

Revisión: aplicación de imágenes hiperespectrales en la determinación de inocuidad en productos hidrobiológicos

Review: application of hyperspectral imaging in determining the safety of hydrobiological products

Mónica Castro Barba¹, Roberto Simón Seminario Sanz¹
E.P. Ingeniería de Industrias Alimentarias.
Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

RESUMEN

Los productos hidrobiológicos son importantes por su aporte en la dieta humana y en el intercambio comercial internacional. Actualmente, la industria alimentaria busca implementar técnicas no destructivas para reducir pérdidas en las actividades de control de calidad, rapidez para obtener información y tomar decisiones en tiempo real en la producción. Las imágenes hiperespectrales (Hsi); es una técnica que posee ventajas por su bajo costo, confiabilidad de los resultados y la reducción de mermas por análisis en la cadena de la industria alimentaria. El objetivo fue realizar un análisis de la información científica sobre las aplicaciones de las Hsi para la determinación de inocuidad en productos hidrobiológicos. Recopilando artículos de investigación en las bases de datos: Elsevier, Taylor and Francis, Wiley y Google Académico; sobre las publicaciones en los años 2013 al 2021. Obteniéndose sesenta y nueve (69) artículos de investigación, de los que se referenciaron cuarenta y seis (46) estudios primarios. Las muestras sobre información de aplicaciones de Hsi se centraron en las especies: carpa herbívora, salmón, trucha arcoíris, camarón, tilapia, entre otros. Concluyendo que el uso de tecnologías no invasivas, como son las Hsi, generan una gran demanda en la industria alimentaria, al ser esta una tecnología eficiente, rápida y no destructiva.

Palabras Clave: Imágenes hiperespectrales, calidad, inocuidad, pescado, hidrobiológicos.

ABSTRACT

Hydrobiological products are important for their contribution to the human diet and international trade. Currently, the food industry seeks to implement non-destructive techniques to reduce losses in quality control activities, speed to obtain information and make decisions in real time in production. Hyperspectral imaging (Hsi) is a technique that has advantages due to its low cost, reliability of the results and the reduction of analysis losses in the food industry chain. The objective was to carry out an analysis of the scientific information on the applications of Hsi for the determination of safety in hydrobiological products. Compiling research articles in the following databases: Elsevier, Taylor and Francis, Wiley and Google Scholar; on publications in the years 2013 to 2021. Sixty-nine (69) research articles were obtained, of which forty-six (46) primary studies were referenced. The samples on Hsi application information focused on the following species: grass carp, salmon, rainbow trout, shrimp, tilapia, among others. In conclusion, the use of non-invasive technologies, such as Hsi, is in great demand in the food industry, as it is an efficient, fast and non-destructive technology.

Keywords: Hyperspectral imaging, quality, safety, fish, hydrobiological.

¹ E.P. Ingeniería de Industrias Alimentarias – UNF. Email: 2015103014@unf.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

La inocuidad es uno de los cuatro grupos básicos de características que conforman la calidad general de un alimento, junto con las propiedades nutricionales, organolépticas y comerciales. Las personas están interesadas en consumir alimentos libres de gérmenes, con la menor cantidad de aditivos químicos, aceptación sensorial, valor nutricional y alternativas para la prevención de enfermedades. (Salcido et al., 2010). En el año 2016 La producción pesquera mundial alcanzó los 171 millones de toneladas. La producción acuicultura representó un 47% del total y un 53% si se excluyen los usos no alimentarios como harina y aceite de pescado. La acuicultura ha sido el soporte para el crecimiento del suministro de pescado para el consumo humano (Nations & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018).

Las propiedades nutricionales del pescado son beneficiosas y nos aportan una variedad de nutrientes. Este alimento es una de las principales fuentes de omega 3 y una fuente de proteínas. "El pescado es generalmente una buena fuente de proteínas bajas en calorías y con alto contenido biológico, que proporciona vitaminas solubles en agua y liposolubles y muchos minerales". "Muchas especies son ricas en ácidos polinsaturados ω 3, cada vez más beneficiosa para la salud" (Fontanillo, 2005). Sin embargo, debido a la gran cantidad de agua contenida en el pescado, los productos pesqueros son propensos a descomponerse, lo que lleva a una rápida disminución de la calidad del pescado. Por lo tanto, la detección rápida y eficaz de la frescura del pescado será crucial para la futura industria pesquera (W. Zhang et al., 2021). Por ello para asegurar la inocuidad en productos hidrobiológicos se necesita tecnologías de detección rápida como lo son las imágenes hiperespectrales (Hsi), de modo que estas tecnologías sirvan para tener alimentos de alta calidad y asegurar la salud de los consumidores.

