

ANÁLISIS DE ESTRÉS Y SINTOMATOLOGÍA EN PECES MEDIANTE SISTEMAS DE VISIÓN ARTIFICIAL: UNA REVISIÓN DEL ESTADO DE ARTE

*A STRESS ANALYSIS AND SYMPTOMATOLOGY
IN FISH THROUGH ARTIFICIAL VISION SYSTEMS:
A STATE-OF-THE-ART REVIEW*

Osbaldo Aragón Banderas

Tecnológico Nacional de México / ITS de la Región de los Llanos, México
osbaldo.ab@regionllanos.tecnm.mx

Leonardo Trujillo Reyes

Tecnológico Nacional de México / IT de Tijuana, México
leonardo.trujillo.ttl@gmail.com

Yolocuahtli Salazar Muñoz

Tecnológico Nacional de México / IT de Durango, México
ysalazar@itdurango.edu.mx

Jesús Leonel Arce Valdez

Tecnológico Nacional de México / ITS de la Región de los Llanos, México
jesus.av@regionllanos.tecnm.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 24/abril/2024

Resumen

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte exhaustiva enfocada a la aplicación de sistemas de visión artificial para el análisis de estrés y sintomatología en peces bajo condiciones de crianza. El estrés en los peces es una adaptación evolutiva que les permite hacer frente a cambios en su entorno. Puede ser causado por diversos factores que pueden afectar su desarrollo en condiciones de crianza.

La presente revisión analiza los distintos métodos encontrados en la bibliografía para evaluar el estrés en peces utilizando métodos no invasivos con técnicas de visión artificial. Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en bases de datos como PubMed, IEEE Xplore y Scopus, identificando estudios entre 2012 y 2022

relacionados con el uso de sistemas de visión artificial en la evaluación de estrés y sintomatología en peces.

Se utilizaron palabras clave relevantes, como "visión artificial", "análisis de comportamiento", "estrés en peces" y "bienestar animal", para seleccionar aquellos estudios que presentaran métodos y resultados sobre el uso de esta tecnología en entornos de crianza reales.

Aunque se necesita más estandarización en las metodologías y datos más diversos para validar y generalizar los resultados, los estudios demuestran que la visión artificial es efectiva para analizar el estrés en peces, lo que puede beneficiar la conservación de poblaciones acuáticas,

Palabras Clave: Acuicultura, Estrés en peces, Visión artificial.

Abstract

This article provides a comprehensive state-of-the-art review focused on the application of artificial vision systems for the analysis of stress and symptoms in fish under breeding conditions. Stress in fish is an evolutionary adaptation that enables them to cope with changes in their environment. It can be caused by various factors that can affect their development under breeding conditions.

This review examines the various methods found in the literature for assessing stress in fish using non-invasive techniques with artificial vision. A thorough search was conducted in databases such as PubMed, IEEE Xplore, and Scopus, identifying studies from 2012 to 2022 related to the use of artificial vision systems in the assessment of stress and symptoms in fish. Relevant keywords such as "artificial vision," "behavior analysis," "fish stress," and "animal welfare" were used to select studies that presented methods and results on the use of this technology in real breeding environments.

The studies demonstrate that artificial vision is effective in analyzing stress in fish, which can benefit the conservation of aquatic populations, although more standardization in methodologies and a broader range of data are needed to validate and generalize the results.

Keywords: Artificial vision, Aquaculture, Fish stress.

1. Introducción

La demanda mundial de alimentos y productos acuáticos ha aumentado en los últimos años. La industria pesquera enfrenta una crisis debido a la baja en la fauna marina ocasionada por los cambios climáticos y la sobreexplotación. Se estima que para el año 2050 será necesario producir 70% más alimentos de los que hoy se producen para satisfacer la demanda mundial [Keating, 2014].

Entre los años 2004 y 2014, la producción de acuicultura en el mundo experimentó un asombroso crecimiento del 62.2% alcanzando 73.8 millones de toneladas. La contribución de la acuicultura a la producción pesquera y acuícola total ha aumentado de manera constante, alcanzando el 49.2% en 2020 [FAO, 2022].

La acuicultura engloba técnicas, actividades y saberes de crianza de especies acuáticas, vegetales y animales. Se emplea en condiciones de cultivo en el medio o en condiciones totalmente controladas. Se divide en 3 sistemas tecnológicos principales: Sistema extensivo, sistema semi-intensivo y sistema intensivo [Edwards, 2000], [Pillay, 2008], [Hai, 2018].

