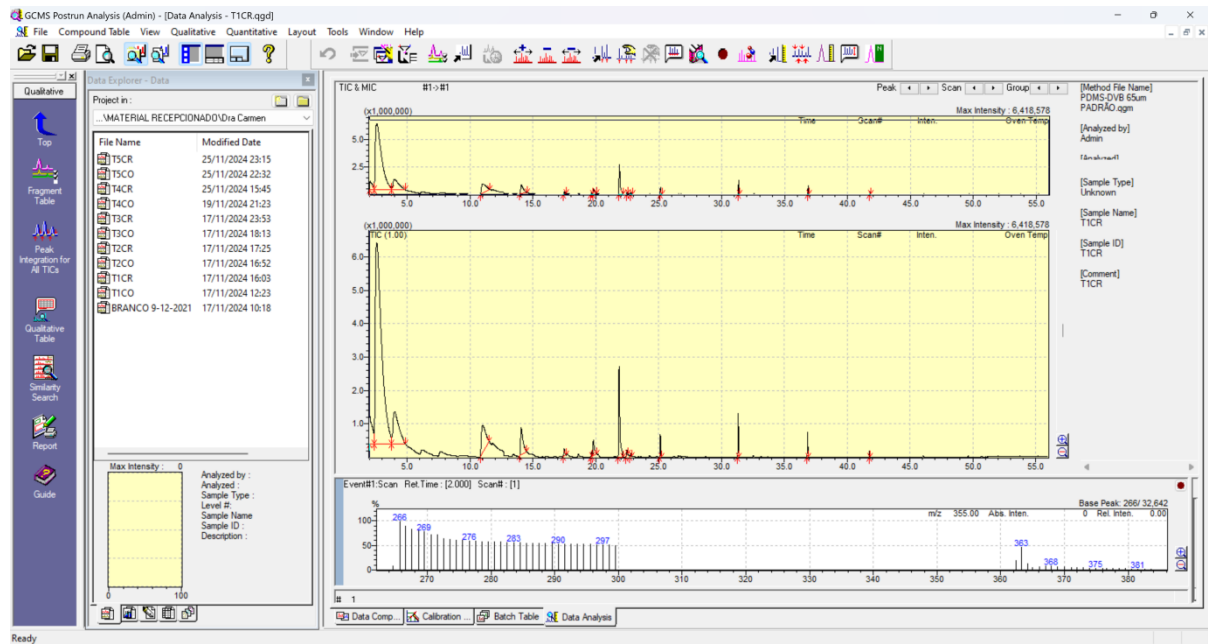
ÁCIDO GRAXO	AM. T5.B1	AM. T5.B2	AM. T5.B3
	% ÁREA	% ÁREA	% ÁREA
Mirístico - C14:0	0,4546	0,4490	0,4579
Miristoleico - C14:1(9)	0,1196	0,1053	0,1133
Pentadecílico - C15:0	0,0706	0,0710	0,0734
Palmítico - C16:0	19,3129	19,7267	19,8562
Palmitoleico - C16:1(9)	3,7693	3,7153	3,9478
Margárico - C17:0	0,1073	0,1141	0,1095
Esteárico - C18:0	5,8170	6,4938	6,2970
Elaídico - C18:1 (<i>trans</i> -9)	0,1816	0,1981	0,1772
Oleico - C18:1(9)	35,1111	33,3674	33,5848
N. I.	1,6952	1,7409	1,7720
Linoleico - C18:2(9,12)	29,5399	29,7342	29,4388
Araquídico - C20:0	0,1356	0,1297	0,1173
Gadoleico - C20:1(9)	0,2261	0,2393	0,2046
Linolênico - C18:3(9,12,15)	2,3216	2,2162	2,2122
Behênico - C22:0	0,1080	0,0993	0,0950
Tricosanóico - C23:0	1,0296	1,5996	1,5429

Prof. Dr. Severino M. Alencar
ESALQ/USP

Avenida Pádua Dias, 11 - V. Independência - CEP 13418-900 - Piracicaba, SP Brasil
Fones (19) 3447-6002, 3447-8693, 3447-6011