Los productos hidrobiológicos forman la base de la dieta en muchos países, siendo el principal problema de estos su alta perecibilidad. Los alimentos con alta perecibilidad son aquellos que se deterioran o pierden sus características organolépticas, antes de las 48 horas. (Marchant, 2019). La certificación de la inocuidad de los productos hidrobiológicos es importante en transacciones comerciales, al ofrecer productos al mercado internacional, de alta calidad, considerando la seguridad alimentaria. Las características intrínsecas de los productos hidrobiológicos, los hace alimentos altamente perecederos. En consecuencia, uno de los retos principales de la industria alimentaria es la preservación de su calidad e inocuidad.

Actualmente, es necesario investigar técnicas efectivas y rápidas para dar seguimiento a los cambios de calidad e índices de seguridad debido a la vulnerabilidad y perecibilidad de los productos hidrobiológicos. Las imágenes hiperespectrales (HSI) se han estudiado e implementado ampliamente como una alternativa a los métodos analíticos tradicionales y han demostrado su potencial para la determinación simultánea cuantitativa y cualitativa de la contaminación por nematodos, la medición y visualización de componentes físicos y químicos, el reconocimiento de muestras frescas y tratadas como así como la detección de deterioro microbiano y adulteración económica de forma rápida, objetiva y no destructiva.(Cheng & Sun, 2014). En correlación con lo mencionado, en esta presente revisión sistemática se intenta demostrar las aplicaciones de las imágenes hiperespectrales para determinación de inocuidad de los productos hidrobiológicos.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Los productos hidrobiológicos desempeñan un papel importante en la nutrición humana, pero se debe tener en cuenta que son alimentos altamente perecederos y cada vez existe un mercado más exigente en la calidad y seguridad alimentaria, por ello la industria de procesamiento de productos hidrobiológicos busca mejorar las necesidades y exigencia del mercado. Por esta razón es de interés elaborar una revisión de la literatura, para determinar las aplicaciones que vienen siendo desarrolladas en la determinación de la inocuidad de productos hidrobiológicos durante su procesamiento.

2.1. Definición de la cadena de búsqueda

En este apartado se identificó las palabras claves; las que fueron extraídas de las preguntas de investigación. Se dividió el concepto de productos hidrobiológicos en pescado, camarones y carne; imágenes hiperespectrales en HSI; inocuidad en seguridad alimentaria e inocuidad de alimentos.

Los principales problemas identificados fueron: inocuidad, calidad e imágenes hiperespectrales. Como resultado: las palabras clave seleccionadas fueron las siguientes: Hyperspectral imagen, food safety, fish. La cadena de búsqueda se obtuvo a partir del agrupamiento de las palabras clave y el uso de operadores lógicos AND y OR; como resultado, se obtuvo la siguiente cadena: “(Hyperspectral OR HSI) AND (Study OR Determination OR Application) AND (Sea products OR Food safety OR Food quality OR Fish quality)”.

En la presente investigación, se entiende por estudio a la obra o trabajo en el que se estudia o se investigan alimentos o productos hidrobiológicos, determinación es la acción y efecto de determinar la inocuidad alimentaria, aplicación consiste en el empleo de una cosa o puesta en práctica de los procedimientos adecuados para conseguir un fin.

2.2. Selección de las fuentes de datos

La actual revisión sistemática realiza una descripción y análisis del estado de la investigación científica en relación con la aplicación de las imágenes hiperespectrales para la determinación de inocuidad en productos hidrobiológicos, teniendo como fuentes de datos 1) ScienceDirect; 2) Wiley; 3) Taylor and Francis y 4) Google Académico, considerando como rango de tiempo del 2013 a 2020.

2.3. Desarrollo de la revisión

La presente revisión sistemática tiene como objetivo identificar el mayor número de estudios primarios que sean posibles, aplicando un plan de búsqueda equitativa; para que a través de estos estudios primarios se puedan resolver las preguntas de investigación. Para realizar el desarrollo de la presente revisión sistemática se tendrá en cuenta la realización de dos actividades.

2.3.1. Seleccionar los estudios primarios

Se definieron algunos criterios de inclusión y exclusión, con el fin de asegurar que la estrategia de búsqueda de los estudios primarios fuera neutral. En criterios de inclusión tenemos en cuenta lo siguiente: (CI1) estudios con idioma inglés; (CI2) estudios publicados durante el periodo de

enero de 2013 y diciembre de 2020; (CI3) estudios que lleven en el título por lo menos dos palabras clave; (CI4) estudios vinculados con la inocuidad de los productos hidrobiológicos.