En los sistemas de acuicultura, el estrés en peces es una respuesta generalizada atribuida al hecho de que los peces comúnmente tienen un cúmulo de reacciones adaptativas para hacer frente a los factores estresantes. Por ejemplo, se ha informado que el estrés eleva los niveles de cortisol plasmático, así como los niveles de glucosa y la frecuencia ventilatoria en los peces. Aunque el estrés puede considerarse una respuesta general, puede ser modulado por condiciones específicas del estresor. Estos factores modificadores pueden ser tanto no estresores como inherentes a las características del estresor [Wendelaar, 1997], [Conte, 2004]. El estrés en los peces provoca una disminución en la ingesta y afecta a las hormonas que están relacionadas con parámetros de crecimiento [Arturo-Rodríguez, 2012].

El desarrollo de la tecnología inteligente ha impulsado avances significativos en la acuicultura, llevándola a adoptar un enfoque más intensivo y eficiente en todo el mundo. Esta transformación ha mejorado considerablemente la eficiencia de producción y ha contribuido a la creación de un sistema más sostenible en la industria acuícola. Sin embargo, junto con estos avances, la acuicultura también

enfrenta desafíos relacionados con la cantidad de mano de obra requerida y diversos problemas como la alimentación de los peces, las enfermedades y la contaminación del agua [Lafferty, 2015], [Zhao, 2021]. Para hacer frente a estas dificultades, la implementación de acuicultura inteligente emerge como una solución prometedora. Este enfoque busca abordar los problemas mencionados y mejorar la productividad en la industria pesquera, lo que puede ser especialmente relevante en sistemas de recirculación acuapónicos (RAS). No obstante, el monitoreo de estos sistemas con tecnologías de visión artificial se enfrenta a desafíos, ya que pueden contener partículas de sólidos finos, lo que genera una alta turbidez y dificulta la evaluación mediante observación directa [Zion, 2012], [Goddek, 2019].

Las aplicaciones de sistemas de visión artificial de acuicultura en la bibliografía consultada muestran una orientación hacia el monitoreo de peces en condiciones de laboratorio con baja o nula turbidez y en sistemas de recambio de agua constante utilizando métodos de visión artificial con aprendizaje de máquina y en otros casos hardware especializado como LiDAR, visión estereoscópica y ondas acústicas de alta frecuencia [Saberioon, 2017].

La revisión tiene como objetivo encontrar un software o algoritmo específico que sea capaz de evaluar visualmente el estrés en peces bajo condiciones reales de crianza. Para lograr esto, se tomarán en cuenta parámetros específicos basados en la bibliografía consultada. El software o algoritmo que se busca deberá ser capaz de analizar y procesar datos relacionados con el comportamiento, fisiología u otros indicadores relevantes que permitan identificar y medir el nivel de estrés en los peces de forma precisa y confiable en un entorno de cría real. Esta herramienta potencial podría ser de gran utilidad para los acuicultores y científicos involucrados en la industria pesquera, ya que permitiría una evaluación más objetiva y eficiente del bienestar de los peces, lo que a su vez podría contribuir a mejorar las prácticas de crianza y garantizar un ambiente más saludable para estas especies acuáticas.

2. Métodos

Con la información analizada, se recopiló todo lo necesario para organizarla de manera concisa en varias tablas. Las tablas 1 y 2 adoptan un formato de doble

entrada, ubicando cada artículo dependiendo de la información cruzada entre el síntoma visible contra la relación del tipo de estrés conocido en peces. Por otro lado, las tablas 3 a 6 presentan las diversas técnicas de monitoreo utilizadas para evaluar los síntomas visibles específicos del estrés en peces.

Tabla 1 Bibliografía localizada sobre síntomas visibles en peces ocasionados por distintos tipos de estrés.

