



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y
BIOTECNOLOGÍA



CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Aplicación de métodos de análisis no convencionales y no invasivos: Uso de lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones en productos de la industria alimentaria

Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autora: Evelyn Abigail Montesdeoca Cabrera

Tutor: Ing. Esteban Mauricio Fuentes Pérez PhD.

Ambato – Ecuador

Septiembre - 2023

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Esteban Mauricio Fuentes Pérez PhD.

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este trabajo de Titulación bajo la modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 29 de junio del 2023.

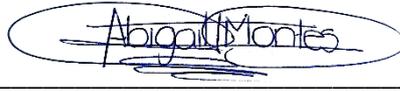
Ing. Esteban Mauricio Fuentes Pérez PhD.

C.I. 1803321502

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Evelyn Abigail Montesdeoca Cabrera, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales, a excepción de las citas bibliográfica

A handwritten signature in blue ink that reads "Abigail Montes". The signature is enclosed within a hand-drawn oval shape. Below the signature, there are several horizontal lines, some of which are underlined, suggesting a signature strip or a stamp area.

Evelyn Abigail Montesdeoca Cabrera

C.I. 1501126427

AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo de Titulación o parte de él, como documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

A handwritten signature in blue ink that reads "Abigail Montes". The signature is enclosed within a hand-drawn oval shape. Below the signature, there are several horizontal lines, some of which are crossed out with a single stroke.

Evelyn Abigail Montesdeoca Cabrera

C.I. 1501126427

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad proyecto de investigación, mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Presidente del Tribunal

Ing. Diego Manolo Salazar Garcés PhD.

C.I. 1803124294

Ing. Rubén Darío Vilcacundo Chamorro PhD.

C.I. 1802738102

Ambato, 23 de agosto del 2023.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía, por brindarme sabiduría y fortaleza para alcanzar mis objetivos.

A mi madre Eva Cabrera por darme la oportunidad de estudiar, ser mi apoyo y motivación para salir adelante en este camino llamado vida.

Abigail.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme salud y vida.

A mis padres y hermanos por ser mi apoyo incondicional en cada etapa.

*A la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos
y Biotecnología por brindarme la oportunidad de ser un profesional.*

A los docentes por compartir sus conocimientos durante mi formación.

*A mi tutor por darme la oportunidad de hacer mi trabajo de graduación para
culminar esta etapa académica.*

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN EJECUTIVO	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Antecedentes investigativos	2
1.2.1 Lenguas electrónicas y el sentido del gusto	4
1.2.2 Principales aplicaciones de las lenguas electrónicas en el análisis de alimentos	7
1.2.3 Tipos de lenguas electrónicas.....	7
1.2.4 Tipos de voltimetría aplicadas en las lenguas electrónicas voltamétricas	9
1.2.5 Partes de la lengua electrónica voltamétrica	10
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo general	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
CAPÍTULO II	14
METODOLOGÍA	14
2.1 Materiales y equipos.....	14

2.2	Métodos	14
2.2.1	Definición del problema.....	14
2.2.2	Identificación del campo de estudio.....	14
2.2.3	Proceso de revisión bibliográfica.....	15
2.2.4	Selección de las fuentes de información	15
2.2.5	Búsqueda de las fuentes de información	16
2.2.6	Depuración y organización de información	16
2.2.7	Análisis de la información	16
CAPÍTULO III.....		17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		17
3.1	Tecnologías no convencionales y no invasivas para el análisis de alimentos 17	
3.2	Lenguas electrónicas	17
3.3	Lenguas electrónicas voltamétricas.....	17
3.4	Sensores químicos	18
3.5	Tipos de sensores químicos	19
3.5.1	Sensores electroquímicos	19
3.5.2	Sensores ópticos	19
3.5.3	Sensores térmicos.....	19
3.5.4	Sensores másicos.....	19
3.6	Tipos de sensores electroquímicos	20
3.7	Electrodos	20
3.8	Sensores y electrodos comerciales	22
3.9	Aplicaciones de las lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones.....	24
3.10	Ventajas y desventajas del uso de lenguas electrónicas voltamétricas	42
CAPÍTULO IV.....		44

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1 Conclusiones	44
4.2 Recomendaciones	44
BIBLIOGRAFÍA	1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Sustancias químicas que muestran las cinco cualidades gustativas básicas.</i>	5
Tabla 2. <i>Tipos de electrodos de la lengua electrónica voltamétrica</i>	21
Tabla 3. <i>Tipos de electrodos de trabajo empleados en las lenguas voltamétricas</i>	21
Tabla 4. <i>Tipos de sensores comerciales</i>	23
Tabla 5. <i>Resultados del análisis cuantitativo por regresión PLS de muestras adulteradas de leche</i>	28
Tabla 6. <i>Aplicaciones de las lenguas electrónicas voltamétricas en el análisis de alteraciones en alimentos y bebidas</i>	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Número de documentos publicados anualmente sobre las lenguas electrónicas</i>	4
Figura 2. <i>Regiones especializadas de la lengua para recibir cada tipo de sabor</i>	5
Figura 3. <i>Esquema de sistema gustativo humano y artificial</i>	6
Figura 4. <i>Componentes de la lengua electrónica voltamétrica</i>	12
Figura 5. <i>Fases del proceso de revisión bibliográfica</i>	15
Figura 6. <i>Esquema del funcionamiento de un sensor químico</i>	18
Figura 7. <i>Lenguas electrónicas comerciales</i>	23
Figura 8. <i>Voltamogramas cíclicos de miel de tilia auténtica y adulterada con jarabe de arce</i>	25
Figura 9. <i>Análisis de componentes principales de muestras de leche adulterada con diferentes cantidades de almidón</i>	28
Figura 10. <i>Voltamogramas cíclicos de muestras de aceite</i>	32
Figura 11. <i>Voltamogramas con sensor de Pt para muestras de aceite de argán comestible y cosmético</i>	33

RESUMEN EJECUTIVO

Las grandes cadenas de producción de alimentos se ven en la necesidad de satisfacer las exigencias de los consumidores bajo términos de calidad e inocuidad, por esta razón, se requiere de la implementación de nuevas tecnologías en los procesos de productividad y control de calidad. Es por ello, que el desarrollo de tecnologías poco convencionales y no invasivas como las lenguas electrónicas voltamétricas son una alternativa atractiva, dado que son un sistema sensorial analítico que imita la percepción del gusto humano (sabor), capaz de interactuar con compuestos volátiles y analitos dispersos en solución, para discriminación de muestras de diferente tipo, origen, edad y calidad.

La investigación se sustentó bajo la metodología de revisión bibliográfica, donde se definió palabras claves para la búsqueda y la recolección de información, además se utilizó documentos de los últimos 5 años con excepciones según el grado de relevancia en el estudio de acuerdo a los objetivos planteados.

Los resultados determinaron que las lenguas voltamétricas permiten el análisis cualitativo o cuantitativo de los alimentos mediante herramientas multivariantes y técnicas electroquímicas como la voltametría cíclica o voltametría de pulsos, y principalmente se emplean en la discriminación de miel, leche, vino, café, aceite, carne, jugos de fruta y agua, ayudando a la detección de diferentes adulteraciones como la adición de jarabes y aceites o la presencia de antibióticos, insecticidas y ácidos (tartárico, tánico, acético), que influyen en la calidad de los alimentos. Siendo los sensores una alternativa atractiva y eficiente, porque se obtiene información rápida, precisa y fiable.

Palabras clave: lenguas electrónicas, sensores electroquímicos, agentes adulterantes, control de calidad.

ABSTRACT

The large food production chains are in need of satisfying the demands of consumers in terms of quality and safety, for this reason, the implementation of new technologies is required in the processes of productivity and quality control. For this reason, the development of unconventional and non-invasive technologies such as voltammetric electronic tongues are an attractive alternative, since they are an analytical sensory system that mimics the perception of human taste (flavor), capable of interacting with volatile compounds and analytes. dispersed in solution, for discrimination of samples of different type, origin, age and quality.

The research was based on the methodology of bibliographic review, where keywords were defined for the search and collection of information, in addition, documents from the last 5 years were used with exceptions according to the degree of relevance in the study according to the objectives set.

The results determined that voltammetric tongues allow the qualitative or quantitative analysis of food by means of multivariate tools and electrochemical techniques such as cyclic voltammetry or pulse voltammetry, and are mainly used in the discrimination of honey, milk, wine, coffee, oil, meat , fruit juices and water, helping to detect different adulterations such as the addition of syrups and oils or the presence of antibiotics, insecticides and acids (tartaric, tannic, acetic), which influence the quality of food. Sensors are an attractive and efficient alternative, because fast, accurate and reliable information is obtained.

Keywords: electronic tongues, electrochemical sensors, adulterating agents, quality control.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Justificación

En los últimos años las grandes cadenas de producción de alimentos se han visto en la necesidad satisfacer las exigencias de los consumidores bajo términos de calidad e inocuidad. Por esta razón, las tecnologías van innovando para adaptarse a las necesidades requeridas en el campo alimentario, a fin que permitan obtener información fiable, rápida y precisa dentro de los procesos de productividad, así como los procesos de control de calidad (**Moreno Barón, 2016**). La electrónica juega un papel importante en la automatización de la industria de alimentos, porque mejora la productividad y la calidad (**Handa & Singh, 2018**). Es por ello, que el desarrollo de sensores son una alternativa atractiva, eficiente y económica, puesto que, según **Tan & Xu (2020)** su implementación tiene un costo relativamente más bajo que los equipos analíticos estándares (cromatografía de gases, espectrometría de masas, cromatografía de alto rendimiento).

Las lenguas o lengüetas electrónicas voltamétricas son un sistema sensorial analítico que imitan la fisiología de percepción del gusto humano (**Marx et al., 2021; Nowshad & Khan, 2021**). Está compuesta de un conjunto de sensores no específicos capaces de interactuar con compuestos volátiles y analitos dispersos en solución (**Orlandi et al., 2019**). Los análisis con estas tecnologías incluyen la discriminación de muestras de alimentos de diferente tipo, origen, edad y calidad; con la predicción de la concentración de analitos específicos e índices significativos (**Pérez et al., 2019**). Siendo así, esta técnica una solución ventajosa para determinar analitos específicos o estimar la calidad global de una muestra, sin la subjetividad de los paneles sensoriales entrenados, pues estos tienen limitaciones y demandan de tiempo, por lo que son costosos (**Ordoñez et al., 2020; Orlandi et al., 2019**).

Las lenguas electrónicas voltamétricas se aplican principalmente en la determinación de vino, leche, té, café, vinagre, zumos de frutas, tomate, aceite, miel, pescado y carne (**Nowshad & Khan, 2021**). Sin embargo, estas tecnologías se emplean también en la identificación o detección compuestos contaminantes como patógenos, toxinas, metales pesados y pesticidas (**Handa & Singh, 2018; Woertz et al., 2011**). Por lo tanto, estas técnicas son una alternativa comprometedora en situaciones

complejas, porque brindan información relevante para determinar la calidad e inocuidad dentro de la cadena de producción. Además, **Ivarsson et al. (2005)** menciona que los métodos voltamétricos proporcionan alta sensibilidad, amplio rango lineal e instrumentación simple y robusta.

Por tal motivo, considerando los antecedentes la presente investigación se plantea con el objetivo de analizar las lenguas las lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones en productos alimenticios, describiendo su mecanismo de funcionamiento y su equipamiento. Con la finalidad de dar a conocer los beneficios y los avances de estas metodologías no convencionales en el control de alimentos.

1.2 Antecedentes investigativos

En la década de los 90 se desarrollaron las primeras investigaciones sobre los sensores del sabor denominados “lenguas electrónicas” con la finalidad de imitar la capacidad de la lengua humana para reconocer y evaluar las sensaciones gustativas (**Marx et al., 2021**). En 1990 Toko y sus colaboradores diseñaron el primer sensor con un electrodo multicanal compuesto de transductores de membranas lipídicas/poliméricas capaces de responder a las cinco sustancias básicas (**Hayashi et al., 1990**). Lo que permitió el desarrollo de un sensor de selectividad global capaz de evaluar cuantitativamente los alimentos como cerveza, café, agua mineral y verduras (**Toko, 1996**). Desde entonces se han desarrollado múltiples trabajos a nivel académico y comercial siendo los primeros; la evaluación de los atributos gustativos, el análisis de iones y metales pesados, así como también la evaluación del deterioro de los alimentos, dando paso a la implementación de una tecnología novedosa en el campo alimenticio para la estimación de la calidad e inocuidad de bebidas y alimentos.