Dentro de los criterios de exclusión se tendrá en cuenta lo siguiente: (CE1) estudios duplicados; (CE2) estudios que estén fuera del periodo comprendido; (CE3) estudios que no se relacionan con la determinación de la inocuidad de productos hidrobiológicos. Para la selección de los estudios primarios se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

1. Aplicar la cadena de búsqueda a la fuente de datos establecida.
2. Aplicar los criterios de inclusión CI1 y CI 2.
3. Emplear el criterio de inclusión CI3.
4. Leer resumen, introducción y conclusiones; asimismo, emplear el criterio de inclusión CI4 y los criterios de exclusión.

El snowballing se refiere al uso de la lista de referencias de un documento para identificar documentos adicionales que puede ser una buena alternativa al uso de búsquedas en base de datos para revisiones sistemáticas de la literatura. (Wohlin, 2014).

Tabla 1.

Número de investigaciones publicadas y estudios primarios

Fuentes de datos	Resultados de la cadena de Búsqueda	Estudios primarios
Science direct	57	41
Taylor and Francis	5	2
Wiley	3	2
Google académico	4	1
Total	69	46

2.3.2. Extraer y simplificar la información

Para extraer la información, los estudios primarios fueron plasmados en una matriz de consistencia; siendo un método de investigación fundamental para realizar el estado del arte. Donde se diseñó una hoja de cálculo en la cual se seleccionaron los siguientes datos de cada estudio primario: autor, año, título, revista, especie, objetivo, técnicas empleadas, rango de longitud, frecuencia, tiempo, temperatura; métodos, resultados y problemas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Determinación de inocuidad de productos hidrobiológicos

En los últimos años los métodos no invasivos para determinar inocuidad y calidad en la industria alimentaria han tenido un gran progreso, en la tabla 1 se muestra una recolección de artículos

sobre la aplicación de métodos no invasivos durante los últimos años para determinar inocuidad en productos hidrobiológicos.

3.2. Visión por computadora para determinar la inocuidad de productos hidrobiológicos

El procesamiento de imágenes y la visión por computadora (Cv) son los últimos avances en el campo informático. Se basa en áreas de conocimiento como la ciencia, la tecnología de la información y las matemáticas (Dacal-Nieto et al., 2009).

La visión por computadora para la inspección de productos ha experimentado un gran auge en diversos campos en los últimos años, pero se está desarrollando rápidamente para aplicar esta tecnología al proceso de fabricación y evaluar su calidad, principalmente en el sector agrícola de los países desarrollados. Una de las principales ventajas de los sistemas de visión por computadora (Svc) es que las imágenes se pueden utilizar para describir cuantitativamente varias propiedades físicas, como el tamaño, la morfología, el color y las propiedades de textura. Debido a que la imagen digital es simple, esta tecnología no es destructiva, rápida, precisa, objetiva, evita la inspección humana, que tiende a ser costosas, subjetivas e inexactas a largo plazo. La visión artificial se ha utilizado para capturar y analizar imágenes de escenas reales utilizando computadoras de control de procesos o adquisición de datos (Agrippi, 2014)

Tabla 2.

Métodos no invasivos utilizados en la determinación de inocuidad de productos hidrobiológicos

Método	Especie	Referencia
Espectroscopia Raman	• Jurel (<i>Trachurus trachurus</i>),	(Velioglu et al., 2015)
	• anchoa europea (<i>Engraulis encrasicolus</i>)	
	• Salmonete (<i>Mullus surmuletus</i>)	
	• Pez azul (<i>Pomatomus saltatrix</i>)	
	• Salmón del Atlántico (<i>Salmo salar</i>)	
	• Rubio volador (<i>Trigla lucerna</i>).	
Sensor colorimétrico o teléfono inteligente integrada de TVB-N	• Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	(Y. Zhang et al., 2021)
	• Carpa cruciana (<i>Carassius oblongus</i>)	
	• Mero (<i>Cephalopholis argus</i>)	

HSI (reflectancia)	<ul style="list-style-type: none"> ● Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>) 	(Da-Wen, 2015)
Espectroscopia UV/VIS	<ul style="list-style-type: none"> ● Dace japonés (<i>Tribolodon hakonensis</i>) 	(Rahman et al., 2016)
Espectroscopia UV/VIS	<ul style="list-style-type: none"> ● Dace japonés (<i>Tribolodon hakonensis</i>) 	(Rahman et al., 2016) (Omwange et al., 2020)
Imágenes de fluorescencia UV	<ul style="list-style-type: none"> ● Dace japonés (<i>Tribolodon hakonensis</i>) ojo de pez 	
Biosensor óptico (Reflectancia)	<ul style="list-style-type: none"> ● Pescado 	(Fazial et al., 2018)
NIR	<ul style="list-style-type: none"> ● Cangrejo (<i>Brachyura</i>) 	(C. Wang et al., 2021)
Espectroscopia		
Espectroscopia infrarroja	<ul style="list-style-type: none"> ● Surimi (<i>Gadus chalcogrammus</i>) 	(Wei et al., 2018)
Espectroscopia Raman	<ul style="list-style-type: none"> ● Pez cabeza de serpiente (<i>Channa argus</i>) ● Bagre amarillo (<i>Pimelodus maculatus</i>) ● Carpa negra (<i>Mylopharyngodon piceus</i>) ● Filetes de tilapia ● (<i>Oreochromis niloticus</i>) 	(Xu et al., 2019)
Espectroscopia NMR	<ul style="list-style-type: none"> ● Pez cebra (<i>Danio rerio</i>) 	(Tan et al., 2018)
Espectroscopia VIS /NIR	<ul style="list-style-type: none"> ● Filetes de atún (<i>thunnus</i>) 	(Reis et al., 2017)