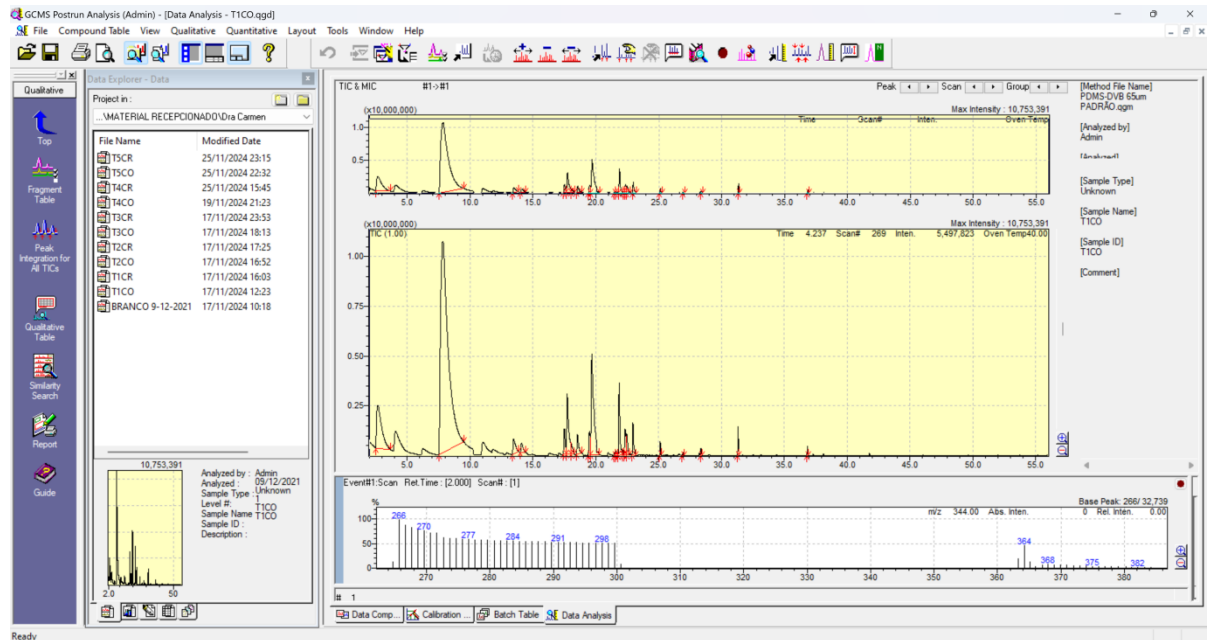
Anexo 6

Resultado de los compuestos volátiles del T1 crudo



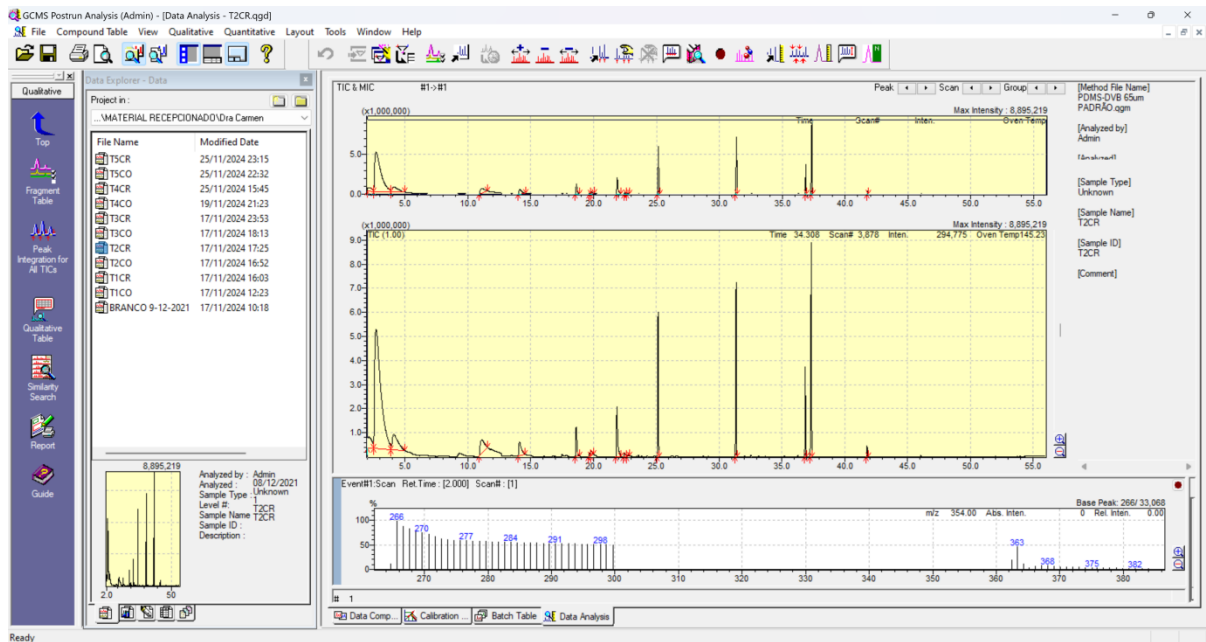
Anexo 7

Resultado de los compuestos volátiles del T1 cocido