El interés en el desarrollo de estos dispositivos electrónicos va en aumento ya sea con fines de investigación o de explotación industrial. Estudios bibliométricos evidencian el crecimiento de publicaciones durante los últimos, **Cetó et al. (2022)** representa un informe del número de publicaciones anuales de la base de datos Web of Science como se muestra en la **Figura 1**, donde empleó palabras claves de búsqueda como “lengua electrónica” o “sensor del sabor” las cuales reportaron más 150 documentos durante los años 2019-2022. Por otro lado, se refino la búsqueda

utilizando el término “voltam” para incluir resultados de sensores voltamétricos resaltando el crecimiento significativo de publicaciones en esta área. Según **García Hernández (2015)** en la actualidad existen varios grupos de investigación a nivel mundial dirigidos al estudio de las lenguas electrónicas en el campo de la alimentación los cuales se detallan a continuación:

- España en el análisis de aceite, carne, pescado, vinos, cerveza y zumos de frutas dado por la Universidad de Valladolid, la Universidad Politécnica de Valencia y el Instituto de Microelectrónica de Barcelona.
- Rumania en el análisis de aceite de oliva por la Universidad de Galati.
- India en el análisis del té por la Universidad de Jadavpur.
- Polonia en el análisis de leche en la Universidad Tecnológica de Varsovia.
- Italia en el análisis de vino y procesos de fermentación alcohólica por la Universidad de Milán y la Universidad de Tor Vergata.
- Rusia en el análisis de aceites, quesos y procesos de fermentación por la Universidad de San Pettersburgo.
- Portugal en el análisis de la fermentación y análisis de gliadina en alimentos dadas por el Instituto Politécnico de Bragança y la Universidad de Aveiro respectivamente.
- Brasil análisis de café por la Universidad de Sao Paulo.
- Suecia en la evaluación de la calidad del agua de consumo por la Universidad de Linköping.
- Japón en el análisis de cerveza y sake por la Universidad de Kyushu.

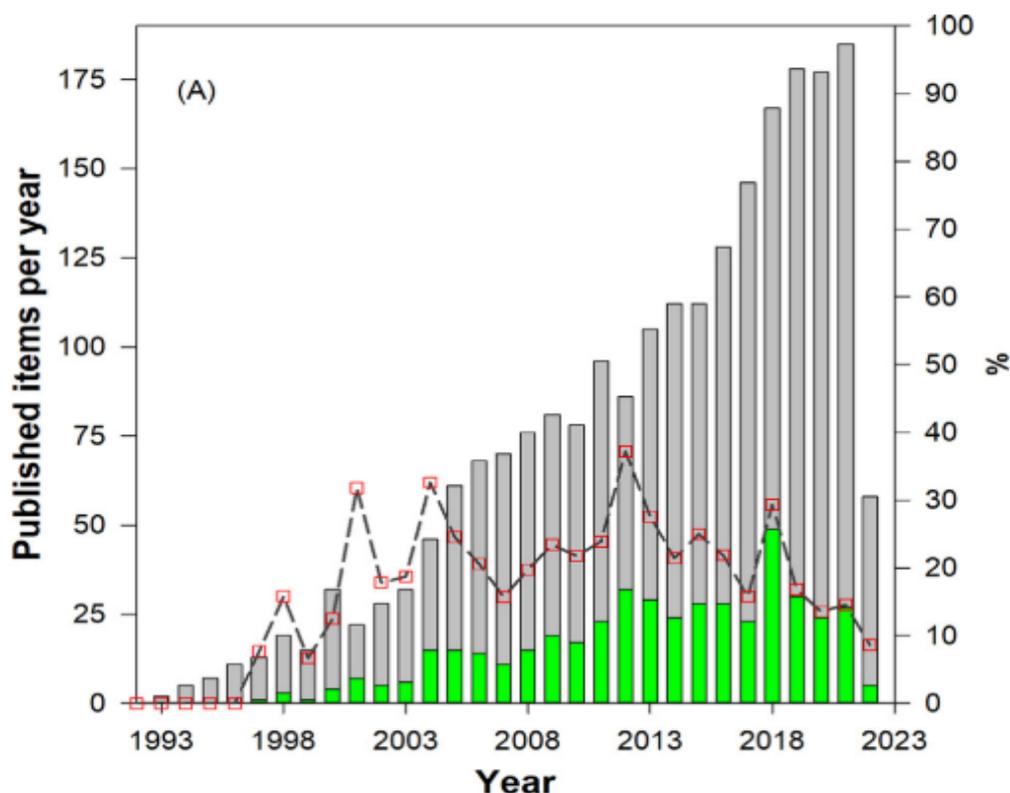


Figura 1. Número de documentos publicados anualmente sobre las lenguas electrónicas

Nota. En la figura se detalla los trabajos publicados de la base de datos Web of Science de acuerdo a las palabras clave de búsqueda “lengua electrónica” o “sensor del sabor” (barras grises), utilizando el término “voltam” para incluir las palabras como voltammetric, voltametric o voltammetry (barras verdes). Reproducida de *Fundamentals and application of voltammetric electronic tongues in quantitative analysis*, de Cetó et al., 2022, Trends in Analytical Chemistry.

1.2.1 Lenguas electrónicas y el sentido del gusto

La lengua es un músculo esquelético entrelazado que permite la articulación de la voz, además, de la hidratación de la boca y los alimentos mediante la salivación y la deglución (Gómez et al., 2017). Está compuesta por papilas gustativas las cuales son receptoras del gusto, puesto que brindan la capacidad de seleccionar, reconocer y aceptar diferentes alimentos, en la **Figura 2** se muestra los cinco sabores que percibe la lengua (amargo, salado, dulce, ácido y umami), mientras que en la **Tabla 1** se

representa las sustancias químicas que causan el sabor (Marx et al., 2021). Las papilas gustativas se organizan en grupos de 50 a 100 células para formar los botones gustativos, mismos que entran en contacto con las sustancias químicas de la comida disueltas en la saliva a través del poro gustativo, donde interactúan con receptores del gusto y con proteínas G a fin de emitir cambios eléctricos y traducir señales para conectar con los nervios del cerebro (Gómez et al., 2017; Nowshad & Khan, 2021).

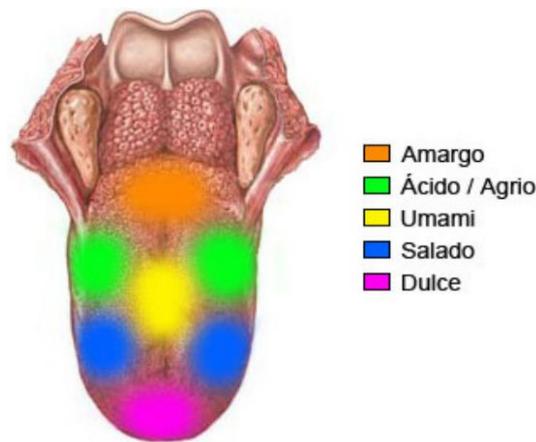


Figura 2. Regiones especializadas de la lengua para recibir cada tipo de sabor

Nota. Reproducida de *Aspectos relevantes para el diseño de una lengua electrónica*, de Gómez et al., 2017 (pp. 289), Universidad Tecnológica de Pereira.

Tabla 1. Sustancias químicas que muestran las cinco cualidades gustativas básicas

Calidad del sabor	Sustancias químicas
Ácido	Disociados de H ⁺ , ácido clorhídrico, ácido acético, ácido cítrico, etc.
Amargo	Quinina, cafeína, cloruro de magnesio, etc.
Salado	Principalmente cloruro de sodio
Dulce	Sacarosa, glucosa, etc.
Umami	Inosinato disódico (IMP), guanilato disódico (GMP) y inosinato disódico (IMP).

Nota. Reproducida de *“Electronic noses and tongues”*, de Di Rosa et al., 2020 (pp. 360), Chemical Analysis of Food.

Las lenguas electrónicas se definen como un emulador de la lengua humana, cuyo funcionamiento se da mediante sensores de baja selectividad o sensibilidad cruzada, pero de alta estabilidad que permiten el reconocimiento cualitativo o cuantitativo de diferentes parámetros químicos o físicos de los alimentos y bebidas a través de patrones, los cuales son la respuesta a una huella digital que se logra mediante herramientas estadísticas (Alcañiz et al., 2012; Baldeón, 2015; Ordoñez et al., 2020). En la **Figura 3** se representa la analogía de la lengua humana y la lengua artificial, Fuentes Pérez (2017) menciona que, a diferencia del cuerpo humano, que tiene la capacidad de reconocer compuestos presentes en alimentos gracias a los quimiorreceptores de distinta naturaleza que envían una señal al cerebro, las lenguas electrónicas procesan estas señales a través de electrodos empleando quimiometría, de tal forma que se puede identificar o cuantificar compuestos.

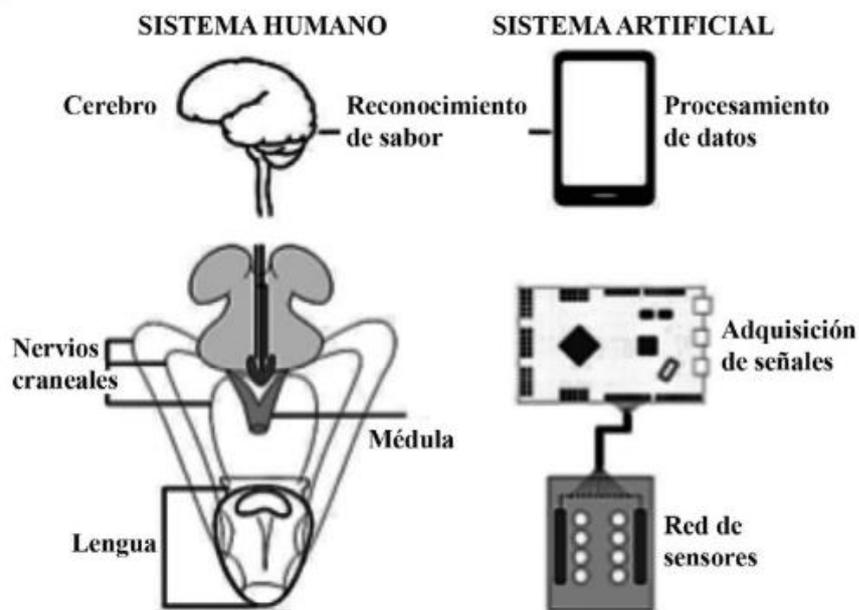


Figura 3. Esquema de sistema gustativo humano y artificial

Nota. Reproducida de *Lengua electrónica portátil para el análisis de leche cruda basada en tecnología PSoC (Programmable System on Chip) y Android Portable* (pp. 446), de Arrieta Almario & Fuentes Amín, 2016, *Ingeniare: Revista Chilena de ingeniería*.

1.2.2 Principales aplicaciones de las lenguas electrónicas en el análisis de alimentos

Las lenguas electrónicas se han empleado principalmente a nivel académico e industrial para el control de calidad, la detección de contaminantes y la detección de compuestos en bajas concentraciones (**Titova & Nachev, 2020**). Por esta razón se detalla en la siguiente lista las aplicaciones de las lenguas electrónicas en análisis de alimentos según datos expuestos por **Handa & Singh (2018)**, **Nowshad & Khan (2021)** y **Titova & Nachev (2020)**.

- Clasificación de muestras de café según su concentración.
- Análisis de la calidad del agua.
- Clasificación o identificación de leche para determinar la calidad microbiana.
- Detección de adulteraciones en leche por mastitis o antibióticos.
- Diferenciación de jugos de fruta según el estado de madurez.
- Análisis de la calidad de la carne de acuerdo con el parámetro de frescura.
- Detección de alcoholes en bebidas.
- Clasificación e identificación de vinos por origen geográfico.
- Clasificación de jugos de frutas por la concentración de fructuosa.
- Detección de calidad de jugo de naranja.
- Detección de adulteraciones y deterioro en jugos.
- Caracterización de la fermentación de la cerveza.
- Análisis de la calidad de la miel.
- Determinación de cafeína y catequinas en té verde.
- Análisis de la calidad del pescado según parámetros de degradación química y bioquímica.

1.2.3 Tipos de lenguas electrónicas

Las lenguas electrónicas se diseñan en función de los diferentes tipos de sensores y el procesamiento de las señales que permiten la adquisición de datos, es decir que comprenden de un arreglo de sensores electroquímicos asistidos por análisis multivariado (**De Morais et al., 2018**). Los sensores comúnmente empleados son los electroquímicos tales como: potenciómetros, amperométricos, voltamétricos, impedimétricos y conductimétricos (**Podrazka et al., 2018**). Sin embargo, **Olguín**

(2017) señala que las lenguas electrónicas potenciométricas y las lenguas electrónicas voltamétricas son las más habituales en el análisis de alimentos, pero también se presentan estudios donde se emplean las lenguas electrónicas impedimétricas.

1.2.3.1 Lenguas electrónicas potenciométricas

De acuerdo con **Marx et al. (2021)** este tipo de lenguas están diseñadas con sensores potenciométricos como su nombre lo indica, mide la diferencia del potencial eléctrico que varía con la concentración del analito, puesto que el reconocimiento de las señales son proporcionales a la concentración de las especies analizadas. Estas lenguas electrónicas se basan en matrices de tipo ISE (Ion Selective Electrode) o ISETs (Ion sensitive field effect transistor).

En cuanto a su estructura, estos están compuestos por dos electrodos, uno de trabajo (WE) y uno de referencia (RE). El de trabajo sirve como superficie para las reacciones redox, y el electrodo de referencia es el que mide el potencial del electrodo de trabajo. Generalmente los electrodos de trabajo se fabrican de oro, carbono vítreo, rodio, platino u otros materiales, mientras que los de referencia son de plata o cloruro de plata (**Wadehra & Patil, 2015**).