Tabla 3.*Aplicaciones de visión por computadora en productos hidrobiológicos.*

Especie	Aspecto	Método	Referencias
<i>Parabramis pekinensis</i>	Frescura	Visión por computador a y espectroscopía NIR	(Huang et al., 2016)
Rohu (L. rohita)	Frescura	Visión por computadora	(Issac et al., 2017)
Trucha (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Corte de cabeza y vientre adecuados	Algoritmo de procesamiento de imágenes	(Azarndel et al., 2019)
Salmon (<i>Salmonete Mullus barbatus</i>)	Frescura	Visión por computadora	(Tappi et al., 2017)
<i>Carpa común (Cyprinus carpio)</i>	Frescura	Visión artificial en combinación con redes neuronales artificiales	(Taheri-Garavand et al., 2019)
Salmón del atlántico (<i>Salmo salar</i>)	huesos residuales	Visión por computadora con modelos de redes neuronales	(Xie et al., 2021)
Trucha arcoiris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Frescura	Visión por computadora redes y neuronales artificiales (ANN) y máquinas de vectores de soporte (SVM)	(Lalabadi et al., 2020)

Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Color (pupilas y branquias)	Visión artificial	(Shi et al., 2018)
Dorada (<i>Sparus aurata</i>)	Frescura basada en cambio de color(ojos y branquias)	Visión artificial	(Dowlati et al., 2013)

3.3. Imágenes hiperespectrales

La imagen hiperespectral, también conocida como imagen espectral o imagen química, es una técnica innovadora que combina la espectroscopia óptica tradicional con imágenes de visión digital o de máquina para obtener información espectral y espacial de un sujeto de prueba (Sun, 2010).

Una imagen hiperespectral tiene varias bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético (Peñuelas, 2020).

Una imagen hiperespectral comprende cientos de planos de imagen bidimensionales en blanco y negro o en escala de grises, con una imagen plana para cada banda de ondas. Por tanto, la imagen hiperespectral consta de tres dimensiones, dos dimensiones espaciales, longitud (x) por ancho (y) y una dimensión espectral (λ). Esta matriz de datos de tres vías generalmente se denomina hipercubo, o alternativamente cubo espectral, datos cubo o volumen espectral (Manley, 2014).

3.4. Aplicación de las imágenes hiperespectrales aplicadas a la determinación de inocuidad de productos hidrobiológicos

En la industria alimentaria las aplicaciones de imágenes hiperespectrales han tenido un gran avance en los últimos años. En la siguiente tabla se muestra una recolección de la aplicación de imágenes hiperespectrales para determinar inocuidad en productos hidrobiológicos durante los últimos años.

Tabla 4.

Imágenes hiperespectrales aplicadas a productos hidrobiológicos

Muestra	Método/Mod o de detección	Rango espectral	Referencia
---------	---------------------------	-----------------	------------

Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi /Reflectancia	400-1000 nm	(Cheng, Sun, Pu, & Zhu, 2015)
Carpa plateada (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)			
Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi visible-infrarrojo cercano (Vis- NIR)/R	400-1000 nm	(Cheng, Sun, Pu, Chen, et al., 2015)
Almeja cocida sin concha (<i>Mulinia edulis</i>)	Hsi/ Tramitancia	600 a 950 nm	(Coelho et al., 2013)
Langostinos (Dendrobranchiata)	Hsi (Vis- NIR)/R	(400-1000 nm)	(Dai et al., 2015)
Salmon (<i>Salmo salar</i>)	Hsi infrarrojo cercano (NIR)/R	(900-1700 nm)	(He & Sun, 2015a)
Filetes de trucha arco iris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Hsi/R	430-1,010 nm	(Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019)
Camarón blanco (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	Hsi/R	900-1700 nm	(Yu et al., 2019)
Camarones sin cáscara (<i>Metapenaeus ensis</i>)	Hsi (Vis- NIR)/R	400-1000 nm	(Qu et al., 2015)