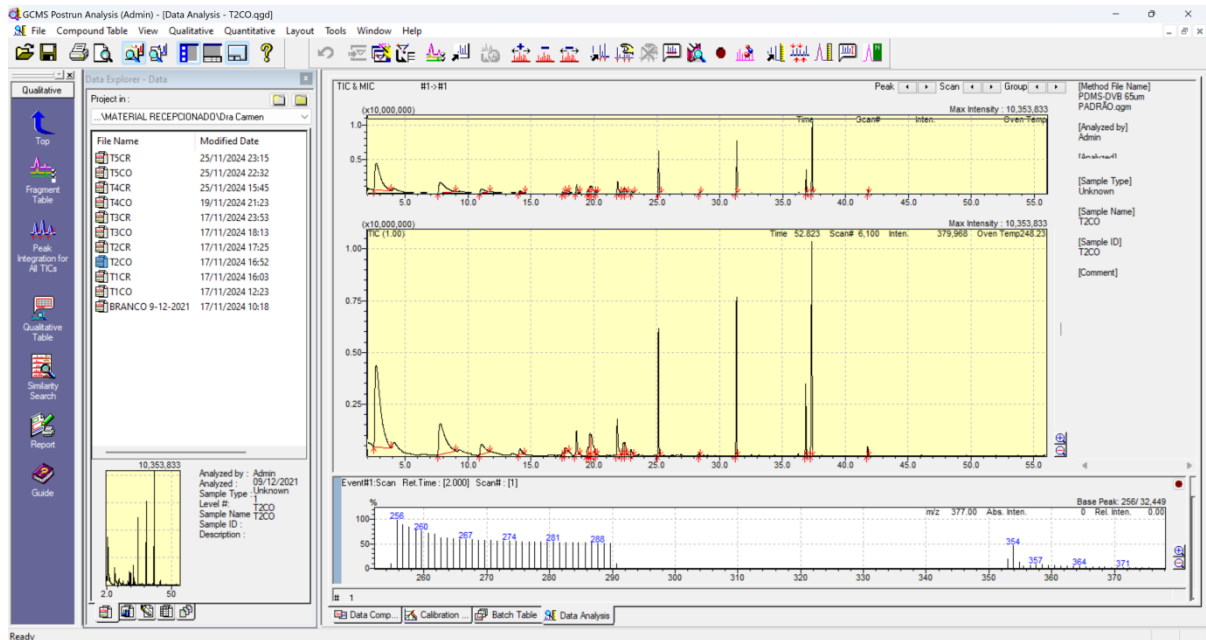
Anexo 8

Resultado de los compuestos volátiles del T2 crudo



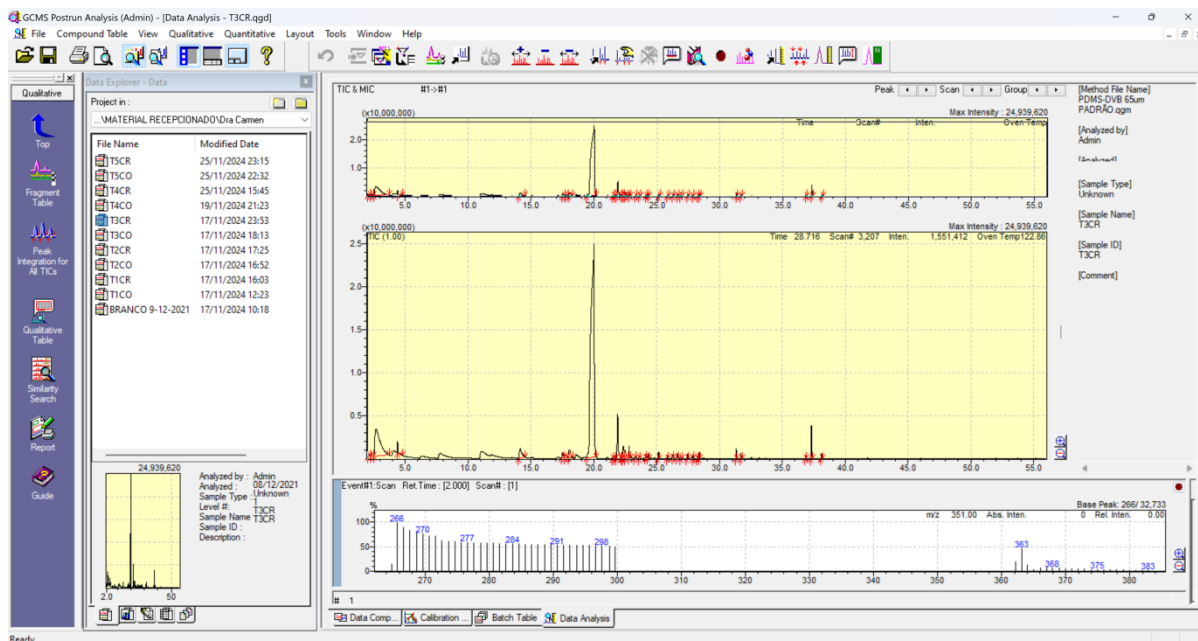
Anexo 9

Resultado de los compuestos volátiles del T2 cocido