1.2.3.2 Lenguas electrónicas voltamétricas

Según **Fuentes Pérez (2017)** las lenguas voltamétricas miden la corriente obtenida cuando los componentes redox se oxidan o se reducen en la superficie del electrodo, puesto que se aplica un potencial determinado al electrodo de trabajo. Por lo cual, se caracteriza como una herramienta de alta sensibilidad, versatilidad, simplicidad y robustez, puesto que, permite utilizar y combinar diferentes principios analíticos como voltametría cíclica, voltametría de redisolución y voltametría de pulsos (**Tudor et al., 2014**).

Por lo tanto, son consideradas como un sistema sensorial analítico, debido a que están compuestas de un conjunto de sensores no específicos capaces de interactuar con compuestos volátiles y analitos dispersos en solución, generando una información multidimensional compleja que requiere ser analizada por medio de herramientas de selectividad cruzada (**Ordoñez et al., 2020**). Además, estructuralmente las lenguas voltamétricas están compuestas por una matriz de

electrodos los cuales son: contraelectrodo, electrodo de trabajo y electrodo de referencia (Wang & Liu, 2019).

1.2.3.3 Lenguas electrónicas impedimétricas

El principio de las lenguas impedimétricas se basa en la medición de la impedancia, la cual es el cociente entre el potencial aplicado y la intensidad de corriente a la salida. Por lo que, al caracterizar un material la impedancia varía según la frecuencia del potencial aplicado con respecto a las propiedades del material, y así se obtienen datos relacionados con la propiedades físicas o químicas del mismo (Salvo, 2019). Este sistema de medida no requiere de especies activas o de electrodos de referencia estándar, sino de un generador/analizador de funciones FRA (Frequency Response Analyser), siendo esto una ventaja respecto a las otras lenguas electrónicas, puesto que su equipamiento es simple con tiempos de respuesta cortos (Wei et al., 2017).

1.2.4 Tipos de voltametría aplicadas en las lenguas electrónicas voltamétricas

Es importante mencionar que en las lenguas voltamétricas se puede emplear diferentes técnicas analíticas, principalmente voltametría de barrido lineal, voltametría de pulso, voltametría cíclica y voltametría de redisolución anódica que se explica a continuación:

1.2.4.1 Voltametría de barrido lineal

Esta técnica se basa en aplicar un potencial al electrodo de trabajo a diferentes velocidades, mismas que aumentan de forma lineal y varían entre 10 mV/s y 10V/s. Por ello, permite el estudio de curvas donde se relaciona los valores de la corriente de pico y el potencial con respecto a la velocidad de barrido, puesto que mide la corriente resultante. El objetivo de este análisis es caracterizar el proceso electroquímico, así como conocer la naturaleza de la reacción con respecto a su grado de reversibilidad (Alcañiz, 2011).

1.2.4.2 Voltametría de pulsos

La voltametría de pulsos se caracteriza debido a que da impulsos periódicos mediante un barrido de potencial no lineal, esto con el fin de conseguir dos medidas, una obtenida a los milisegundos antes de aplicar el pulso y otra después de este, dando como resultado una curva diferencial en forma de pico, cuya altura es

directamente proporcional a la concentración de la muestra investigada. Una de las principales ventajas de esta técnica es que permite observar los picos individuales para sustancias que tienen potenciales que difieren en tan solo unos milivoltios, lo que indica que es un método altamente sensible (**Moreno Barón, 2016**).

1.2.4.3 Voltametría cíclica

De acuerdo con **Arrieta Almario & Fuentes Amín (2016)** el principio de esta técnica es llevar a cabo una variación de los potenciales del electrodo en los cuales ocurre una reacción de óxido reducción, que estará controlada por la difusión de uno o más analitos de una sustancia. Esta variación en la intensidad está dada por una señal de potencia de forma triangular la cual permite tener un sistema estable. Cabe resaltar que los parámetros tratados en esta técnica son: el potencial de pico catódico, la intensidad del pico catódico, el potencial de pico anódico y la intensidad de pico anódico (**Moreno Barón, 2016**).

Esta técnica es la más utilizada puesto que permite evaluar parámetros cinéticos termodinámicos, es decir permite obtener información cualitativa sobre procesos electroquímicos de tal manera que se los puede caracterizar (**Nowshad & Khan, 2021**).

1.2.4.4 Voltametría de redisolución anódica

Esta técnica se caracteriza porque se lleva a cabo en dos etapas que son la preconcentración y la redisolución anódica. En la preconcentración la muestra es colocada en el electrodo mediante la aplicación de un potencial de acumulación que va aproximadamente 0.3 - 0.5 voltios, durante 30 segundos y 20 minutos dependiendo de la muestra, esto provocan la reducción del analito. Por su parte, en la redisolución se realiza en reposo con el fin de evitar un aporte de electrolitos hacia la superficie del electrodo (**Moreno Barón, 2016**).

1.2.5 Partes de la lengua electrónica voltamétrica

De manera general, en la **Figura 4** se muestra los componentes principales de la lengua electrónica voltamétrica que son: la matriz de electrodos empleada como transductor para detectar los analitos de interés en la muestra, el circuito del módulo de interfaz del hardware y el módulo de software que reside en la computadora

(Ghosh et al., 2016). La matriz de electrodos se compone de tres elementos, los cuales se detallan a continuación:

1.2.5.1 Electrodo de referencia (RE)

Este tipo de electrodo presenta un potencial conocido, constante e insensible a la composición de la disolución de estudio, con el fin obtener potenciales reproducibles y sin cambios, para conocer el potencial exacto de la muestra analizada. Son elaborados generalmente de Ag^+/AgCl (plata/cloruro de plata), sin embargo, pueden ser también de calomelanos o de hidrógeno (Mishra et al., 2018; Zhang & Hoshino, 2019).

1.2.5.2 Electrodo de trabajo (WE)

El electrodo de trabajo mide la corriente cuando se aplica un potencial, se fabrican de metales nobles (oro, iridio, paladio, platino y rodio) y metales no nobles (plata, cobalto, cobre y níquel) (Ghosh et al., 2016; Nowshad & Khan, 2021).

1.2.5.3 Contraelectrodo (CE)

El contraelectrodo o electrodo auxiliar tiene la función de pasar toda la corriente a través del electrodo de trabajo a fin de cerrar el circuito y excluir reacciones secundarias, generalmente estos se fabrican de metales nobles como platino (Moreno Barón, 2016; Zhang & Hoshino, 2019).

Por otro lado, se describe el hardware y el módulo de software empleado en las lenguas electrónicas para obtener respuestas eléctricas de los sensores.

1.2.5.4 Hardware y software

Según Ghosh et al. (2016) el módulo de software permite la ejecución de pasos de control de secuencia para operar el módulo de interfaz del hardware y así registrar sus medidas, mientras que el módulo de interfaz del hardware genera los voltajes de control especificados por el módulo del software, además mide las respuestas eléctricas resultantes generadas por los electrodos. Es decir que los módulos de software y hardware permiten el procesamiento, la representación y el análisis de los datos medidos.

1.2.5.5 Procesamiento de datos

Las señales eléctricas obtenidas son procesadas mediante el algoritmo de procesamiento de datos y el reconocimiento patrones (Ordoñez et al., 2020). Por lo cual se emplean diferentes sistemas de reconocimiento, para el análisis cualitativo se utilizan generalmente: Análisis de componentes principales (PCA), Regresión de componentes principales (PCR), Análisis de conglomerados jerárquicos (HCA) y Análisis discriminante lineal (LDA), mientras que, para análisis cuantitativo se utilizan: Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), Redes neuronales artificiales (ANN) y Máquinas de vectores de soporte (SVM); sin embargo, dentro de las lenguas electrónicas los más comunes son PCA, PLS y ANN (Wang & Liu, 2019).

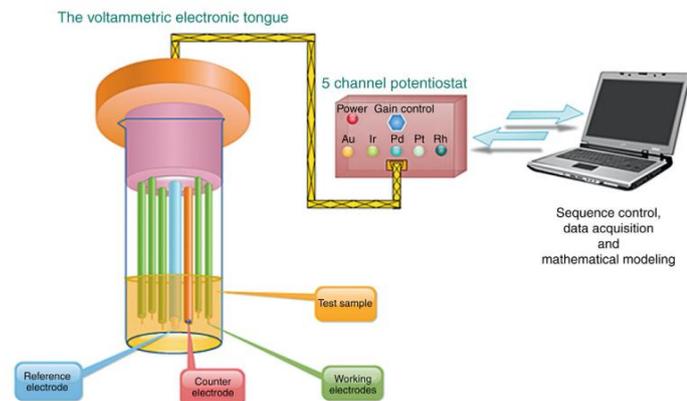


Figura 4. Componentes de la lengua electrónica voltamétrica

Nota. Reproducida de *Electronic Tongue for the Estimation of Important Quality Compounds in Finished Tea* (pp. 284), de Ghosh et al., 2016, *Electronic Noses and Tongues in Food Science*.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Analizar la efectividad de la aplicación de lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones en productos alimenticios.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales agentes contaminantes detectados en productos alimenticios mediante el uso lenguas electrónicas voltamétricas.
- Determinar los tipos de sensores y electrodos comerciales de las lenguas electrónicas voltamétricas utilizados en la industria de alimentos.
- Establecer las ventajas y desventajas del uso de lenguas electrónicas voltamétricas en la industria de alimentos.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Materiales y equipos

- Libros online.
- Revistas de investigación (Scielo, Science, Sensors).
- Bases de datos (Springer Link, Science Direct, Scopus, PubMed, Dialnet, ProQuest).
- Buscador Google Scholar.
- Generador de bibliografía Mendeley con manejo de APA 7^{ma} edición.
- Computador
- Internet

2.2 Métodos

La metodología del proyecto de investigación fue una revisión bibliográfica, porque se fundamentó en un diseño de investigación teórico-fundamentado bajo el concepto de **Strauss & Corbin (2012)**, puesto que, los métodos cualitativos se basan en la recolección y el análisis de datos para luego organizarlos de forma sistemática. Además, se empleó la técnica documental para la búsqueda y recolección de la información, por lo que se estableció los parámetros que se describen en los siguientes puntos.

2.2.1 Definición del problema

Para **Baena Paz (2017)** el planteamiento del problema es el instrumento para describir con mayor precisión los objetivos, el contenido y el procedimiento del estudio según las necesidades del investigador. Por ello, la investigación se basó en el estudio de las nuevas tecnologías no convencionales y no invasivas como son las lenguas electrónicas voltamétricas para la detección de alteraciones en productos alimenticios, a fin proporcionar información de carácter relevante que permita indagar sobre esta técnica, puesto que es una alternativa comprometedora dentro de la industria para medir parámetros de calidad e inocuidad.

2.2.2 Identificación del campo de estudio

El área en la que se fundamentó la revisión bibliográfica corresponden a las ciencias en ingeniería en alimentos y biotecnología, puesto que la finalidad de la

investigación fue analizar la efectividad de las lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones en productos alimenticios, describiendo su mecanismo de funcionamiento y su equipamiento, para establecer las ventajas y desventajas del uso estas tecnologías dentro de la industria de alimentos.

2.2.3 Proceso de revisión bibliográfica

El proceso de búsqueda y recolección de bibliografía se realizó mediante el diagrama de flujo propuesto por **Medina Lopez et al. (2010)**, que se detalla en la **Figura 5**.

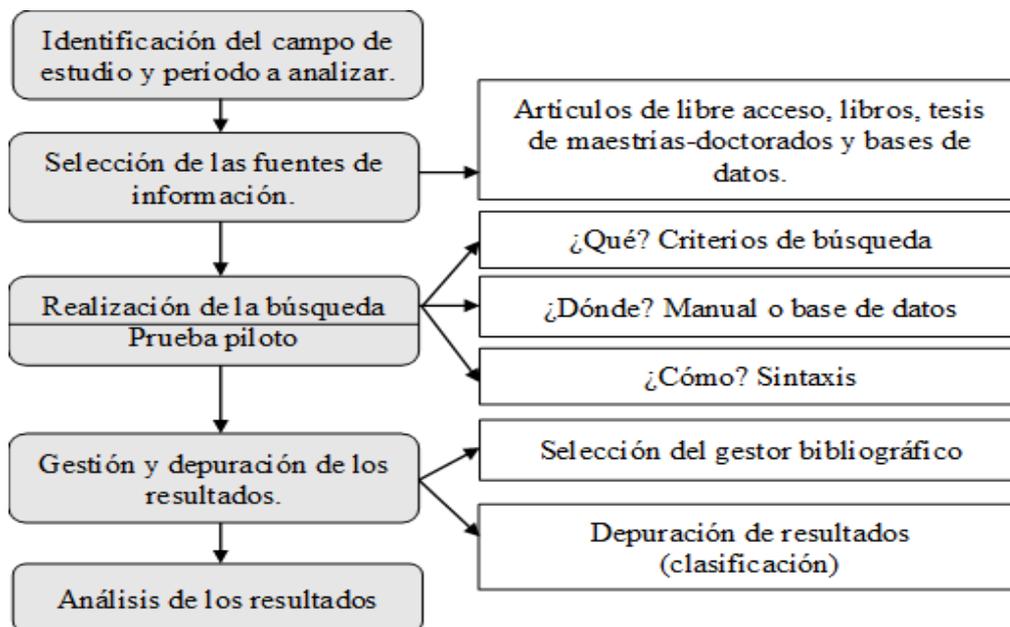


Figura 5. Fases del proceso de revisión bibliográfica

Nota. Adaptado de *Una propuesta para la realización de búsquedas sistemáticas de bibliografía* (pp.15), por Medina López et al., 2010, WPOM (Working Papers on Operations).