Camarón patiblanco (<i>Penaeus vannamei</i>)	Hsi /R	860-1700 nm	(Guo et al., 2021)
Filetes de carpa cruciana (<i>Carassius carassius</i>)	Hsi (NIR)/R	900 - 1700 nm	(X. Wang et al., 2019)
Trucha arcoiris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Hsi (SWIR)/R	1000 a 2500 nm	(Khoshtaghaza et al., 2016)
Salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (SW-NIR)/R	400 a 1000 nm	(Ivorra et al., 2013)
Pargo rojo, pargo bermellón, pargo de Malabar, pargo de verano flounder, white	Hsi VNIR/R UV SWIR Raman /R	419-1007 nm 438-718 nm 842-2532 nm 785 nm	(Qin et al., 2020)

bass y tilapia.

Bacalao (<i>Gadus morhua</i>)	Hsi (VIS-NIR)/R	430-1000 nm.	(Skjelvareid et al., 2017)
Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi (RAMAN)	924–979 nm	(Song et al., 2020)
Salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (LW-NIR)/R	964 a 1631 nm	(Wu et al., 2012)
Lobina negra (<i>Micropterus salmoides</i>)	Hsi/R	445, 474, 580, 612, 711, 813, 974 nm	(W. Zhang et al., 2021)
Filetes de salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (NIR)/R	900-1700 nm	(H. Zhang et al., 2020)
Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi/R	400-1000 nm	(Cheng, Sun, Pu, Wang, et al., 2015)
Lorna (<i>Sciaena deliciosa</i>)	Hsi/R	900-1500 nm	(Guzmán-Bermúdez et al., 2019)
Salmón ahumado (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (SW-NIR)/R	400 -1000 nm	(Ivorra et al., 2016)
Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi/R	400 -1000 nm	(Ivorra et al., 2016; Ma et al., 2017)
Filetes de salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (NIR)/R	941, 1105, 1161, 1178, 1222, 1242, 1359, 1366, 1628 y 1652 nm	(He & Sun, 2015b)

Filetes de salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (NIR)/R-A	900–1700 nm	(He & Sun, 2015a)
Bacalao (<i>Gadus morhua</i>)	Hsi /R	430–1000 nm	(Anderssen et al., 2020)
Carpa herbívora (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)	Hsi (Vis-NIR)/R	400-1000 nm	(Cheng & Sun, 2015)
Salmón (<i>Salmo salar</i>)	Hsi (VIS-NIR)/R	400-1700 nm	(Wu & Sun, 2013)

Podrían proponerse trabajos de predicción de deterioro, sabiendo que los valores de Ph en los productos hidrobiológicos después de su muerte son un parámetro que contribuye a su inestabilidad, favoreciendo así el desarrollo microbiano, otro estudio sería detección de toxinas que afecten la inocuidad y calidad de los productos hidrobiológicos, adulteración.

4. CONCLUSIONES

La revisión sistemática de la literatura de los últimos nueve años, sobre las aplicaciones de imágenes hiperespectrales en la determinación de inocuidad en productos hidrobiológicos identificó que los métodos no invasivos más utilizados son la espectroscopia UV, VIS, NIR, Raman y las imágenes hiperespectrales. En su mayoría los métodos basados por visión por computadora tomaron sobre estudio el aspecto de frescura, color y corte. Demostrándose que las imágenes hiperespectrales son técnicas eficientes rápidas, no destructivas y confiables. Habiéndose recopilado información sobre la aplicación de las imágenes hiperespectrales en la determinación de inocuidad de las especies hidrobiológicas: Carpa herbívora, salmón, bacalao, camarón, entre otros. Los artículos consultados provienen de las revistas científicas *LWT-Food Science & Technology*, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* y *Journal of Food Engineering* en inglés. De esta manera, la mayoría de los estudios usa la reflectancia y transmitancia como modo de detección, en el rango espectral de 400 a 2500 nm.

Para futuros trabajos a realizarse con este tipo de tecnología podrían centrarse en predicción de deterioro, calidad, adulteración y detección de toxinas en productos hidrobiológicos.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecer de manera muy especial a la Universidad Nacional de Frontera y en especial a la E.P. Industrias Alimentarias por todas las facilidades brindadas.

Asimismo, a la revista *Aypate*, y de manera muy especial a su Editor en Jefe y a su Comité Editorial, por la oportunidad brindada de difundir nuestros trabajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrippi. (2014, May 14). *Visión artificial para mejorar la calidad*.

<https://serviciosencalidadeinocuidad.wordpress.com/2014/05/14/vision-artificial-para-mejorar-la-calidad/>

Anderssen, K. E., Stormo, S. K., Skåra, T., Skjelvareid, M. H., & Heia, K. (2020). Predicting liquid loss of frozen and thawed cod from hyperspectral imaging. In *LWT* (Vol. 133, p. 110093). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110093>.