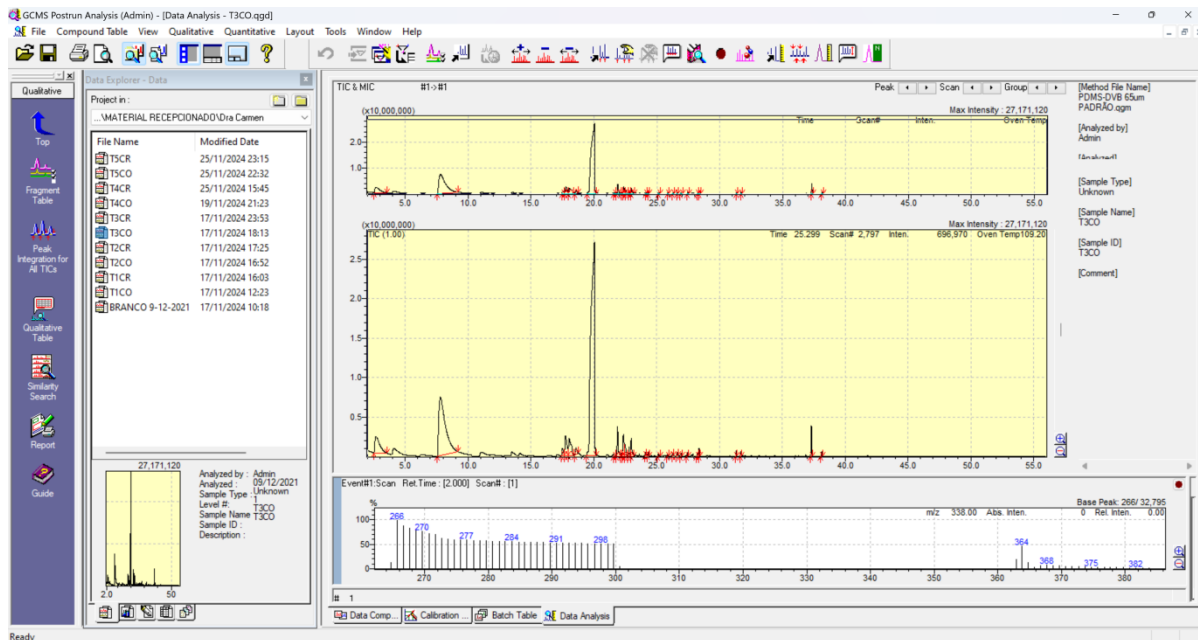
Anexo 10

Resultado de los compuestos volátiles del T3 crudo



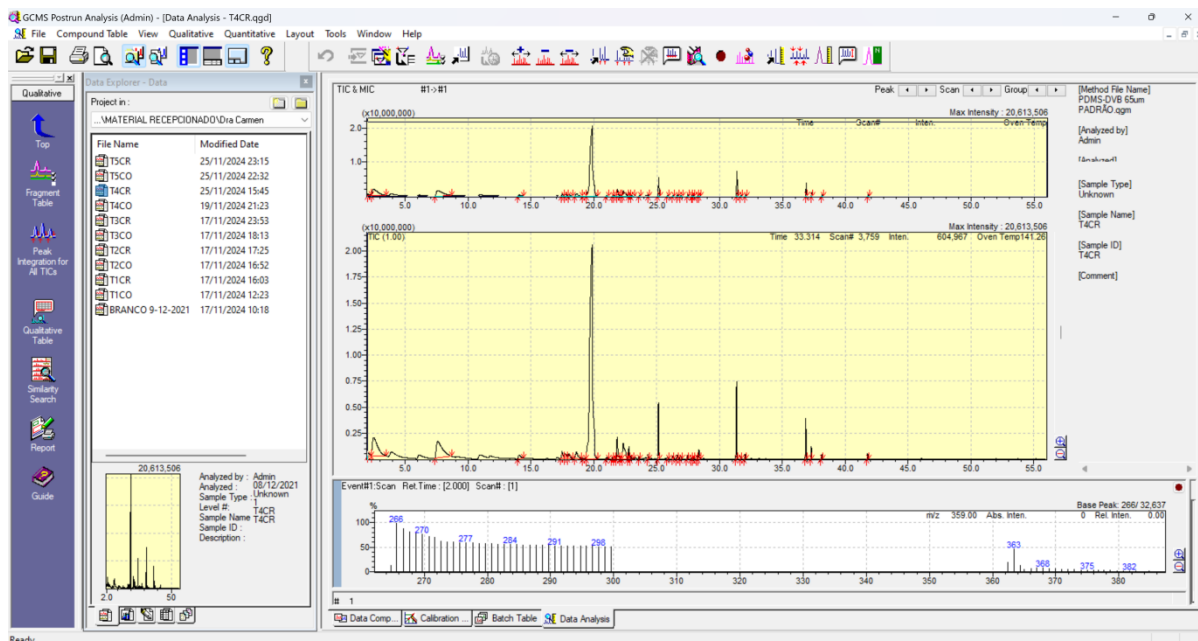
Anexo 11

Resultado de los compuestos volátiles del T3 cocido