		SINTOMAS VISIBLES DEL ESTRÉS EN PECES								
		PROBLEMAS DE APETITO		CAMBIOS DE RUTINA		RESPIRACIÓN		ACTIVIDAD DE NATACIÓN		ASPECTO
		Ingesta de alimentos	Poca movilidad	Cambios significativos de movilidad	Cambio de hábitos	Tasa de respiración	Aumento de ritmo	Cambio de ritmo	Frecuencia de nado	Cambio de colores y deformidad
TIPOS DE ESTRÉS EN PECES	SOCIAL	Sobrepoblación		[Conte, 2004]						[Conte, 2004]
		Características congénitas (agresividad territorial)	[Gonçalves-de-Freitas, 2019]					[Barreto, 2006]		
	FÍSICO	Oxígeno disuelto	[Conte, 2004]		[Xu, 2006]		[Heath, 1972]	[Heath, 1972]	[Xu, 2006]	[Xu, 2006]
		Temperatura			[Beitinger, 1990]				[Alfonso, 2021]	
		Niveles de amonio								
	NUTRICIONAL	Deficiencias en el alimento		[Zhou, 2018]	[Conte, 2004], [Portz, 2006]				[Zhou, 2018]	[Zhou, 2018]
		Deficiencias en rutina alimenticia			[Abdel-Fattah, 2021]					[Abdel Fattah, 2021]
	TRAUMÁTICO	Canibalismo			[Duk, 2017]					[Duk, 2017]
		Lesiones por el medio								
		Manejo	[Portz, 2006]		[Portz, 2006]	[Guerra-Santos, 2017]	[Barreto, 2004]			[Gonçalves-de-Freitas, 2019]
	QUÍMICO	Contaminantes								
		Cambios bioquímicos			[Davidson, 2011], [Li, 2012]		[Zheng, 2014]	[Zheng, 2014]	[Davidson, 2011], [Li, 2012]	[Davidson, 2011]
Ph						[Van Der Putte, 1982]	[Van Der Putte, 1982]			

Fuente: elaboración propia

Estrés en peces

Las características del medio acuático de crianza para peces obligan a los criadores a desarrollar prácticas dedicadas a minimizar el estrés animal debido a la necesidad de mantener vivos y saludables a los peces; el manejo del estrés es una de las claves para garantizar el bienestar animal [Conte, 2004].

Las respuestas al estrés cumplen una función muy importante para preservar al individuo. Las medidas de bienestar en la acuicultura están, por lo tanto, asociadas en gran medida con los efectos terciarios de la respuesta al estrés que

generalmente son indicativos de estrés prolongado, repetido o inevitable [Beitinger, 1990], [Goddek, 2019].

Tabla 2 Revisión de artículos que mencionan el análisis de síntomas visibles a partir de técnicas de visión artificial.

SÍNTOMAS VISIBLES DEL ESTRÉS EN PECES	Técnica		Problema de visión	Objetivo	Tipo de captura	No de peces	Conf. de cámaras	Tipo de cámaras	Medio	Especie	Resultados	Ref.
	Auto.	Man.										
RESPIRACIÓN	Tasa de respiración	SVM, Adaboost y MM		Detección de ritmo de respiración a través del movimiento branquial	Video	2	2D – Bajo el contenedor	TIS, DxK 23G818, CCD sensor	Contenedor transparente	Medaka	99% de precisión	[Zheng, 2014]
	Aumento de ritmo											
ACTIVIDAD DE NATACIÓN	Cambio de ritmo		Análisis estadístico	Cronometraje de peces individuales que pasan entre Lugares marcados distanciados a 3 pies. Evaluar la salud y el bienestar de la trucha arcoiris dentro de sistemas acuícolas de recirculación de agua replicados	Video	1k	2D – Sobre estanque	--	RAS	Trucha arcoiris	Se lograron determinar las diferencias en la velocidad de nado	[Davidson, 2011]
		Binarización de imágenes y extracción de coordenadas de posición	Análisis de posición de píxeles de imágenes binarias	Cuantificación del comportamiento	Video	4	2D – Sobre pecera	CCD SONY, EVI1011	Pecera	Pez cebra	Rango de reconocimiento de 85-99.9%	[Kato, 2004]
	Frecuencia de nado											
ASPECTO	Colores											
	Deformidad		Student's t test	Observación y conteo manual de los peces con deformidad. Evaluar la salud y el bienestar de la trucha arcoiris dentro de sistemas acuícolas de recirculación de agua replicados	Video	1k	2D	--	RAS	Trucha Arcoiris	Se observó la incidencia de deformidades esqueléticas	[Davidson, 2011]
PROBLEMAS DE APETITO	Ingesta de alimentos	CNN		Método automático para clasificar la intensidad de alimentación de los peces. Clasificación de imágenes	Imagen	30	2D - Sobre estanque	Mako NIR G-223B	Estanque	Tilapia	Precisión del 90%	[Zhou, 2019]
		CNN, LSTM		Gestión y optimización de operaciones de alimentación en acuicultura. Red profunda de clasificación de video	Video	--	2D - Bajo el agua	Cámara de video 224 x 224 pixels a color RGB 24 f/s	Jaula	Salmón	Precisión del 80%	[Máley, 2019]
	Poca movilidad											
CAMBIOS DE RUTINA	Cambios significativos en movilidad	ANN, SOM		Clasificar patrones de comportamiento y organizarlos en diferentes grupos. Detectar contaminación microbiológica en el agua	Video	1	2D – Sobre pecera	Flow Electronics 540L IR CAC000 08	Pecera	Pez cebra	Detección del 89% al 100%	[Amorim, 2018]
			Identificar grupos en píxeles adyacentes en el video, medición de distancias entre fotogramas	Identificar y rastrear las coordenadas X-Y de los peces individuales. Medir los efectos de las sustancias tóxicas en el comportamiento de grupos de peces sin marcar	Video	20	2D – Sobre estanque	HP Elite Webcam	Estanque	Arabian killifish	Rastreo de peces con 100% de precisión	[Barry, 2012]
			Supervisión basada en imágenes mediante seguimiento de video	Seguimiento de objetos en 3D. Seguimiento automatizado de múltiples peces en tres dimensiones	Video	4	3D - Sistema de visión estéreo	Kinect I (cámara RGB y cámara NIR)	Pecera	Tilapia	98% de efectividad en rastreo	[Sabericoon, 2016]
	Cambio en hábitos	Técnicas de segmentación		Seguimiento de objetos. Analizar el movimiento de los peces en la acuicultura marina	Imagen	27k	2D – En el fondo de la jaula		Jaula	Salmón	99.3%	[Pinkiewicz, 2011]