2.2.4 Selección de las fuentes de información

En la revisión bibliográfica narrativa se empleó las siguientes fuentes de información:

- **Fuentes primarias:** Artículos originales de revistas científicas (Scielo, Science, Nature).
- **Fuentes secundarias:** Biblioteca virtual de la Universidad Técnica de Ambato y Bases de datos (Springer Link, Science Direct, Scopus, PubMed, Dialnet ProQuest).

- **Literatura gris:** Repositorios de tesis doctorales nacionales e internacionales.

2.2.5 Búsqueda de las fuentes de información

Para la búsqueda bibliográfica se utilizaron las fuentes de información mencionadas anteriormente, limitando a documentos potencialmente relevantes y de actualidad publicados en los últimos 5 años con excepciones según los requerimientos de la investigación. Se empleó palabras claves de búsqueda como lengua electrónica, industria de alimentos, sensores inteligentes, agentes contaminantes, adulteraciones y control de calidad. Además, se limitó a seleccionar información escrita en inglés y español.

2.2.6 Depuración y organización de información

La investigación inició con un total de 90 referencias bibliográficas, de las cuales fueron elegibles 60 referencias que establecieron los criterios de inclusión después de una lectura de los resúmenes y conclusiones presentes en cada investigación. Para su selección se consideró todas que aquellas que cumplan con el desarrollo de los fundamentos teóricos necesarios y cumplimiento de los objetivos propuestos en el estudio. La información organizó de forma sistemática mediante el gestor Mendeley según el autor, el año de publicación, el título y las palabras claves.

2.2.7 Análisis de la información

En esta etapa se estudió las fuentes de información seleccionadas según su relevancia en la investigación, se identificó las ideas principales y conceptos claves para solventar el problema propuesto y los objetivos planteados. El análisis efectuado fue cualitativo puesto que únicamente se utilizó la información recopilada de las referencias citadas que comprenden el trabajo de investigación propuesto.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Tecnologías no convencionales y no invasivas para el análisis de alimentos

En la actualidad el desarrollo de nuevas tecnologías no convencionales y no invasivas surge de la necesidad ofertar productos inocuos que satisfagan las exigencias del mercado. De acuerdo con **Veloso et al. (2018)** la comunidad de investigación científica está desarrollando, construyendo y probando nuevas técnicas de análisis rápidas, de bajo costo y fáciles de usar. Dentro de estas nuevas técnicas analíticas están los sensores electroquímicos como potenciométricos, voltamétricos y amperométricos, mismos que han permitido simular los sentidos del ser humano (**Fuentes Pérez, 2017**).

Los sensores que imitan la lengua y nariz humana se denominan lenguas y narices electrónicas. Según **Pérez et al. (2019)** estos dispositivos presentan alta sensibilidad para obtener respuestas cualitativas o cuantitativas por ejemplo se emplean para determinar concentraciones de especies de interés (componentes mayoritarios, adulteraciones o contaminantes), evaluar propiedades de los alimentos (dulzor, amargor o capacidad antioxidante) y clasificar muestras (según su origen). Por lo que, son una alternativa ventajosa puesto que requieren de pasos mínimos de pretratamiento de muestras y pueden ser miniaturizados permitiendo su aplicación práctica in situ (**Veloso et al., 2018**).

3.2 Lenguas electrónicas

Según **Salvo (2019)** las lenguas electrónicas se definen como un sistema analítico multisensorial, esta tecnología se caracteriza porque está conformada por una red de sensores químicos específicamente electroquímicos no selectivos con una alta especificidad, el cual funciona a través de un software que tiene la capacidad de discriminar y reconocer patrones en soluciones complejas y simples. El reconocimiento de estos patrones se puede realizar a través del uso de herramientas de análisis multivariantes.

3.3 Lenguas electrónicas voltamétricas

Las lenguas electrónicas voltamétricas se definen como una herramienta analítica, puesto que se basan en el reconocimiento de patrones a partir de las señales

obtenidas cuando las especies redox se oxidan o reducen en la superficie del electrodo (**Fuentes Pérez, 2017**). Donde la corriente eléctrica resultante producida por la oxidación o reducción del analito o la especie estudiada se considera una medida de su concentración, es decir que la intensidad de la corriente es proporcional a la concentración del analito (**Fuentes Pérez, 2017; Salvo, 2019**).

3.4 Sensores químicos

De acuerdo con **Leija (2021)** un sensor químico es fundamental en la instrumentación analítica, debido a que se encarga de detectar o recibir la información de un compuesto de interés (analito) en un medio, para transformar la señal recibida en una señal medible. Las señales recibidas son generalmente de tipo eléctrico, lo que permite su análisis y cuantificación. En la **Figura 6** se muestra de manera general los tres componentes de un sensor químico; el primero es el receptor (R) el cual interacciona selectivamente con el analito para recoger la información que será analizada por el sistema; el segundo es el transductor (T) mismo que traduce la interacción en una señal procesable; por último se tiene el amplificador (A) cuyo objetivo es transformar la señal de salida del transductor (**Leija, 2021**).

En la lengua electrónica un sensor presenta una capacidad sensorial máxima para un gusto particular, por lo tanto, las propiedades eléctricas varían o cambian alterando la señal de detección recibida (**Khan et al., 2016**). Por su parte, **Arrieta Almarío & Fuentes Amín (2016)** mencionan que las lenguas electrónicas no emplean únicamente un sensor, sino una red de sensores con diferentes propiedades a fin de obtener varias respuestas para conseguir una “huella digital” del analito de estudio.

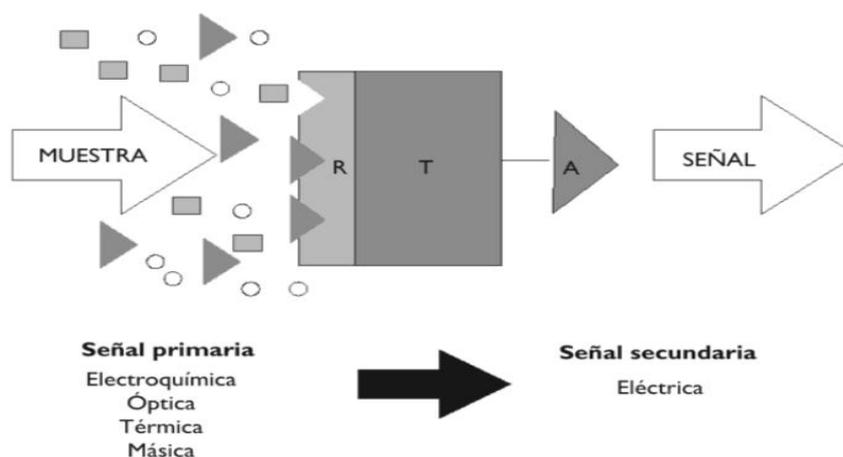


Figura 6. Esquema del funcionamiento de un sensor químico

Nota. Reproducida de *Métodos de procesamiento avanzado e inteligencia artificial en sistemas sensores y biosensores* (pp. 4), de Leija, 2021, Reverté.

3.5 Tipos de sensores químicos

Los sensores químicos se clasifican en función a las señales generadas en una reacción, puesto que, estas pueden ser de tipo electroquímico, térmico o másico.

3.5.1 Sensores electroquímicos

El funcionamiento de estos dispositivos se basa en la detección del cambio en el potencial o la corriente eléctrica cuando existe una interacción electroquímica entre el analito y el electrodo (**López et al., 2015**). De acuerdo con **Leija (2021)** el principio de funcionamiento se basa en obtener una señal eléctrica útil, por lo tanto, dispositivos basados en este sistema son los sensores voltamétricos (electrodos sólidos inertes y electrodos modificados químicamente) y los sensores potenciométricos (electrodos selectivos de iones y por extensión).

3.5.2 Sensores ópticos

Los sensores ópticos por su parte basan su funcionamiento en la detección de una onda de luz (electromagnética) durante la interacción entre el analito y el receptor, a fin de obtener señales optoelectrónicas (**Alegret et al., 2004**). Las magnitudes más habituales de los sensores ópticos son fluorescencia, luminiscencia, absorbancia y reflectancia, razón por la cual son los sensores más empleados en la industria después de los sensores electroquímicos (**Leija, 2021**).

3.5.3 Sensores térmicos

Los sensores térmicos basan su funcionamiento en la medición del calor (energía térmica) que resulta de la interacción entre el analito y el receptor (sensor), es decir de la reacción química que involucra el componente estudiado, principalmente estos dispositivos detectan los cambios de temperatura en la superficie del electrodo (**Leija, 2021**).

3.5.4 Sensores másicos

Estos sensores se fundamentan en la medición de los cambios que sufre la masa cuando existe una interacción entre las especies químicas de estudio y el sensor,

donde generalmente dicho cambio es causado por la acumulación selectiva del analito (Alegret et al., 2004).

3.6 Tipos de sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos se clasifican principalmente en potenciométricos, amperométricos y voltamétricos, por lo cual las lenguas electrónicas se clasifican de la misma manera como se detalla en el capítulo I. De acuerdo con **López et al. (2015)** los sensores electroquímicos deben cumplir con características específicas como bajo costo, reducido consumo de electricidad o energía, sensibilidad adecuada, selectividad variable y vida útil en función del material de construcción o el compuesto de estudio, a fin que permitan obtener técnicas analíticas viables para el estudio de una especie.

- **Sensores potenciómetros**

Estos sensores se caracterizan por estar constituidos de un electrodo de trabajo y un electrodo de referencia, los cuales obtienen información a través de los cambios en el potencial eléctrico entre una solución y la superficie del sensor (**Tan & Xu, 2020**).

- **Sensores impedimétricos**

Los sensores impedimétricos se basan en electrodos conductivos, debido a que su respuesta se fundamenta en la espectroscopia de impedancias, es decir que mide el cociente entre el potencial aplicado constante y la intensidad de corriente de una reacción oxido reducción (**Nowshad & Khan, 2021; Salvo, 2019**).

- **Sensores voltamétricos**

Los sensores voltamétricos miden la intensidad de corriente en una reacción de oxidación o reducción a potencial constante. Están constituidos principalmente por tres electrodos; electrodo de trabajo, electrodo de referencia y contraelectrodo (**Tan & Xu, 2020**).

3.7 Electroodos

En la lengua electrónica voltamétrica la matriz de electrodos se compone de tres elementos; electrodo de trabajo (WE), electrodo de referencia (RE) y contraelectrodo (CE), los cuales se describen en la **Tabla 2** de acuerdo con su función y material de construcción.

Tabla 2. *Tipos de electrodos de la lengua electrónica voltamétrica*

Tipo de electrodo	Función	Material de construcción
Electrodo de trabajo (WE)	Medir la corriente al aplicar un potencial, superficie donde se producen las reacciones redox (Nowshad & Khan, 2021).	Metales nobles: oro, iridio, paladio, platino y rodio. Metales no nobles: plata, cobalto, cobre y níquel.
Electrodo de referencia (RE)	Medir el potencial del electrodo de trabajo (Nowshad & Khan, 2021).	Plata/Cloruro de plata.
Contraelectrodo (CE)	Cerrar el circuito y evitar reacciones secundarias (Moreno Barón, 2016).	Platino Carbono

Wei et al. (2017) menciona que los electrodos de trabajo desempeñan un papel decisivo dentro de las lenguas electrónicas, debido a que el analito de estudio es oxidado o reducido en la superficie del electrodo, mismo que se define con un potencial fijo o variable. Los electrodos de trabajo se presentan de tres formas en una matriz de estudio; desnudos, modificados y biosensores. Los electrodos desnudos están constituidos de por metales nobles y no nobles, mientras que los electrodos modificados se conforman de pasta de carbón y metales, por su parte los biosensores son metales recubiertos por enzimas y catalizadores. En la **Tabla 3** se presentan diferentes electrodos de trabajo según su material de construcción empleados en el análisis de alimentos.

Tabla 3. *Tipos de electrodos de trabajo empleados en las lenguas voltamétricas*

Tipo de electrodo de trabajo	Materiales de construcción	Consideraciones
Desnudos	Metales nobles: oro, iridio, paladio, platino y rodio. Metales no nobles: plata, cobalto, cobre y níquel.	- Definir el rango del potencial. - Forma de la onda (voltametría). - Material del electrodo y

		la afinidad para la muestra de estudio.
Modificados	Pasta de carbón modificados con: ftalocianinas metálicas, polipirrol o bisftalocianinas.	- Carácter oxidante o reductor de la solución de estudio. - Actividad electrocatalítica del material del electrodo.
Biosensores	Enzimas y catalizadores metálicos (platino, paladio y cadmio).	- Definir el arreglo de sensores según la especie de estudio deseada. - Seleccionar herramientas quimiométricas adecuadas para extraer e interpretar datos significativos.