Azarmdel, H., Mohtasebi, S. S., Jafari, A., & Muñoz, A. R. (2019). Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 162, pp. 613–629). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.005>.

Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (2014). Hyperspectral imaging as an effective tool for quality analysis and control of fish and other seafoods: Current research and potential applications. In *Trends in Food Science & Technology* (Vol. 37, Issue 2, pp. 78–91). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.03.006>.

Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (2015). Data fusion and hyperspectral imaging in tandem with least squares-support vector machine for prediction of sensory quality index scores of fish fillet. In *LWT - Food Science and Technology* (Vol. 63, Issue 2, pp. 892–898). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.039>.

Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Pu, H.-B., Chen, X., Liu, Y., Zhang, H., & Li, J.-L. (2015). Integration of classifiers analysis and hyperspectral imaging for rapid discrimination of fresh from cold-stored and frozen-thawed fish fillets. *Journal of Food Engineering*, 161, 33–39.

Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Pu, H.-B., Wang, Q.-J., & Chen, Y.-N. (2015). Suitability of hyperspectral imaging for rapid evaluation of thiobarbituric acid (TBA) value in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillet. *Food Chemistry*, 171, 258–265.

Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Pu, H., & Zhu, Z. (2015). Development of hyperspectral imaging coupled with chemometric analysis to monitor K value for evaluation of chemical spoilage in fish fillets. In *Food Chemistry* (Vol. 185, pp. 245–253). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.111>

- Coelho, P. A., Soto, M. E., Torres, S. N., Sbarbaro, D. G., & Pezoa, J. E. (2013). Hyperspectral transmittance imaging of the shell-free cooked clam *Mulinia edulis* for parasite detection. *Journal of Food Engineering*, 117(3), 408–416.
- Dacal-Nieto, A., Vazquez-Fernandez, E., Formella, A., Martin, F., Torres-Guijarro, S., & Gonzalez-Jorge, H. (2009). A genetic algorithm approach for feature selection in potatoes classification by computer vision. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. <https://doi.org/10.1109/iecon.2009.5414871>.
- Dai, Q., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Pu, H., Zeng, X.-A., & Xiong, Z. (2015). Potential of visible/near-infrared hyperspectral imaging for rapid detection of freshness in unfrozen and frozen prawns. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 149, pp. 97–104). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.001>.
- Da-Wen, C. J.-H. &. (2015). Rapid and non-invasive detection of fish microbial spoilage by visible and near infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 1060–1068.
- Dowlati, M., Mohtasebi, S. S., Omid, M., Razavi, S. H., Jamzad, M., & de la Guardia, M. (2013). Freshness assessment of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by machine vision based on gill and eye color changes. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 28, 119, Issue 2, pp. 277–287). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.023>.
- Fazial, F. F., Tan, L. L., & Zubairi, S. I. (2018). Biezymatic creatine biosensor based on reflectance measurement for real-time monitoring of fish freshness. *Sensors and Actuators. B, Chemical*, 269, 36–45.
- Fontanillo, J. A. P. (2005). El pescado en la dieta.
- Guo, W., Li, X., & Xie, T. (2021, mayo 30). Method and system for nondestructive detection of freshness in *Penaeus vannamei* based on hyperspectral technology. *Aquaculture*, 538. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736512>
- Guzmán-Bermúdez, Y., Lozano-Gallardo, A., Gonzales-Rubio, R., Méndez, J., Torre, J. C.-L., & Siche, R. (2019). Prediction of the freshness of *Sciaena deliciosa* “lorna” using hyperspectral images. In *Agroindustrial science* (Vol. 9, Issue 1, pp. 99–107). <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.01.13>.
- He, H.-J., & Sun, D.-W. (2015a). Inspection of harmful microbial contamination occurred in edible salmon flesh using imaging technology. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 150, pp. 82–89). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.012>.