* CNN - Convolutional Neural Network, ANN - Artificial Neural Network, SOM - Self-Organizing Map, SVM - Support Vector Machine, Adaboost - adaptive boosting, MM - Mathematical Morphology, LSTM - long short-term memory.

Fuente: elaboración propia

El estrés en peces puede ser ocasionado por una gran diversidad de factores, de manera general podemos clasificarlos en estrés social, físico, nutricional, traumático y químico.

Estrés social

En los sistemas de producción intensivos el tamaño de la población (sobrepoblación) es causante de competencia, tanto de espacio como de alimento derivando en estrés que afecta el comportamiento de los peces a partir de dichas interacciones sociales. El estrés social afecta el comportamiento y la fisiología de los peces, se manifiesta en la supresión de apetito, agresividad, la capacidad de nadar y cambios en el color de la piel [Conte, 2004], [Arturo-Rodríguez, 2012].

El comportamiento social de los peces incluye el comportamiento reproductivo, como el apareamiento y el cortejo, las interacciones cooperativas, la formación de bancos y la jerarquía social, que está marcada por interacciones agresivas para alcanzar un cierto rango social y defender su territorio, así como los recursos ambientales [Damsgård, 2012], [Gonçalves-de-Freitas, 2019].

Algunas especies presentan distintos niveles de agresividad y comportamiento característico de la especie (características congénitas) en cuestión. Existe una gran variación entre las especies en cuanto a la rapidez y la ferocidad con que luchan los peces, lo que tiene implicaciones para la acuicultura [Damsgård, 2012].

Estrés físico

El estrés físico en peces es ocasionado por variaciones del medio de crianza fuera de los parámetros óptimos de diversos factores como oxígeno disuelto, temperatura, niveles de amonio entre otros. El oxígeno disuelto es el parámetro más importante en los sistemas acuapónicos intensivos y semi-intensivos, ya que los niveles bajos provocan estrés en los peces, fallas en el filtro nitrificante y pérdidas de peces. Dado que el oxígeno puede transferirse al agua en concentraciones superiores a su concentración de saturación en condiciones atmosféricas (esto se denomina sobresaturación), existe una variedad de dispositivos y diseños para garantizar que los peces reciban suficiente oxígeno [Goddek, 2019], [Wei, 2019], [Bracino 2020].

La fisiología del estrés de los peces se ve afectada por la temperatura. En primer lugar, se espera que la síntesis, liberación y acciones de las hormonas del estrés se vean afectadas por la temperatura como resultado de los efectos termodinámicos generales sobre la cinética de las reacciones químicas. Además, un aumento severo de la temperatura puede ser un factor estresante en sí mismo [Beitinger, 1990].

En un medio acuoso, el amoníaco existe en dos formas: una forma no ionizada (NH_3) que es tóxica para los peces y una forma ionizada (NH_4^+) que tiene baja toxicidad para los peces. Estos dos forman el nitrógeno amoniacal total (NAT o TAN, por sus siglas en inglés), en el que la relación entre las dos formas está controlada por el pH, la temperatura y la salinidad. El NAT se acumula en el agua de cría como producto del metabolismo proteico de los peces y puede alcanzar concentraciones tóxicas si no se trata [Beitinger, 1990], [Barry 2012], [Saberioon 2016].