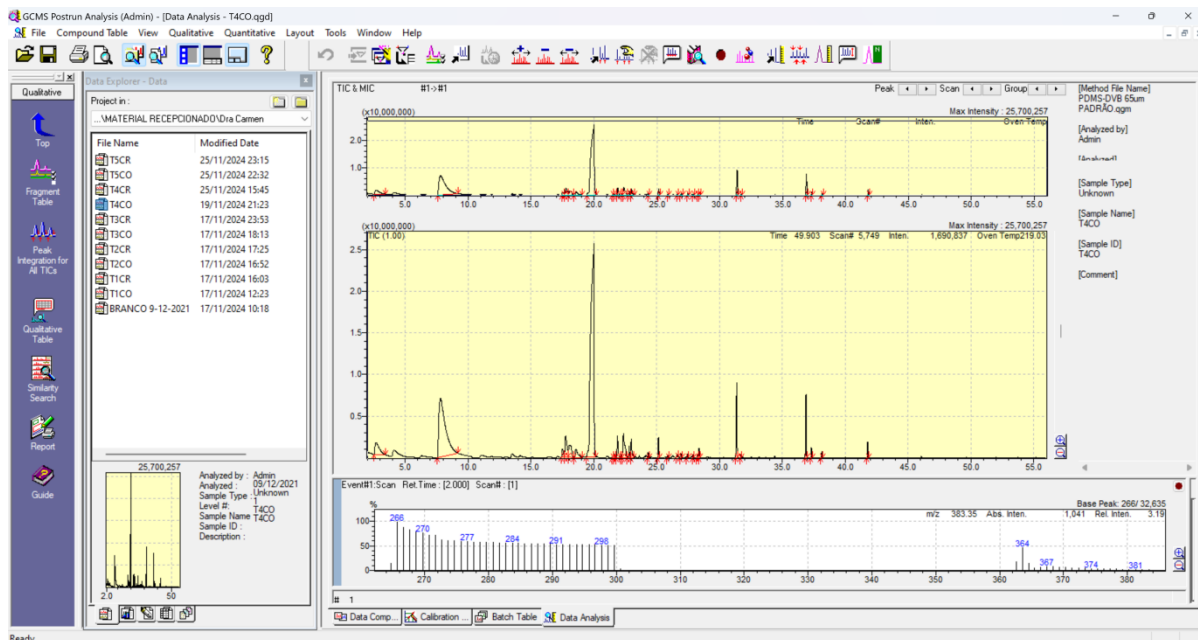
Anexo 12

Resultado de los compuestos volátiles del T4 crudo



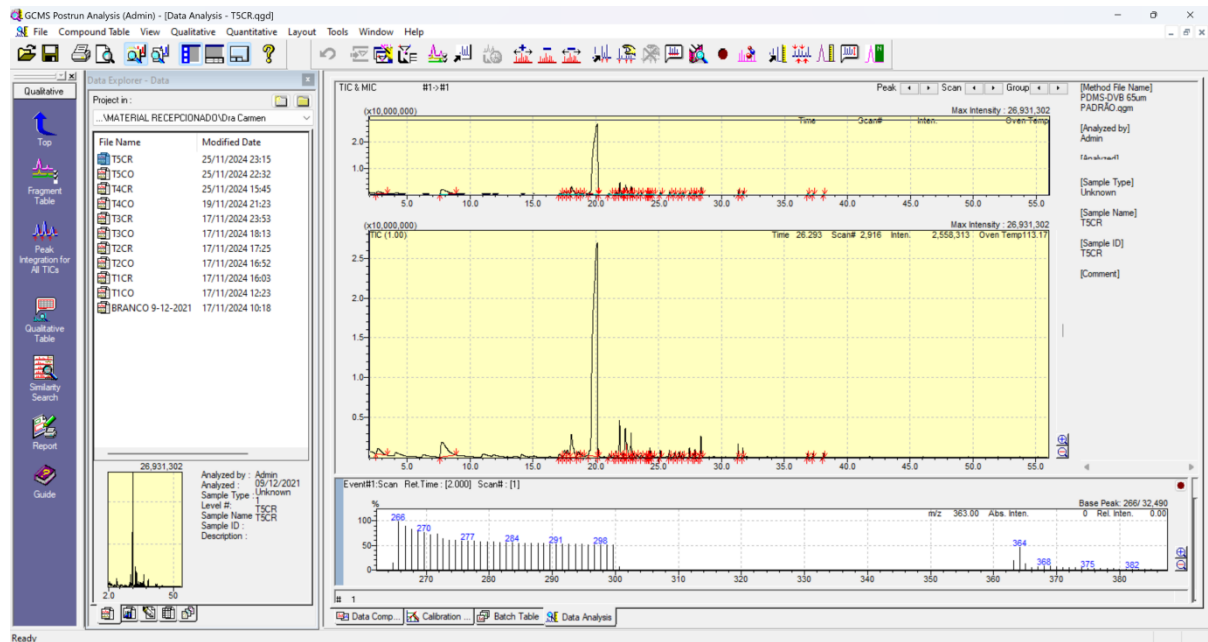
Anexo 13

Resultado de los compuestos volátiles del T4 cocido