- He, H.-J., & Sun, D.-W. (2015b). Toward enhancement in prediction of *Pseudomonas* counts distribution in salmon fillets using NIR hyperspectral imaging. In *LWT - Food Science and Technology* (Vol. 62, Issue 1, pp. 11–18). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.036>.
- Huang, X., Xu, H., Wu, L., Dai, H., Yao, L., & Han, F. (2016). A data fusion detection method for fish freshness based on computer vision and near-infrared spectroscopy. *Analytical Methods*, 8(14), 2929–2935
- Ivorra, E., Girón, J., Sánchez, A. J., Verdú, S., Barat, J. M., & Grau, R. (2013). Detection of expired vacuum-packed smoked salmon based on PLS-DA method using hyperspectral images. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 117, Issue 3, pp. 342–349). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.02.022>.
- Ivorra, E., Sánchez, A. J., Verdú, S., Barat, J. M., & Grau, R. (2016). Shelf life prediction of expired vacuum-packed chilled smoked salmon based on a KNN tissue segmentation method using hyperspectral images. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 178, pp. 110–116). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.008>.
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019). Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1875–1883.
- Khoshtaghaza, M. H., Khojastehnazhand, M., Mojaradi, B., Goodarzi, M., & Saeys, W. (2016). Texture Quality Analysis of Rainbow Trout Using Hyperspectral Imaging Method. In *International Journal of Food Properties* (Vol. 19, Issue 5, pp. 974–983). <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042111>.
- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. In *Information and Software Technology* (Vol. 51, Issue 1, pp. 7–15). <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>.
- Lalabadi, H. M., Sadeghi, M., & Mireei, S. A. (2020). Fish freshness categorization from eyes and gills color features using multi-class artificial neural network and support vector machines. In *Aquacultural Engineering* (Vol. 90, p. 102076). <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102076>.
- Ma, J., Sun, D.-W., Qu, J.-H., & Pu, H. (2017). Prediction of textural changes in grass carp fillets as affected by vacuum freeze drying using hyperspectral imaging based on integrated group wavelengths. In *LWT - Food Science and Technology* (Vol. 82, pp. 377–385). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.040>.

- Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*, 43(24), 8200–8214
- Marchant, I. M. (2019). MANUAL Y CONSERVACION DE ALIMENTOS. Obtenido http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/profesor/Gastronomia/Manuales/Manual_Conservacion_de_Alimentos.pdf
- Nations, F. A. A. O. of T. U., & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. In *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. <https://doi.org/10.18356/37c4c7b4-es>
- Omwange, K. A., Al Riza, D. F., Sen, N., Shiigi, T., Kuramoto, M., Ogawa, Y., Kondo, N., & Suzuki, T. (2020). Fish freshness monitoring using UV-fluorescence imaging on Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish eye. *Journal of Food Engineering*, 287(110111), 110111.
- Peñuelas, R. A. C. (2020). Análisis de imágenes hiperespectrales y aplicaciones para la calidad de los alimentos. In *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* (Issue 79, pp. 101–102). <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020792988>.
- Ponce-Corona, E., Sanchez, M. G., Fajardo-Delgado, D., Castro, W., De-la-Torre, M., & Avila-George, H. (2019). Detection of Vegetation Using Unmanned Aerial Vehicles Images: A Systematic Review. In *2019 8th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS)*. <https://doi.org/10.1109/cimps49236.2019.9082434>.
- Qin, J., Vasefi, F., Hellberg, R. S., Akhbardeh, A., Isaacs, R. B., Yilmaz, A. G., Hwang, C., Baek, I., Schmidt, W. F., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish fillet substitution and mislabeling using multimode hyperspectral imaging techniques. In *Food Control* (Vol. 114, p. 107234). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107234>.
- Qu, J.-H., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Pu, H., Wang, Q.-J., & Ma, J. (2015). Discrimination of shelled shrimp (*Metapenaeus ensis*) among fresh, frozen-thawed and cold-stored by hyperspectral imaging technique. *Lebensmittel-Wissenschaft + [i.e. Und] Technologie. Food Science + Technology. Science + Technologie Alimentaire*, 62(1), 202–209.
- Rahman, A., Kondo, N., Ogawa, Y., Suzuki, T., Shirataki, Y., & Wakita, Y. (2016). Classification of fresh and spoiled Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish using ultraviolet–visible spectra of eye fluid with multivariate analysis. In