Estrés nutricional

En acuicultura, la eficiencia de alimentación de los peces es de gran importancia para mejorar la producción y reducir los costos. En los últimos años, los ajustes automáticos de la cantidad de alimentación en función de las necesidades de los peces se han convertido en una tendencia en desarrollo [Saberioon, 2016]. En la acuicultura un aspecto importante para el manejo del estrés es la mejora de la calidad de los alimentos [Mateus, 2017]. Se han hecho varios intentos para intentar medir el apetito de los peces midiendo el cambio de comportamiento durante la alimentación. Establecer una frecuencia de alimentación óptima en las granjas reduce costos de sobrealimentación y mantenimiento de la calidad en el agua y evitar así fallas en la rutina alimenticia, además de reconocer deficiencias en el alimento [Abdel-Fattah, 2021].

Estrés traumático

En la acuicultura son muy comunes las lesiones traumáticas en organismos acuáticos debidas al canibalismo, al entorno con características inapropiadas para la crianza y al manejo de los peces. Las lesiones son visualmente identificables y muchas son causantes de la entrada de infecciones que derivan en la pérdida en la

economía acuícola [Beitinger, 1990]. El canibalismo es un fenómeno común en peces, es una estrategia predatoria que involucra matar y alimentarse de individuos de la misma especie. Este tipo de comportamiento refleja condiciones de crianza mal adaptadas y necesidades de comportamiento no satisfechas en especies recién adaptadas a la crianza, además de reflejar un posible establecimiento de jerarquía en el grupo [Duk, 2017].

Estrés químico

Los contaminantes biosólidos en los RAS se originan a partir de alimentos no consumidos, heces y biopelículas, son uno de los parámetros de calidad del agua más críticos y difíciles de controlar. Como los biosólidos sirven como sustrato para el crecimiento de bacterias heterótrofas, un aumento en su concentración puede eventualmente resultar en un mayor consumo de oxígeno, un rendimiento deficiente del biofiltro, mayor turbidez del agua e incluso el bloqueo mecánico de partes del sistema [Goddek, 2019], [Wei, 2019], [Bracino, 2020].

El consumo de alimentos de los peces representa casi el 2% de la biomasa total lo que genera una alta cantidad de desechos que modifican la turbidez en el agua, constituidos en su gran mayoría por partículas de sólidos en suspensión $< 100 \mu m$ [Wold, 2014].

Varios estudios indican que ciertos componentes medidos de la calidad del agua dentro de sistemas de cultivo de peces pueden causar deformidades esqueléticas [Davidson, 2011].

Síntomas visibles del estrés en peces

Además de los cambios fisicoquímicos como respuesta al estrés en peces, se pueden observar distintos síntomas visibles que incluyen cambios en patrones de comportamiento y aspecto físico. Tras la consulta de más de 30 artículos científicos sobre el estrés en peces identificables a través de la observación, se agrupó la información en la tabla 1, y se clasificó de la siguiente manera:

- **Problemas de alimentación:** un cambio significativo en la ingesta de alimentos, que también puede manifestarse con una reducción en la movilidad.

- **Cambios en la rutina:** cambios en la movilidad o rutina del pez, no necesariamente relacionados con la velocidad de nado, sino con patrones de movimiento, que también pueden manifestarse como cambios en los hábitos nocturnos o diurnos.
- **Respiración:** variaciones en la respiración del pez, que pueden incluir un aumento en el ritmo o una irregularidad en la tasa de respiración, fuera de los parámetros normales.
- **Actividad de natación:** cambios en la velocidad, ritmo o frecuencia de nado, independientemente de los patrones de movimiento.
- **Aspecto físico:** los peces pueden presentar deformaciones o alteraciones en los colores de su piel como síntomas de estrés.

Técnicas de visión artificial para análisis de comportamiento de peces

La evaluación del estrés en peces puede realizarse mediante técnicas de visión artificial que permiten analizar su comportamiento. Los peces estresados presentan comportamientos distintos a los no estresados, como nadar de forma errática, cambios en la ingesta de alimentos o alteraciones en los patrones respiratorios [Li, 2022]. La visión artificial es capaz de detectar estos cambios en el comportamiento y utilizarlos para medir el nivel de estrés de los peces de manera no invasiva y precisa. Los resultados de la revisión de 10 artículos científicos que utilizan técnicas de visión artificial para analizar el comportamiento de los peces, con énfasis en los síntomas visibles se presentan en la tabla 2. Para lo cual se tomaron en cuenta diferentes factores que pudieran llegar a ser de utilidad para aplicarlos en condiciones de crianza reales:

- **Síntoma visible.** Se refiere a los signos externos o comportamientos observables que indican el nivel de estrés en los peces, como cambios en la coloración, movimientos erráticos, aumento del ritmo respiratorio, etc.
- **Técnica de análisis.** Describe la metodología o técnica específica de visión artificial utilizada para analizar y medir los síntomas visibles relacionados con el estrés en los peces, como el procesamiento de imágenes, algoritmos de detección, etc.