Nota. Adaptada de *The measurement principles, working parameters and configurations of voltammetric electronic tongues and its applications for foodstuff analysis*, de Wei et al., (2017).

3.8 Sensores y electrodos comerciales

Algunos de los sensores comerciales empleados en la construcción de lenguas voltamétricas son de carbono sin modificar y modificados de diferentes marcas como DropSens, mismos que se detallan en la **Tabla 4**. Sin embargo, estos dispositivos son utilizados netamente en investigaciones, puesto que se limitan en la práctica industrial y de laboratorio de rutina (**Legin et al., 2019**). De acuerdo con **Veloso et al. (2018)** la baja comercialización de las lenguas electrónicas se atribuye al tiempo y recursos gastados para la calibración y recalibración, así como la dificultad de establecer modelos generalizados. Por ello, en las investigaciones generalmente se emplean dispositivos fabricados y ensamblados en laboratorios, en la **Tabla 6** se muestra ejemplos de matrices de electrodos construidos para determinar adulteraciones en alimentos y bebidas.

Las lenguas electrónicas que se distribuyen comercialmente son TS-5000Z (Intelligent Sensor Technology, Inc., Japón) y α -Astree (AlphaMOS, Toulouse, Francia) (**Figura 7**), mismas que están constituidas por electrodos miniaturizados con membranas poliméricas, empleados principalmente en el análisis sensorial y el control de la calidad en alimentos (**Marx et al., 2021**). Otras lenguas disponibles en el mercado son el sensor químico Multiarray (McScience Inc., Suwon, Corea) y el Sensor System (San Petersburgo, Rusia), sin embargo, estos dispositivos tienen una aplicación limitada y escasa en la literatura (**Podrazka et al., 2018**).

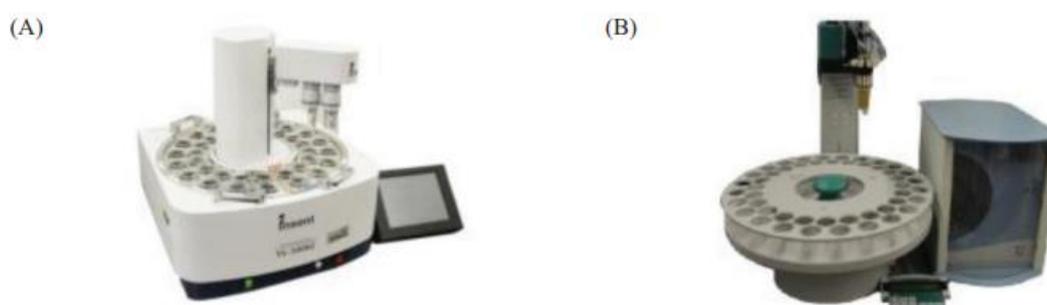


Figura 7. Lenguas electrónicas comerciales

Nota. (A) TS-5000Z; (B) α -Astree. Adaptada de *Sensory analysis using electronic tongues* (pp.338), de Marx et al., 2021, Elsevier.

Tabla 4. Tipos de sensores comerciales

Tipo de sensor	Electrodos
110	WE: Carbono sin modificar. RE: Plata/Cloruro de plata. CE: Carbono
710	WE: Carbono modificado con azul de Prusia. RE: Plata CE: Carbono
110Ni	WE: Carbono modificado con oxido de níquel (NiO). RE: Plata CE: Carbono

110PANI	WE: Carbono modificado con polianilina (PANI). RE: Plata CE: Carbono
110GNP	WE: Carbono modificado con nanopartículas de oro (AuNPs). RE: Plata CE: Carbono
110SWCNT	WE: Carbono modificado con nanotubos de carbono. RE: Plata CE: Carbono
LACT10	WE: Carbono modificado con ferrocianuro y lactato oxidasa. RE: Plata CE: Carbono
GLU10	WE: Carbono modificado con ferrocianuro y glucosa oxidasa. RE: Plata CE: Carbono

Nota. WE (Electrodo de trabajo); RE (Electrodo de referencia); CE (Contraelectrodo). Adaptado de Metrohm DropSens (2022).

3.9 Aplicaciones de las lenguas electrónicas voltamétricas como método de detección de alteraciones

- Miel

En el estudio de las mieles mediante lenguas electrónicas voltamétricas se reportan varios trabajos, principalmente se emplean para; la clasificación según su origen botánico o geográfico, la detección de adulteraciones con jarabes y la identificación de compuestos atípicos como antibióticos derivados de prácticas apícolas realizadas para tratar diferentes enfermedades de las abejas (**Veloso et al., 2018**). Unos de los estudios expuestos por **Ciursa & Oroian (2021)** evaluó 105 muestras de mieles de

origen botánico (acacia, tilia, girasol, polifloral y frambuesa) adulteradas con jarabes (arroz, maíz, azúcar invertido, agave y arce) a diferentes concentraciones (5, 10, 20 y 50%), para lo cual empleó electrodos de trabajo de oro, platino, plata, cobre y carbono vítreo, dando como resultado que los electrodos de plata y cobre proporcionan voltamogramas cíclicos claros, lo que permite distinguir las diferencias entre muestras auténticas y adulteradas como se muestra en la **Figura 8**, la diferencia entre los picos son proporcionales a la concentración de jarabe, por las variaciones de la intensidad de corriente máxima (punto más alto), es decir que la miel adulterada provocó cambios significativos en la intensidad de la corriente por las reacciones redox, por ejemplo con los electrodos de plata se observa este fenómeno, dado que las muestras adulteradas presentan una intensidad de corriente mayor a las auténticas. El modelo LDA permitió la discriminación, dado que al analizar las muestras se obtuvo una precisión del 96,55%, una sensibilidad del 91,67% y una especificidad del 100%, mientras que el modelo SVM presentó el 100% en cuanto a los parámetros.

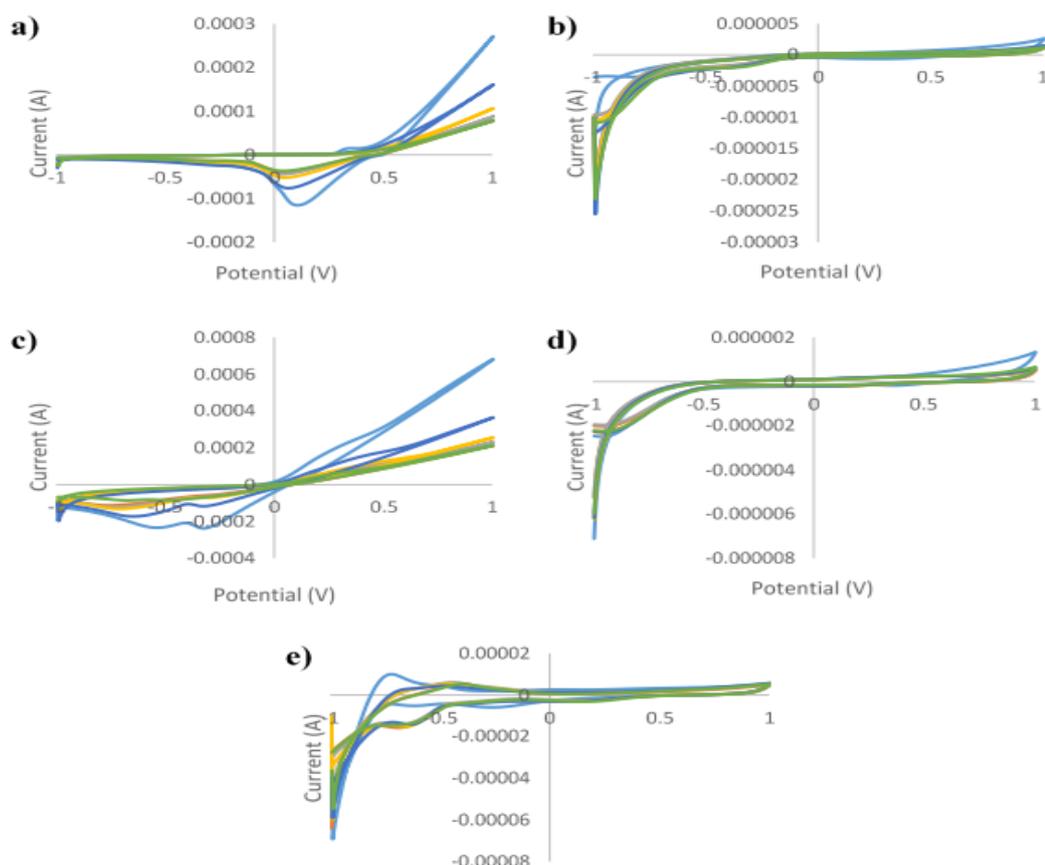


Figura 8. Voltamogramas cíclicos de miel de tilia auténtica y adulterada con jarabe de arce

Nota. (a) electrodo de plata; (b) electrodo de oro; (c) electrodo de cobre; (d) electrodo de vidrio; y (e) electrodo de platino. Línea verde: miel auténtica; línea azul claro: jarabe de agave; línea roja: adulteración 5%; línea gris: adulteración de miel 10%; línea naranja: adulteración de miel 20%; azul oscuro: adulteración de miel 50%. Reproducida de *Voltammetric E-Tongue for Honey Adulteration Detection*, de Ciursa & Oroian, 2021 (pp. 6), Sensors.

Por otro lado, se realizó un trabajo similar en el que se estudió 55 muestras mieles auténticas de origen botánico y 150 mieles adulteradas con fructosa, glucosa, azúcar invertido, jarabe de inulina hidrolizado y mosto de malta a diferentes concentraciones (5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50%), para lo cual se empleó electrodos de trabajo de oro, platino, plata y vidrio, como resultado se obtuvo la discriminación correcta de las muestras mediante el modelo PLS-LDA, dado que la lengua electrónica clasificó el 83,33% de las muestras, mientras que al combinar la lengua electrónica y parámetros fisicoquímicos (pH, acidez libre, conductividad eléctrica y otros) la clasificación fue del 97,50% permitiendo una mejor distinción de las mieles auténticas y adulteradas (**Oroian et al., 2018**). De igual forma, **Bougrini et al. (2016)** clasificaron muestras de miel de diferente origen botánico y geográfico adulteradas con jarabe de glucosa y jarabe de sacarosa a diferentes concentraciones (2, 5, 10 y 20%), para lo cual se empleó 7 electrodos de trabajo y modelos de reconocimiento como PCA, SVM, HCA, donde PCA permitió reconocer un 86,03% y 83,37% de la información respecto a las muestras adulteradas con jarabe de glucosa y jarabe de sacarosa respectivamente, mientras que SVM y HCA alcanzaron el 100% del reconocimiento. Asimismo, **Sobrinho et al. (2018)** estudiaron tres tipos de miel (girasol, azahar y brezo) adulteradas con jarabes de cebada, maíz y arroz integral a diferentes concentraciones (2.5, 5, 10, 20 y 40%) mismas que se clasificó y discriminó por nivel de adulteración mediante voltametría de pulsos y herramientas estadísticas multivariantes como PCA y PLS, obteniendo resultados favorables puesto que las señales obtenidas se relacionan con el nivel de adulteración, por ejemplo, la miel de girasol adulterada con jarabe maíz presentó un índice de correlación de 0,97.

Otros estudios emplean los sensores voltamétricos para determinar antibióticos e insecticidas, **Zhao et al. (2017)** desarrollaron un sensor a base de un microelectrodo

de película de delgada de platino para determinar cloranfenicol en muestras de miel y leche, en el que se relacionó de forma lineal la diferencia de los picos de oxidación con la concentración del antibiótico, dando como resultado una herramienta de alta sensibilidad y excelente selectividad, puesto que el límite de detección fue de 0,39 nM. De igual modo, para el análisis de trazas estreptomycinina en muestras de miel y riñón de porcino, se elaboró un sensor con un electrodo de carbono vítreo modificado con una película de pirrol-3-carboxácido, el cual presentó un límite de detección de 0,5 nM (Wen et al., 2017). Para el análisis de insecticidas/pesticidas en miel se diseñó un sensor electroquímico con un electrodo de trabajo de carbono vítreo modificado con β -ciclodextrina y óxido de grafeno, en el que se estudió los perfiles voltamétricos en función del proceso de electropolimerización y el crecimiento de la película de polímero, dando como respuesta un rango de recuperación de 107,05 y 116% (Oliveira et al., 2018).

- Leche

En cuanto al análisis de leche se han efectuado varios estudios, entre los cuales destaca el realizado por Arrieta et al. (2018) puesto que diseñaron una lengua electrónica voltamétrica portátil mediante una red de sensores electroquímicos basados en polipirrol para la caracterización de leche cruda fresca, trabajó con 7 muestras adulteradas con almidón de maíz a diferentes cantidades (1, 2, 3, 4, 5, 10 y 20%) y 1 muestra pura. Los resultados obtenidos fueron mediante las herramientas estadísticas PCA y PLS, en la **Figura 9** se muestra el análisis de componentes principales (PCA) en el cual se observa que la red de sensores fue capaz de discriminar las 8 muestras de leche según su grado de adulteración, dado que, las muestras se distribuyen en diferentes cuadrantes según las componentes principales PC1 y PC2, por ejemplo las muestras de menor grado de adulteración (1, 2 y 3%) se ubican en los cuadrantes negativos de la primera y segunda componente, por otro lado las muestras de mayor grado de adulteración (4, 5 y 10%) se ubican en el cuadrante positivo de la segunda componente y (20%) en el cuadrante negativo de la segunda componente, además las componentes principales permitieron recoger una varianza (información) del 84,7%. Mientras que, en la **Tabla 5** se muestra el análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) elaborado a partir de las señales voltamétricas, con el que se predice que la concentración de adulterantes en la leche a partir de la lengua electrónica es similar a la concentración real. En conclusión, está

red de sensores fue capaz de discriminar las muestras con diferente grado de adulteración, siendo así una alternativa para evaluar parámetros de calidad.