- Engineering in Agriculture, Environment and Food (Vol. 9, Issue 1, pp. 64–69). <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.06.004>.
- Reis, M. M., Martínez, E., Saitua, E., Rodríguez, R., Pérez, I., & Olabarrieta, I. (2017). Non-invasive differentiation between fresh and frozen/thawed tuna fillets using near infrared spectroscopy (Vis-NIRS). In *LWT* (Vol. 78, pp. 129–137). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.014>.
- Salcido, N. M. D. la F., De la Fuente Salcido, N. M., & Corona, J. E. B. (2010). Inocuidad y bioconservación de alimentos. In *Acta Universitaria* (Vol. 20, Issue 1, pp. 43–52). <https://doi.org/10.15174/au.2010.76>.
- Shi, C., Qian, J., Han, S., Fan, B., Yang, X., & Wu, X. (2018). Developing a machine vision system for simultaneous prediction of freshness indicators based on tilapia (*Oreochromis niloticus*) pupil and gill color during storage at 4°C. *Food Chemistry*, 243, 134–140.
- Skjelvareid, M. H., Heia, K., Olsen, S. H., & Stormo, S. K. (2017). Detection of blood in fish muscle by constrained spectral unmixing of hyperspectral images. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 212, pp. 252–261). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.029>.
- Song, S., Liu, Z., Huang, M., Zhu, Q., Qin, J., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish bones in fillets by Raman hyperspectral imaging technology. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 272, p. 109808). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109808>
- Sun, D.-W. (2010). *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. Elsevier.
- Taheri-Garavand, A., Fatahi, S., Banan, A., & Makino, Y. (2019). Real-time nondestructive monitoring of Common Carp Fish freshness using robust vision-based intelligent modeling approaches. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 159, pp. 16–27). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.023>.
- Tan, C., Huang, Y., Feng, J., Li, Z., & Cai, S. (2018). Freshness assessment of intact fish via 2D 1H J-resolved NMR spectroscopy combined with pattern recognition methods. In *Sensors and Actuators B: Chemical* (Vol. 255, pp. 348–356). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.060>.
- Tappi, S., Rocculi, P., Ciampa, A., Romani, S., Balestra, F., Capozzi, F., & Dalla Rosa, M. (2017). Computer vision system (CVS): a powerful non-destructive technique for the assessment of red mullet (*Mullus barbatus*) freshness. *European Food Research and Technology = Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und -Forschung. A*, 243(12), 2225–2233.

- Velioglu, H. M., Temiz, H. T., & Boyaci, I. H. (2015). Differentiation of fresh and frozen-thawed fish samples using Raman spectroscopy coupled with chemometric analysis. *Food Chemistry*, 172, 283–290.
- Wang, C., Yu, Z., Zhao, X., Lu, H., & Wang, Q. (2021). Rapid response to amine vapor based on fluorescent light-up sensor for real-time and visual detection of crawfish and fish freshness. *Dyes and Pigments*, 189(109228), 109228.
- Wang, X., Shan, J., Han, S., Zhao, J., & Zhang, Y. (2019). Optimization of Fish Quality by Evaluation of Total Volatile Basic Nitrogen (TVB-N) and Texture Profile Analysis (TPA) by Near-Infrared (NIR) Hyperspectral Imaging. In *Analytical Letters* (Vol. 52, Issue 12, pp. 1845–1859). <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1571077>.
- Wei, W., Yan, Y., Zhang, X. P., Liu, Y., Lu, Y., Shi, W. Z., & Xu, C. H. (2018, Diciembre 5). Enhanced chemical and spatial recognition of fish bones in surimi by Tri-step infrared spectroscopy and infrared microspectroscopic imaging. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 205, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.07.031>.
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering - EASE '14*. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>.
- Wu, D., & Sun, D.-W. (2013). Potential of time series-hyperspectral imaging (TS-HSI) for non-invasive determination of microbial spoilage of salmon flesh. *Talanta*, 111, 39–46.
- Wu, D., Sun, D.-W., & He, Y. (2012). Application of long-wave near infrared hyperspectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet. In *Innovative Food Science & Emerging Technologies* (Vol. 16, pp. 361–372). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.08.003>.
- Xie, T., Li, X., Zhang, X., Hu, J., & Fang, Y. (2021). Detection of Atlantic salmon bone residues using machine vision technology. *Food Control*, 123(107787), 107787.
- Xu, T., Wang, X., Huang, Y., Lai, K., & Fan, Y. (2019). Rapid detection of trace methylene blue and malachite green in four fish tissues by ultra-sensitive surface-enhanced Raman spectroscopy coated with gold nanorods. In *Food Control* (Vol. 106, p. 106720). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106720>.

- Yu, X., Wang, J., Wen, S., Yang, J., & Zhang, F. (2019). A deep learning based feature extraction method on hyperspectral images for nondestructive prediction of TVB-N content in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Biosystems Engineering*, 178, 244–255.
- Zhang, H., Zhang, S., Chen, Y., Luo, W., Huang, Y., Tao, D., Zhan, B., & Liu, X. (2020). Non-destructive determination of fat and moisture contents in Salmon (*Salmo salar*) fillets using near-infrared hyperspectral imaging coupled with spectral and textural features. In *Journal of Food Composition and Analysis* (Vol. 92, p. 103567). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103567>.
- Zhang, W., Cao, A., Shi, P., & Cai, L. (2021). Rapid evaluation of freshness of largemouth bass under different thawing methods using hyperspectral imaging. In *Food Control* (Vol. 125, p. 108023). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108023>.
- Zhang, Y., Luo, Q., Ding, K., Liu, S. G., & Shi, X. (2021). A smartphone-integrated colorimetric sensor of total volatile basic nitrogen (TVB-N) based on Au@MnO₂ core-shell nanocomposites incorporated into hydrogel and its application in fish spoilage monitoring. *Sensors and Actuators. B, Chemical*, 335(129708), 129708.