- **Problema de visión.** Hace referencia a los desafíos o dificultades específicas relacionadas con la visión artificial al analizar el estrés en peces, como la detección en condiciones de baja visibilidad, la identificación de patrones sutiles, etc.
- **Objetivo de la investigación.** Indica el propósito principal del estudio, es decir, qué se pretende lograr con la aplicación de sistemas de visión artificial para el análisis de estrés en peces, como mejorar el bienestar animal, comprender los factores estresantes, etc.
- **Tipo de captura.** Describe la forma en que se presentan las imágenes o datos para el análisis, ya sea mediante imágenes fijas mediante video o secuencia de imágenes.
- **Numero de peces.** Especifica la cantidad de peces utilizados en el estudio para el análisis del estrés, lo cual es relevante para la validez estadística y representatividad de los resultados.
- **Configuración de las cámaras.** Detalla la disposición y características de las cámaras utilizadas para la captura de imágenes de los peces, como la posición, ángulo, resolución, frecuencia de toma de imágenes, etc.
- **Tipo de cámaras.** Indica el tipo de cámaras empleadas en el estudio, como cámaras de alta resolución, cámaras infrarrojas, cámaras subacuáticas, etc.
- **Medio de experimentación.** Describe el entorno o medio en el cual se llevaron a cabo los experimentos o estudios, como acuarios, estanques, ríos, mares, etc.
- **Especie.** Especifica la especie de peces que fue objeto de estudio para el análisis del estrés, ya que los resultados pueden variar según las características de cada especie.
- **Referencia.** Proporciona la cita bibliográfica de donde se obtuvo la información presentada.
- **Iluminación.** Detalla las condiciones de iluminación utilizadas durante la captura de imágenes o experimentos, dado que la iluminación puede afectar la precisión del análisis.

- **Resultados obtenidos.** Presenta los hallazgos y resultados del análisis mediante sistemas de visión artificial, mostrando el porcentaje o índice de acierto en la problemática planteada.

3. Resultados

Tras realizar una exhaustiva revisión bibliográfica, se analizaron un total de 10 artículos que mencionan el análisis de estudios relacionados con el uso de sistemas de visión artificial para el análisis de estrés en peces, previamente se descartaron más de 25 artículos sobre el análisis de estrés en peces que no utilizan específicamente la visión como método de análisis. Estos estudios fueron recopilados y organizados en la tablas 1 y 2, donde se resumen los diferentes aspectos investigados:

- La tabla 1 cruza la información sobre el síntoma visible y el tipo de estrés analizado en distintos peces, localizando el artículo en cuestión en un formato de doble entrada.
- En la tabla 2 clasifican los artículos en base al síntoma estudiado y se enfatiza en la técnica y tecnología empleada orientada a sistemas de visión.

Los resultados de la revisión indican que los síntomas visibles más comúnmente analizados para evaluar el estrés en peces incluyen cambios significativos en movilidad, cambios de hábitos y modificaciones en ingesta alimenticia. En cuanto a las técnicas de análisis empleadas, la mayoría de los estudios se basaron en técnicas de visión artificial, demostrando una creciente tendencia hacia el uso de algoritmos de aprendizaje profundo para una mayor precisión en la detección y medición de los síntomas.

En relación con los objetivos de la investigación, se observó una tendencia hacia los experimentos controlados en laboratorio. Los resultados obtenidos en los diferentes estudios proporcionan evidencia sólida de la eficacia de los sistemas de visión artificial para el análisis del estrés en peces. En general, estos hallazgos resaltan el potencial prometedor de los sistemas de visión artificial como herramienta no invasiva y efectiva para la monitorización y comprensión del estrés

en peces. Sin embargo, se requiere una mayor estandarización en las metodologías de análisis y la utilización de bases de datos más grandes y diversificadas para fortalecer la validez de los resultados y fomentar futuras investigaciones.

4. Discusión

Es importante resaltar que la mayoría de los estudios se centraron en experimentos controlados en laboratorio, lo que permite una mayor manipulación de variables y un mejor control de los factores que pueden influir en los niveles de estrés. Sin embargo, también es importante considerar la aplicación de sistemas de visión artificial en entornos naturales y en estudios de campo para una comprensión más completa y ecológicamente relevante del estrés en peces.

Los resultados obtenidos en los diferentes estudios brindan evidencia sólida de la eficacia de los sistemas de visión artificial en el análisis del estrés en peces, lo que respalda la utilidad potencial de esta tecnología en la gestión y conservación de poblaciones acuáticas. Sin embargo, también es reconocible la necesidad de una mayor estandarización en las metodologías de análisis y la utilización de bases de datos más amplias y diversas para fortalecer la validez y la generalización de los resultados.