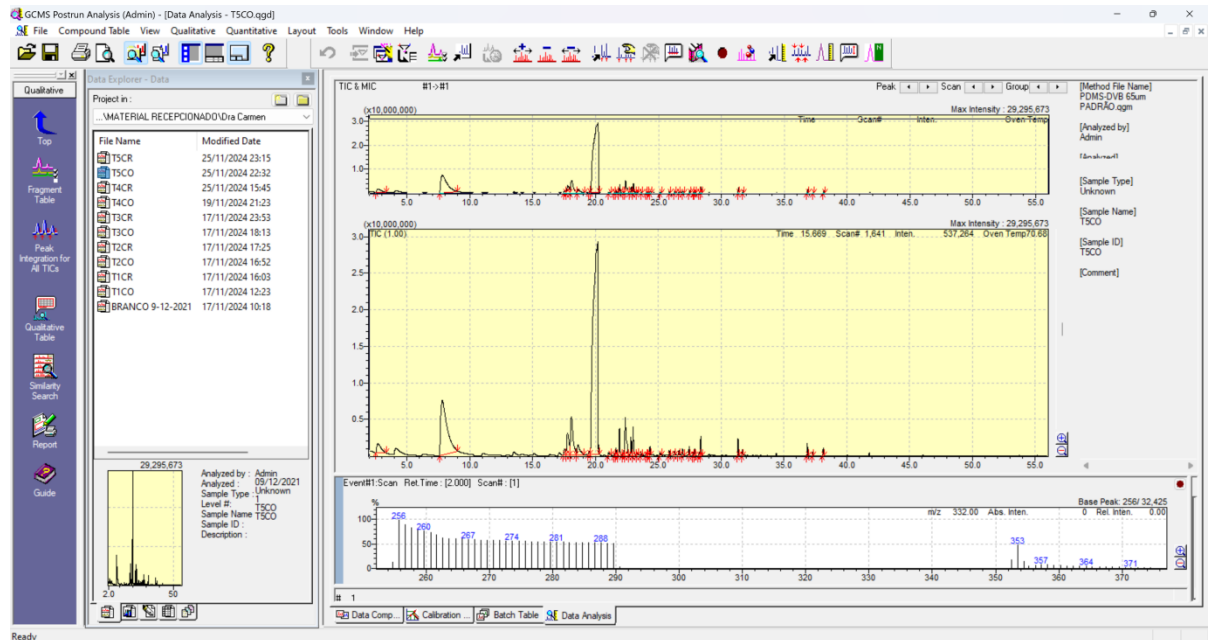
Anexo 14

Resultado de los compuestos volátiles del T5 crudo



Anexo 15

Resultado de los compuestos volátiles del T5 cocido



Anexo 16

Data de procesamiento de los compuestos volátiles para establecer la relación multivariada



Nota. El código QR contiene el siguiente link:

<https://drive.google.com/drive/folders/18kpeCHKila8s9nBz2sEnOYM5QCwb7LEB?usp=sharing>