Tabla 5. Resultados del análisis cuantitativo por regresión PLS de muestras adulteradas de leche

Concentración del adulterante		SD	CV	Error (%)
Real	Predicha			
1	1,00	0,06	6,28	0,24
2	1,99	0,18	8,89	0,27
3	3,05	0,17	5,57	1,60
4	4,06	0,12	3,02	1,46
5	5,00	0,24	4,81	0,02
10	9,89	0,19	1,96	1,13
20	20,03	0,24	1,22	0,13

Nota. SD (desviación estándar); CV (coeficiente de variación). Reproducida de *Determinación de adulterante en leche mediante el uso de una lengua electrónica voltamétrica portable* (pp. 881), de Arrieta et al. 2018.

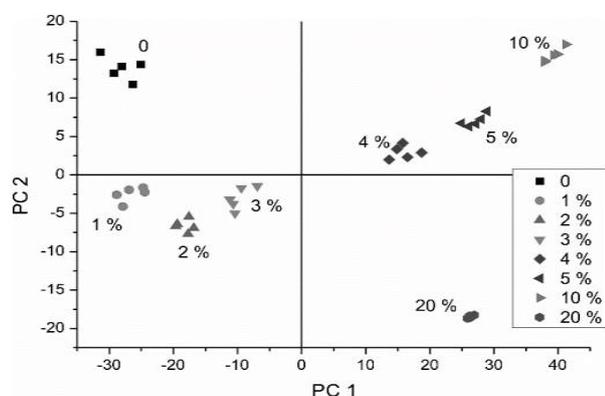


Figura 9. Análisis de componentes principales de muestras de leche adulterada con diferentes cantidades de almidón

Nota. En los cuadrantes se distribuyen las leches según la concentración de adulterante. Reproducida de *Determinación de adulterante en leche mediante el uso de una lengua electrónica voltamétrica portable* (pp. 881), de Arrieta et al. 2018, Revista Mexicana de Ingeniería Química.

Otras investigaciones han empleado las lenguas voltamétricas para la detección de sustancias nocivas como: urea, formaldehído y melamina, **Bueno et al. (2014)** analizaron muestras de leche comercial adulteradas con estas sustancias a concentraciones de 0.95, 4.16 y 10.00 mmol*L⁻¹ respectivamente, para lo cual se utilizó herramientas analíticas de PCA y HCA, además de 3 electrodos de trabajo (Au, Cu, Pt) con los cuales se obtuvo un error de discriminación del 25% para los electrodos de platino, y del 8,3% para los electrodos de oro y cobre. **Wei & Wang (2011)** por su parte discriminaron muestras leche adulteradas con antibióticos (cloranfenicol, eritromicina, sulfato de kanamicina, sulfato de neomicina, sulfato de estreptomicina y clorhidrato de tetraciclina) a diferentes concentraciones (0.5, 1, 1.5 y 2), donde el análisis estadístico se efectuó con cinco modelos de reconocimiento de patrones como se detalla en la **Tabla 6** siendo la mejor PCR, puesto que el coeficiente de correlación fue de 0,9696 en la estimación.

Por otra parte, se han empleado las lenguas voltamétricas construidas a partir de biosensores basadas en la combinación de enzimas con el objetivo de evaluar la calidad de la leche en cuanto a su composición nutricional. Por ejemplo, **Salvo et al. (2022)** en su estudio utilizaron un biosensor que combina enzimas específicas (β -galactosidasa, glucosa oxidasa y galactosa oxidasa) con nanomateriales de plata a fin de discriminar muestras leche según su contenido de grasa y composición nutricional.

- Carne

En la carne se efectuó un análisis en base a los compuestos amínicos (amoníaco y putrescina) que presentan cualidades negativas en la calidad, puesto que participan en los procesos de degradación generando un olor fétido. La detección de los compuestos se dio mediante electrodos de carbón modificados con bisftalocianinas y polipirrol, mismos que presentaron excelentes cualidades analíticas para detectar amoníaco y putrescina en el polvo de extracto de carne de res, los límites de detección fueron de 1,85 y 0,34 μ M para el amoníaco y putrescina respectivamente (**Apetrei & Apetrei, 2016**). También mediante la fabricación de esta lengua voltamétrica se estimó la calidad de la carne por parámetros de frescura, se empleó las herramientas estadísticas PCA Y PSL, concluyendo los autores que los modelos permiten discriminar y clasificar las muestras con una certeza superior al 96%.

- Café

En el café las lenguas voltamétricas se aplicaron para la detección de adulteraciones, así como también para la evaluación de la vida útil. **De Morais et al. (2018)** emplearon un electrodo de trabajo de pasta de carbón (70% grafito + 30% aceite mineral) para analizar estos parámetros mediante voltametría de onda cuadrada. Para la detección de adulteraciones se estudió un total de 90 muestras, 30 de ellas adulteradas con aumento en la concentración de 1,6-6.5% de cáscaras y palos. Mientras que, para estimar la vida útil se evaluó 60 muestras de las cuales 30 estaban caducadas. Se emplearon herramientas multivariantes como PCA, LDA, PLS-DA, MLR y PLS para la clasificación y cuantificación de las muestras de café. En cuanto a los resultados los autores concluyen que el sensor voltamétrico permite discriminar las muestras de café tanto las adulteradas como las caducadas.

- Vino

Parra et al. (2006) evaluaron las adulteraciones comunes del vino tinto como: etanol (modificación del grado alcohólico), ácido tartárico (modificación de la acidez total), ácido tánico (modificación de la astringencia), ácido acético (modificación de la acidez volátil), SO₂ (modificación del contenido de azufre), sacarosa (modificación de azúcares reductores) y acetaldehído (modificación del sabor afrutado), para lo cual utilizaron un arreglo de electrodos voltamétricos que consistió en 11 electrodos de pasta de carbón modificados con ftalocianinas metálicas y polipirrol, además se analizó mediante modelos de reconocimiento PCA y PSL, como resultado obtuvieron una matriz capaz de distinguir vinos con características alteradas, debido a que la composición química de la muestra de análisis afecta la respuesta de los electrodos provocando desplazamientos y cambios de las intensidades de los picos. Otro estudio discriminó vinos tintos según su origen geográfico para lo que construyeron tres tipos de electrodos modificados con nanocompuestos a fin de detectar glucosa, ácido tartárico e información no específica de una muestra, el modelo PCA permitió tener una clasificación con una precisión del 95,7% por lo que se estableció que el sistema es efectivo por las respuestas electroquímicas (**Zheng et al., 2022**).

- Aceite

En los aceites estudios han evaluado su calidad en el sentido de la pureza, debido a que principalmente por su valor económico son adulterados con aceites de menor calidad y costo generando así fraudes comerciales (**Harzalli et al., 2018**). En el aceite de oliva extra virgen se analizó adulteraciones con diferentes aceites como: orujo de oliva, girasol, soja y maíz, para lo que se empleó una lengua voltamétrica con un electrodo de trabajo de carbón vítreo y herramientas de análisis multivariante PCA y PLS. Además, las muestras fueron sometidas a tratamientos previos, para PCA se mezcló el aceite con diclorometano y perclorato de litio en etanol a 0.1M y para PLS se extrajo compuestos metanólicos del aceite. Como resultado se obtuvo voltamogramas cíclicos como se muestra en la **Figura 10**, en los que se observa la diferencia los picos para cada muestra de aceite debido a su composición, puesto que el contenido de antioxidantes, polifenoles, carotenoides y tocoferoles varía en cada aceite por lo tanto los picos también, por ejemplo, los picos más altos se atribuyen a la oxidación de tocoferoles. Además, el análisis PLS permitió cuantificar la adulteración de los aceites con un límite de detección inferior al 2% (v/v) de los extractos metanólicos, siendo así eficiente esta técnica aplicada (**Tsopelas et al., 2018**).

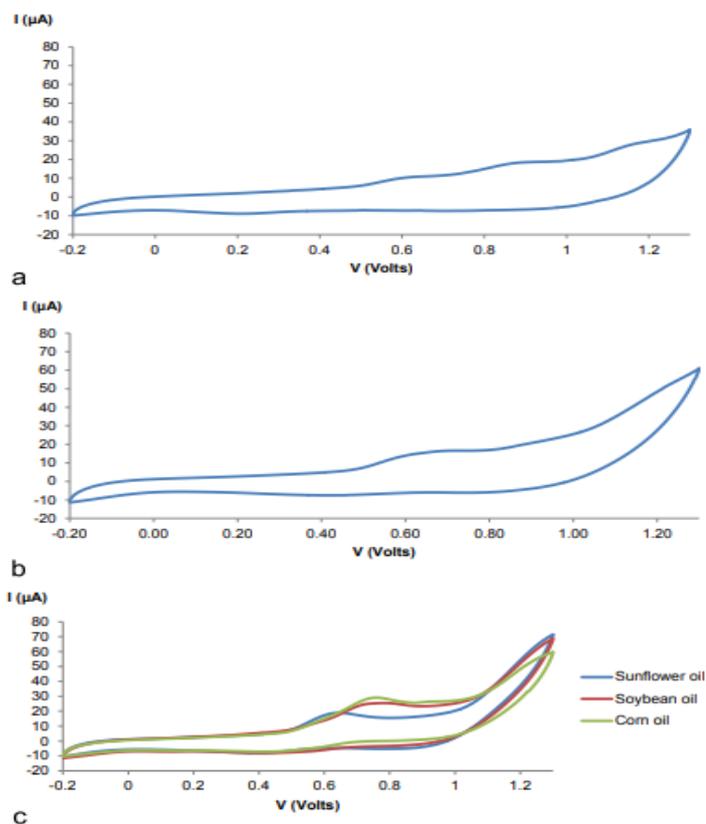


Figura 10. Voltamogramas cíclicos de muestras de aceite

Nota. (a) Aceite de oliva extra virgen, (b) Aceite de orujo de oliva, (c) Aceites de semillas. Reproducida de *Voltammetric fingerprinting of oils and its combination with chemometrics for the detection of extra virgin olive oil adulteration*, de Tsopelas et al., 2018.

Bougrini et al. (2014) por su parte estudiaron el aceite de argán comestible y cosmético adulterado con aceite de girasol a diferentes concentraciones (10, 30, 50 y 70), para lo cual, utilizaron diferentes electrodos de trabajo (Au, Ag, Pt, Pd, Ni, Cu y carbón vítreo) y herramientas de datos multivariados como PCA, DFA y SVM, con las cuales se obtuvo un reconocimiento adecuado, puesto que el modelo SVM tuvo una tasa de discriminación del 91,67 y 83,34% para el aceite de argán comestible y cosmético respectivamente. De igual forma, al analizar los voltamogramas se alcanzó una diferenciación de las muestras como se observa en **Figura 11**, donde los perfiles de respuesta (picos anódicos y catódicos) se relacionan directamente con el grado de adulteración debido a las especies redox en la matriz del aceite, dado que los picos no solo varían en la forma de respuesta si no también la intensidad de corriente, por

ejemplo, en el aceite de argán cosmético la intensidad de corriente es menor cuando la concentración de la adulteración es mayor.

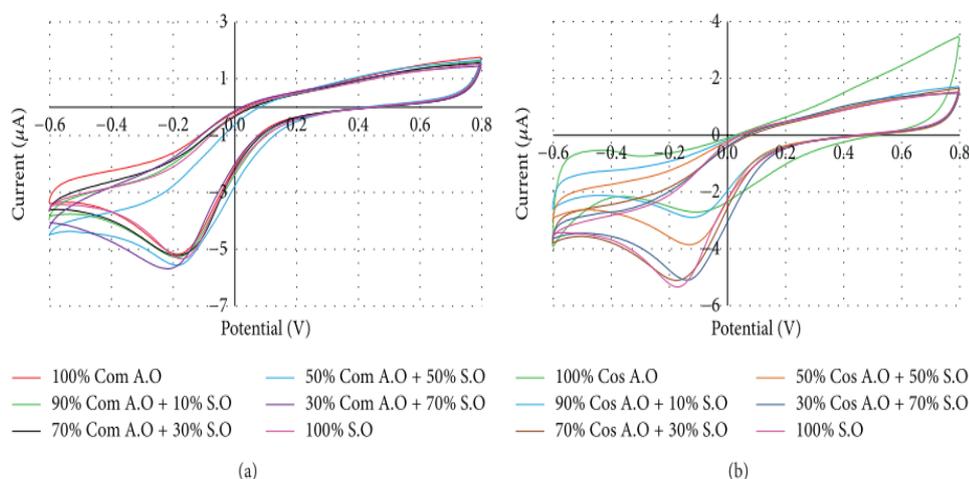


Figura 11. Voltamogramas con sensor de Pt para muestras de aceite de argán comestible y cosmético

Nota. (a) Aceite comestible de argán y (b) Aceite cosmético argán; adulterados con aceite de girasol a diferentes concentraciones. Reproducida de *Detection of adulteration in argan oil by using an electronic nose and a voltammetric electronic tongue*, de Bougrini et al., 2014, Journal of Sensors.