5. Conclusiones

En conclusión, los hallazgos destacan el prometedor papel de los sistemas de visión artificial como una herramienta no invasiva y efectiva para la monitorización y comprensión del estrés en peces. A medida que avanza la investigación en esta área, es imperativo seguir mejorando y refinando las técnicas de análisis, así como considerar aspectos prácticos y éticos para maximizar el impacto de esta tecnología en el bienestar de los peces y el manejo sostenible de ecosistemas acuáticos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Abdel-Fattah, A. F., F. A. Ahmed, E. N. Said and M. R. Farag, (2021). Impact of feeding system on the behaviour and performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 538: 736514.

- [2] Alfonso, S., M. Gesto and B. Sadoul, (2021). Temperature increase and its effects on fish stress physiology in the context of global warming. *Journal of Fish Biology* 98(6): 1496-1508.
- [3] Amorim, J., M. Fernandes, I. Abreu, F. Tavares and L. Oliva-Teles, (2018). *Escherichia coli*'s water load affects zebrafish (*Danio rerio*) behavior. *Science of The Total Environment* 636: 767-774.
- [4] Arturo-Rodríguez, C. H. J. I. P., (2012). Stress in farmed fish.
- [5] Barreto, R. E. and G. L. Volpato, (2004). Caution for using ventilatory frequency as an indicator of stress in fish. *Behavioural Processes* 66(1): 43-51.
- [6] Barreto, R. E. and G. L. Volpato, (2006). Stress responses of the fish Nile tilapia subjected to electroshock and social stressors. *Braz J Med Biol Res* 39(12): 1605-1612.
- [7] Barry, M. J., (2012). Application of a novel open-source program for measuring the effects of toxicants on the swimming behavior of large groups of unmarked fish. *Chemosphere* 86(9): 938-944.
- [8] Beitinger, T. L., (1990). Behavioral Reactions for the Assessment of Stress in Fishes. *Journal of Great Lakes Research* 16(4): 495-528.
- [9] Bracino, A. A., R. S. Concepcion, E. P. Dadios and R. R. P. Vicerra, (2020). Biofiltration for Recirculating Aquaponic Systems: A Review. 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM).
- [10] Conte, F. S., (2004). Stress and the welfare of cultured fish. *Applied Animal Behaviour Science* 86(3): 205-223.
- [11] Duk, K., J. Pajdak, E. Terech-Majewska and J. Szarek, (2017). Intra-cohort cannibalism and methods for its mitigation in cultured freshwater fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27(1): 193-208.
- [12] Damsgård, B. and F. Huntingford, (2012). Fighting and Aggression. *Aquaculture and Behavior*: 248-285.
- [13] Davidson, J., C. Good, C. Welsh and S. T. Summerfelt, (2011). Abnormal swimming behavior and increased deformities in rainbow trout *Oncorhynchus*

- mykiss cultured in low exchange water recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 45(3): 109-117.
- [14] Edwards, P., C. K. Lin and A. Yakupitiyage, (2000). Semi-intensive pond aquaculture. *Tilapias: Biology and Exploitation*. M. C. M. Beveridge and B. J. McAndrew. Dordrecht, Springer Netherlands: 377-403.
- [15] FAO, (2022). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA) 2022*: 288.
- [16] Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen and G. M. Burnell, (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Cham, Springer International Publishing.
- [17] Gonçalves-de-Freitas, E., M. Bolognesi, A. Gauy, M. Brandão, P. Giaquinto and M. Fernandes-Castilho, (2019). Social Behavior and Welfare in Nile Tilapia. *Fishes* 4(2).
- [18] Guerra-Santos, B., J. F. López-Olmeda, B. O. de Mattos, A. B. Baião, D. S. P. Pereira, F. J. Sánchez-Vázquez, R. B. Cerqueira, R. C. B. Albinati and R. Fortes-Silva, (2017). Synchronization to light and mealtime of daily rhythms of locomotor activity, plasma glucose and digestive enzymes in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 204: 40-47.
- [19] Hai, F. I., C. Visvanathan and R. Boopathy (2018). *Sustainable Aquaculture*, Springer.
- [20] Heath, A. G., (1972). A critical comparison of methods for measuring fish respiratory movements. *Water Research* 6(1): 1-7.
- [21] Kato, S., T. Nakagawa, M. Ohkawa, K. Muramoto, O. Oyama, A. Watanabe, H. Nakashima, T. Nemoto and K. Sugitani, (2004). A computer image processing system for quantification of zebrafish behavior. *Journal of Neuroscience Methods* 134(1): 1-7.
- [22] Keating, B. A., M. Herrero, P. S. Carberry, J. Gardner and M. B. Cole, (2014). Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security* 3(3-4): 125-132.