- Jugos de fruta

En relación a los jugos de frutas, **Wójcik & Jakubowska (2021)** estimaron la calidad según el contenido de azúcares, para ello emplearon jugos de manzana comerciales y caseros adulterados con jarabes de glucosa-fructosa a diferentes concentraciones (2,4,6,8 y 10% -10, 20, 30, 40, y 50%), donde las medidas voltamétricas se realizaron por medio de un sensor de iridio de disco cuádruple, mismo que demostró ser útil para el perfilado de las muestras de estudio dado que al emplear las herramientas multivariables como PCA, PCR, PLS y iPLS, tuvieron la capacidad de distinguir los tipos de jugo así como la concentración del adulterante. Por su parte, **Fuentes Pérez (2017)** evaluó la capacidad de la lengua voltamétrica en el control de calidad del zumo de naranja pasteurizado en relación con el desarrollo de bacterias esporuladas termorresistentes, así como el análisis de pH, °Brix y ácido ascórbico. Para este fin se inoculó cepas *Alicyclobacillus acidoterrestris* y *Alicyclobacillus hesperidum* de las cuales se estudió su evolución durante 16 días.

Donde como resultado se obtuvo que la lengua electrónica fue capaz de identificar las alteraciones producidas por las bacterias, sin embargo, estas fueron enmascaradas cuando se producen variaciones en la concentración de ácido ascórbico, debido a la gran dependencia de la respuesta voltamétrica relacionado con éste.

- Agua

En cuanto al análisis del agua se han diseñado varios prototipos de lenguas voltamétricas con la finalidad de estimar la calidad para el consumo humano. **Comina et al. (2009)** trabajaron con un sensor electroquímico no selectivo basado en electrodos de oro y platino, además de la herramienta de análisis multivalente PCA, para estudiar muestras de agua limpia y contaminada con *E. coli* a tres concentraciones, en cual el sistema de sensores logró discriminar las muestras según su composición física y bacteriológica. De la misma manera, otros estudios han evaluado e identificado parámetros como: NaCl (Cloruro de sodio), NaN_3 (Azida de sodio), NaHSO_3 (Bisulfito de sodio), ácido ascórbico, NaOCl (Hipoclorito de sodio) y levaduras en agua potable mediante sensores no selectivos con herramientas PCA y PLS, sin embargo, este sistema solo se utilizó en muestras puras con el objetivo de identificar la capacidad de la lengua electrónica para predecir la calidad del agua (**Winqvist et al., 2011**).

En la Tabla 6 se muestra un resumen de las aplicaciones de las electrónicas voltamétricas en la detección de alteraciones, en la cual se indica las técnicas voltamétricas y el tipo de herramienta analítica empleadas en el reconocimiento de patrones con el fin de diferenciar entre los productos alimenticios auténticos y adulterados, donde se determinó que la voltametría cíclica es la más usada al igual que las herramientas multivariantes de análisis de datos como PCA y PLS. Los alimentos en los que se ha evaluado adulteraciones son miel, leche, carne, café, aceite, vinos, jugos de fruta y agua. **Wójcik & Jakubowska (2021)** afirman que la adulteración o alteración de los alimentos incluyen la disolución, mezcla o sustitución del producto original con otros materiales o partes inútiles de los mismos productos, que no cumplen con los estándares de calidad, y principalmente dichos fraudes se dan por su valor comercial y la demanda del mercado.

Tabla 6. *Aplicaciones de las lenguas electrónicas voltamétricas en el análisis de alteraciones en alimentos y bebidas*

Tipo de alimento	Aplicación	Voltametría empleada	Electrodos empleados	Herramienta de análisis de datos	Resultado	Referencia
Miel	Clasificación de mieles de origen botánico adulteradas con jarabes (arroz, maíz, azúcar invertido, agave y arce) a diferentes concentraciones.	Cíclica	WE: Au, Cu, Ag, Pt y carbono vítreo. RE: Ag/AgCl CE: Pt	LDA SVM	Los electrodos de Ag y Cu permitieron una mejor discriminación de las muestras, al igual que el modelo SVM puesto su precisión y sensibilidad fue del 100%.	(Ciursa & Oroian, 2021)
	Discriminación de mieles auténticas de origen botánico y mieles adulteradas con fructosa, glucosa, azúcar invertido, jarabe de inulina hidrolizado y mosto de malta.	Cíclica	WE: Au, Ag, Pt y vidrio. RE: Ag/AgCl CE: carbón vítreo.	PLS-LDA MLR	El modelo PLS-LDA permitió clasificar las muestras con una precisión del 83,83%.	(Oroian et al., 2018)
	Clasificación de	Cíclica	WE: Au, Ag,	PCA	Los modelos SVM y	(Bougrini

muestras de miel de origen botánico adulteradas con jarabe de glucosa y jarabe de sacarosa.		Pt, Pd, Ni, Cu y carbón vítreo. RE: Ag/AgCl CE: Pt	SVM HCA	HCA discriminaron et al., 2016) perfectamente las mieles adulteradas, su alcance de reconocimiento fue del 100%.
Detección y cuantificación de jarabes de cebada, maíz, y arroz integral a diferentes concentraciones, en tres tipos de miel girasol, azahar y brezo.	Pulsos	WE: Ir, Rh, Pt y Au RE: Calomelanos CE: acero	PCA PLS	El modelo PCA permitió (Sobrino et al., 2018) discriminar las muestras de miel acorde al nivel de adulteración, siendo el mejor resultado para la miel de girasol adulterada con jarabe de maíz dado que el coeficiente de correlación fue del 0,97.
Detección de antibióticos (cloranfenicol) a bajas concentraciones en leche y miel.	Cíclica	WE: microelectrodo de película delgada de Pt RE: Pt CE: Pt	-	El límite de detección de (Zhao et al., 2017) antibióticos fue del 0,39 nM.

	Detección de trazas de antibióticos (estreptomicina) en muestras de miel y riñón de porcino.	Cíclica	WE: Carbono vítreo modificado con una película de pirrol-3-carboxácido. RE: Calomelanos saturados CE: Pt	-	El límite de detección de insecticidas fue a concentraciones de 0,5 nM. (Wen et al., 2017)
	Determinación de insecticidas/pesticidas (imidacloprid, clotianidina y tiametoxam) en muestras de miel.	Cíclica	WE: Carbono vítreo modificado con β -ciclodextrina y óxido de grafeno. RE: Ag/AgCl CE: Pt	-	Mediante los perfiles voltamétricos se obtuvo una respuesta de recuperación del 107,5 y 116%. (Oliveira et al., 2018)
Leche	Discriminación de leche cruda fresca adulteradas con almidón de maíz a	Cíclica	WE: 6 electrodos de Pt basados en	PCA PLS	El modelo PCA permite recoger información en 84,7% concluyendo que la (Arrieta et al., 2018)

	diferentes concentraciones.		polipirrol. RE: Ag/AgCl		red de sensores fue capaz de discriminar las muestras.
	Detección y discriminación de leche comercial adulterada con urea, formaldehído y melamina.	Cíclica	WE: Pt, Cu y Au. RE: Ag/AgCl CE: Pt	PCA HCA	Los electrodos de Au y Cu obtuvieron un error de discriminación menor del 8,3% en la clasificación de las muestras. (Bueno et al., 2014)
	Detección de residuos de antibióticos (cloranfenicol, eritromicina, sulfato de kanamicina, sulfato de neomicina, sulfato de estreptomina y clorhidrato de tetraciclina) a diferentes concentraciones en leche bovina.	Pulsos	WE: Pt, Ag, Au, Pd y Ti RE: Ag/AgCl CE: Pt	PCA DFA PLS PCR SVM	El mejor modelo en la discriminación de muestra fue PCR, el coeficiente de correlación fue de 0,9696. (Wei & Wang, 2011)
Carne	Detección de amoníaco y putrescina en muestras	Cíclica	WE: C modificado con	PCA PLS-DA	Los modelos PCA y PLS-DA permitieron (Apetrei & Apetrei, 2016)

	de extracto de carne.			bisftalocianinas y polipirrol. RE: Ag CE: C		discriminar las muestras con una certeza superior al 96%.
Café	Clasificación de muestras de café caducadas y adulteradas con cascara y palos.	Onda cuadrada		WE: Pasta de carbón RE: Ag/AgCl CE: Pt	PCA PLS LDA MLR	Los modelos (De Morais et al., 2018) discriminaron las muestras adulteradas y caducadas puesto que los coeficientes de correlación fueron entre 0,97 y 0,98.
Vino	Detección e identificación de adulteraciones en vino tinto por etanol, ácido tánico, ácido tartárico, SO ₂ , sacarosa, ácido acético y acetaldehído	Onda cuadrada Cíclica		WE: 11 electrodos de pasta de carbón modificados con ftalocianinas metálicas y polipirrol. RE: Ag/AgCl	PCA PLS	El modelo PCA permitió (Parra et al., 2006) discriminar las muestras con una precisión del 95,7%.
Aceite	Discriminación de muestras de aceite de	Cíclica		WE: Carbono vítreo	PCA PLS	El modelo PLS permitió (Tsopelas et al., 2018) clasificar las muestras de

	oliva extra virgen adulteradas con aceite de orujo de oliva, aceite de girasol, aceite de soja y aceite de maíz.		RE: Ag/AgCl CE: Pt		aceite con un límite de detección inferior al 2% (v/v) de los extractos metanólicos.
	Clasificación de aceites de argán comestible y cosmético adulterados con aceite de girasol.	Cíclica	WE: Pt, Au, carbón vítreo, Ag, Ni, Pd y Cu. RE: Ag/AgCl CE: Pt	PCA DFA SVM	El modelo SVM tuvo tasa de discriminación del 91,67 y 83,34% para el aceite de argán comestible y cosmético respectivamente. (Bougrini et al., 2014)
Jugos de frutas	Determinación de jarabe de glucosa-fructosa en jugos de manzana caseros y comerciales.	Pulsos	WE: Ir de disco cuádruple. RE: Ag/AgCl CE: Pt	PCA PLS iPLS PCR	Los modelos permiten una discriminación adecuada, por ejemplo el modelo PLS tuvo un índice de correlación de 0,9. (Wójcik & Jakubowska, 2021)
	Determinación de la calidad del zumo de naranja inoculado con <i>Alicyclobacillus</i>	Pulsos	WE: Ir, Rh, Pt y Au	PCA PLS	La lengua electrónica fue capaz de identificar las alteraciones producidas por las bacterias, los (Fuentes Pérez, 2017)

	<i>acidoterrestis</i> y <i>Alicyclobacillus</i> <i>hesperidum</i> .				modelos matemáticos obtenidos presentaron un coeficiente de regresión de 0,868 y 0,890.
Agua	Discriminación muestras de agua potable contaminada con <i>E. coli</i>	Cíclica	WE: Pt y Au RE/CE: Acero inoxidable	PCA	El sensor fue capaz de (Comina et al., discriminar las muestras 2009) contaminadas, según su composición física y bacteriológica.

Nota. PCA (Análisis de componentes principales); PLS (Análisis de regresión mínimos cuadrados parciales); SVM (Máquinas de vectores de soporte); HCA (Análisis de conglomerados jerárquicos); DFA (Análisis de función discriminante); PCR (Análisis de regresión de componentes principales); LDA (Análisis discriminante lineal), MLR (Regresión lineal múltiple); iPLS (Mínimos cuadrados parciales por intervalos).

3.10 Ventajas y desventajas del uso de lenguas electrónicas voltamétricas

Ventajas

- Su fabricación es simple y económica, por lo que puede ser una herramienta práctica y útil para el campo de investigación científica.
- Permite ahorrar tiempo en los ensayos, puesto que el análisis de una muestra se realiza en períodos cortos de 5-10 min.
- Ausencia de fatiga por lo que reemplaza a los paneles sensoriales entrenados.
- Las muestras de estudio no requieren de un pretratamiento, por lo tanto, se reduce el número de muestras a evaluar.
- Mediante herramientas de análisis adecuadas aportan información cualitativa y cuantitativa.
- Los sensores se pueden modificar para obtener mayor sensibilidad y selectividad en una muestra específica.
- Permite detectar compuestos añadidos en las bebidas y alimentos para evitar fraudes comerciales, además de garantizar la calidad del producto y salud del consumidor.
- La limpieza adecuada de los electrodos y su pulido con polvo de alúmina entre una muestra y otra permiten obtener mejores rendimientos analíticos.