- [23] Lafferty, K. D., C. D. Harvell, J. M. Conrad, C. S. Friedman, M. L. Kent, A. M. Kuris, E. N. Powell, D. Rondeau and S. M. Saksida, (2015). Infectious Diseases Affect Marine Fisheries and Aquaculture Economics. *Annual Review of Marine Science* 7(1): 471-496.
- [24] Li, D., G. Wang, L. Du, Y. Zheng and Z. Wang, (2022). Recent advances in intelligent recognition methods for fish stress behavior. *Aquacultural Engineering* 96: 102-222.
- [25] Li, Y. A. N., J.-M. Lee, T.-S. Chon, Y. Liu, H. Kim, M.-J. Bae and Y.-S. Park, (2012). Analysis of movement behavior of zebrafish (*danio rerio*) under chemical stress using hidden Markov model. *Modern Physics Letters B* 27(02): 1350014.
- [26] Måløy, H., A. Aamodt and E. Misimi, (2019). A spatio-temporal recurrent network for salmon feeding action recognition from underwater videos in aquaculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 167: 105087.
- [27] Mateus, A. P., D. M. Power and A. V. M. Canário, (2017). Chapter 8 - Stress and Disease in Fish. *Fish Diseases*. G. Jeney, Academic Press: 187-220.
- [28] Pillay, T. V. R. (2008). *Aquaculture and the Environment*, John Wiley & Sons.
- [29] Pinkiewicz, T. H., G. J. Purser and R. N. Williams, (2011). A computer vision system to analyse the swimming behaviour of farmed fish in commercial aquaculture facilities: A case study using cage-held Atlantic salmon. *Aquacultural Engineering* 45(1): 20-27.
- [30] Portz, D., C. Woodley and J. Cech, (2006). Stress-associated impacts of short-term holding on fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 16: 125-170.
- [31] Saberioon, M., A. Gholizadeh, P. Cisar, A. Pautsina and J. Urban, (2017). Application of machine vision systems in aquaculture with emphasis on fish: state-of-the-art and key issues. *Reviews in Aquaculture* 9(4): 369-387.
- [32] Saberioon, M. M. and P. Cisar, (2016). Automated multiple fish tracking in three-Dimension using a Structured Light Sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 121: 215-221.
- [33] Van Der Putte, I., M. B. H. M. Laurier and G. J. M. Van Eijk, (1982). Respiration and osmoregulation in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) exposed to hexavalent chromium at different pH values. *Aquatic Toxicology* 2(2): 99-112.

- [34] Wei, Y., W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao and Q. Wei, (2019). Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review. *IEEE Access* 7: 169306-169326.
- [35] Wendelaar Bonga, S. E., (1997). The stress response in fish. *Physiological Reviews* 77(3): 591-625.
- [36] Wold, P.-A., A. B. Holan, G. Øie, K. Attramadal, I. Bakke, O. Vadstein and T. O. Leiknes, (2014). Effects of membrane filtration on bacterial number and microbial diversity in marine recirculating aquaculture system (RAS) for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) production. *Aquaculture* 422-423: 69-77.
- [37] Xu, J., Y. Liu, S. Cui and X. Miao, (2006). Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision. *Aquacultural Engineering* 35(3): 207-217.
- [38] Zhao, S., S. Zhang, J. Liu, H. Wang, J. Zhu, D. Li and R. Zhao, (2021). Application of machine learning in intelligent fish aquaculture: A review. *Aquaculture* 540: 736724.
- [39] Zheng, H., R. Liu, R. Zhang and Y. Hu, (2014). A method for real-time measurement of respiratory rhythms in medaka (*Oryzias latipes*) using computer vision for water quality monitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 100: 76-86.
- [40] Zhou, C., K. Lin, D. Xu, L. Chen, Q. Guo, C. Sun and X. Yang, (2018). Near infrared computer vision and neuro-fuzzy model-based feeding decision system for fish in aquaculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 146: 114-124.
- [41] Zion, B., (2012). The use of computer vision technologies in aquaculture – A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 88: 125-132.
- [42] Zhou, C., D. Xu, L. Chen, S. Zhang, C. Sun, X. Yang and Y. Wang, (2019). Evaluation of fish feeding intensity in aquaculture using a convolutional neural network and machine vision. *Aquaculture* 507: 457-465.