Desventajas

- Los sensores requieren de una adecuada calibración con soluciones reales para evitar errores en la medición.
- Los sensores permiten discriminar y clasificar muestras de un grupo establecido, por lo tanto, no siempre son capaces de tener una correlación con datos sensoriales.
- La limpieza de los electrodos limita el uso de las lenguas electrónicas en línea de producción, puesto que se debe eliminar la capa residual que resulta de las reacciones de óxido reducción porque interfiere en la señal de medida.
- La medición con los sensores tiene interferencias por condiciones ambientales como la temperatura y humedad.
- La vida útil de los materiales de detección es corta por lo que se requiere de constante revisión y mantenimiento para evitar errores en la lectura.

- Los sensores están diseñados para trabajar con un analito específico, por lo que se limita para trabajar con varios analitos a la vez en una misma muestra.
- Las lenguas electrónicas brindan diferentes respuestas, por lo que se necesita de una etapa compleja para el procesamiento de datos.
- Las propiedades electroquímicas de un electrodo modificado pueden dificultar la reproducibilidad de datos medidos en el estudio.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Las lenguas electrónicas voltamétricas permiten una excelente discriminación de datos mediante herramientas multivariantes y técnicas electroquímicas como la voltametría cíclica, voltametría de pulsos y voltametría de onda cuadrada, dado que, en el análisis de diferentes alimentos y bebidas se identificó varios agentes contaminantes como jarabes, aceites, antibióticos, insecticidas y ácidos (tartárico, tánico, acético). De los cuales, se destacan más estudios en miel, leche y aceite, puesto que, presentan mayor afluencia de alteraciones por su valor comercial.

En cuanto a la instrumentación se determinó que existen diferentes sensores y electrodos comerciales que permiten el diseño de las lenguas electrónicas voltamétricas, siendo populares los sensores electroquímicos específicamente los voltamétricos constituidos por tres electrodos (referencia, trabajo y auxiliar), los cuales se fabrican de diferentes metales nobles y no nobles. Estos sensores presentan características como bajo costo, robustez, fácil utilización y construcción.

Entre las ventajas del uso de las lenguas electrónicas voltamétricas se estableció que son altamente sensibles, versátiles, fáciles de usar y rápidas puesto que, la toma de mediciones puede llevar un par de minutos. Sin embargo, la mayor desventaja de estas metodologías es la limpieza y calibración de los sensores y electrodos.

4.2 Recomendaciones

Efectuar una revisión bibliográfica enfocada en un solo tipo de alimento o bebida con el objetivo de analizar las diferentes aplicaciones de la lengua electrónica voltamétrica.

Realizar un estudio más exhaustivo sobre las lenguas electrónicas voltamétricas diseñadas con biosensores.

Desarrollar un análisis profundo en cuanto a las herramientas multivariantes o modelos de reconocimiento de patrones empleados en las lenguas electrónicas para la obtención de información.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcañiz, M. (2011). *Diseño de un sistema de lengua electrónica basado en técnicas electroquímicas voltamétricas y su aplicación en el ámbito agroalimentario* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/11303>
- Alcañiz, M., Vivancos, J., Masot, R., Ibañez, J., Raga, M., & Soto, J. (2012). Design of an electronic system and its application to electronic tongues using variable amplitude pulse voltammetry and impedance spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, *111*(1), 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.014>
- Alegret, S., Del Valle, M., & Merkoçi, A. (2004). *Sensores electroquímicos: Introducción a los quimiosensores y biosensores*. Universidad Autónoma de Barcelona. <https://bit.ly/3GCpgrN>
- Apetrei, I. M., & Apetrei, C. (2016). Application of voltammetric e-tongue for the detection of ammonia and putrescine in beef products. *Sensors and Actuators*, *234*, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.005>
- Arrieta, A., Palencia, M., & Arrieta, P. (2018). DETERMINACIÓN DE ADULTERANTE EN LECHE MEDIANTE EL USO DE UNA LENGUA ELECTRÓNICA VOLTAMÉTRICA PORTABLE. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *17*(3), 877-884. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n3/Arrieta>
- Arrieta Almario, Á., & Fuentes Amín, O. (2016). Lengua electrónica portátil para el análisis de leche cruda basada en tecnología PSoC (Programmable System on Chip) y Android. *Ingeniare*, *24*(3), 445-453. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000300009>
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de la Investigación* (3a ed.). Grupo Editorial Patria. <https://editorialpatria.com.mx/pdf/files/9786074384093.pdf>
- Baldeón, E. (2015). *Desarrollo de la técnica de lengua electrónica voltamétrica para la determinación de la capacidad antioxidante total de extractos de plantas y frutas peruanas* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/54116>
- Bougrini, M., Tahri, K., Haddi, Z., Saidi, T., El Bari, N., & Bouchikhi, B. (2014).

Detection of adulteration in argan oil by using an electronic nose and a voltammetric electronic tongue. *Journal of Sensors*.
<https://doi.org/10.1155/2014/245831>

Bougrini, M., Tahri, K., Saidi, T., El Hassani, N., Bouchikhi, B., & El Bari, N. (2016). Classification of Honey According to Geographical and Botanical Origins and Detection of Its Adulteration Using Voltammetric Electronic Tongue. *Food Analytical Methods*, 9, 2161-2173.
<https://doi.org/10.1007/s12161-015-0393-2>

Bueno, L., De Araujo, W., Salles, M., Kussuda, M., & Paixão, T. (2014). Voltammetric electronic tongue for discrimination of milk adulterated with urea, formaldehyde and melamine. *Chemosensors*, 2(4), 251-266.
<https://doi.org/10.3390/chemosensors2040251>

Cetó, X., Pérez, S., & Prieto, B. (2022). Fundamentals and application of voltammetric electronic tongues in quantitative analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116765>

Ciursa, P., & Oroian, M. (2021). Voltammetric E-Tongue for Honey Adulteration Detection. *Sensors*, 21(5059), 1-17. <https://doi.org/10.3390/s21155059>

Comina, G., Venero, J., Alarcon, H., & Solís, J. (2009). Desarrollo de un sistema portátil de análisis de calidad de agua. *Revista de Investigación de Física*, 12, 13-19. <https://doi.org/10.15381/rif.v12i01.8716>

De Moraes, T., Rodrigues, D., De Carvalho, U., & Lemos, S. (2018). A simple voltammetric electronic tongue for the analysis of coffee adulterations. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.136>

Di Rosa, A. R., Leone, F., & Chiofalo, V. (2020). Electronic noses and tongues. En *Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications* (2.^a ed., pp. 353-389). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813266-1.00007-3>

Fuentes Pérez, E. (2017). *Aplicación De La Lengua Electrónica Voltamétrica a Alimentos Líquidos* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/90446>

- García Hernández, C. (2015). *Desarrollo de una lengua electrónica para el análisis de uvas basada en sensores EQCM modificados* [Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/13404>
- Ghosh, A., Tudu, B., Tamuly, P., Bhattacharyya, N., & Bandyopadhyay, R. (2016). Electronic Tongue for the Estimation of Important Quality Compounds in Finished Tea. En *Electronic Noses and Tongues in Food Science* (pp. 245-253). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800243-8.00024-X>
- Gómez, A., Velez, P., Ferrin, C., Correa, E., Vélez, L., & Ramirez, A. (2017). Aspectos relevantes para el diseño de una lengua electrónica. *Scientia et Technica*, 22(0122-1701), 288-297. <https://www.researchgate.net/publication/324686877>
- González López, Á. (2021). *Desarrollo de una lengua electrónica impedimétrica para el análisis de productos lácteos* [Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50728>
- Handa, P., & Singh, B. (2018). Importance of Electronics in Food Industry. *IOSR-Journal of Electronics and Communication Engineering*, 13(2), 15-22. <https://doi.org/10.9790/2834-1302021522>
- Harzalli, U., Rodrigues, N., Veloso, A. C. ., Dias, L. G., Pereira, J. A., Oueslati, S., & Peres, A. M. (2018). A taste sensor device for unmasking admixing of rancid or winey-vinegary olive oil to extra virgin olive oil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.016>
- Hayashi, K., Yamanaka, M., Toko, K., & Yamafuji, K. (1990). Multichannel taste sensor using lipid membranes. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2(3), 205-213. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)85006-K](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)85006-K)
- Ivarsson, P., Krantz, C., Winqvist, F., & Lundström, I. (2005). A Voltammetric Electronic Tongue. *Chemical Senses*, 30, 258-259. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjh213>
- Khan, M., Khalilian, A., & Kang, S. (2016). A high sensitivity IDC-electronic tongue using dielectric/sensing membranes with solvatochromic dyes. *Sensors*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/s16050668>

- Legin, A., Kirsanov, D., & Del Valle, M. (2019). Avoiding nonsense in electronic taste sensing. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115675>
- Leija, L. (2021). *Métodos de procesamiento avanzado e inteligencia artificial en sistemas sensores y biosensores*. Reverté. <https://bit.ly/3FPIMPZ>
- López, S., Sánchez, M., & Martín, S. (2015). *Mantenimiento y reparación básica de los equipos de medida de contaminación atmosférica*. Editorial Elearning, S.L. <https://bit.ly/3VHD3Bu>
- Marx, Í., Veloso, A., Casal, S., Pereira, J., & Peres, A. (2021). Sensory analysis using electronic tongues. En *Innovative Food Analysis* (pp. 323-343). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819493-5.00012-1>
- Medina López, C., Marín García, J. A., & Alfalla Luque, R. (2010). Una propuesta metodológica para la realización de búsquedas sistemáticas de bibliografía (A methodological proposal for the systematic literature review). *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 1(1989-9068), 13-30. <https://doi.org/10.4995/wpom.v1i2.786>
- Metrohm DropSens. (2022). *Spectroelectrochemical Instruments and Accessories*. <http://www.dropsens.com/>
- Mishra, G. K., Barfidokht, A., Tehrani, F., & Mishra, R. K. (2018). Food Safety Analysis Using Electrochemical Biosensors. *Foods*, 7(9)(141). <https://doi.org/10.3390/foods7090141>
- Moreno Barón, L. (2016). *Avances en lenguas electrónicas voltamperométricas y su aplicación en la multideterminación de compuestos presentes en muestras complejas* [Universitat Autònoma de Barcelona]. <https://ddd.uab.cat/record/175982>
- Nowshad, F., & Khan, M. (2021). Electronic Tongue for Food Safety and Quality Assessment. En M. Khan & M. Shafiur (Eds.), *Techniques to Measure Food Safety and Quality* (pp. 229-247). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68636-9_11

- Olguín, C. (2017). *Aproximación al biomimetismo mediante lenguas y narices electrónicas en medios complejos: detección de explosivos, agentes nerviosos y control de alimentos*. Universidad Politécnica De Valencia.
- Oliveira, A., Bettio, G., & Pereira, A. (2018). An Electrochemical Sensor Based on Electropolymerization of β -Cyclodextrin and Reduced Graphene Oxide on a Glassy Carbon Electrode for Determination of Neonicotinoids. *Electroanalysis*, *30*(9), 1918-1928.
- Ordoñez, R., Rodríguez, J., & Urresto, J. (2020). Electronic nose, tongue and eye: Their usefulness for the food industry. *Vitae*, *27*(3), 1-13. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v27n3a01>
- Orlandi, G., Calvini, R., Foca, G., Pigani, L., Vasile Simone, G., & Ulrici, A. (2019). Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening. *Talanta*, *195*, 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.11.046>
- Oroian, M., Paduret, S., & Ropciuc, S. (2018). Honey adulteration detection: voltammetric e-tongue versus official methods for physicochemical parameter determination. *Science of Food and Agriculture*, *98*(11), 4304-4311.
- Parra, V., Arrieta, Á., Fernández, J. A., Rodríguez, M. L., & De Saja, J. A. (2006). Electronic tongue based on chemically modified electrodes and voltammetry for the detection of adulterations in wines. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *118*(1-2), 448-453. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.04.043>
- Pérez, C., Serrano, N., Ariño, C., Esteban, M., & Díaz, J. (2019). Voltammetric Electronic Tongues in Food Analysis. *Sensors*, *19*, 4261. <https://doi.org/10.3390/s19194261>
- Podrazka, M., Bączyńska, E., Kundys, M., Jeleń, P., & Witkowska, E. (2018). Electronic tongue-A tool for all tastes? *Biosensors*, *8*(3), 1-24. <https://doi.org/10.3390/bios8010003>
- Salvo, C. (2019). *Sensores y biosensores electroquímicos: nuevos horizontes y desafíos en su integración en sistemas multisensores para su aplicación en la industria alimentaria* [Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55199>

- Salvo, C., Martín, P., Pura, J., Perez, C., Martin, F., García, C., & Rodríguez, M. (2022). Improving the performance of a bioelectronic tongue using silver nanowires: Application to milk analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131877>
- Sobrinho, L., Bataller, R., Soto, J., & Escriche, I. (2018). Monitoring honey adulteration with sugar syrups using an automatic pulse voltammetric electronic tongue. *Food Control*, 91(0956-7135), 254-260. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.04.003>
- Strauss, A., & Corbin, J. (2012). *Bases de la investigación cualitativa: Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada* (pp. 11-14). Editorial Universidad de Antioquia. <https://bit.ly/3M5v7pJ>
- Tan, J., & Xu, J. (2020). Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 104-115. <https://doi.org/10.1016/J.AIIA.2020.06.003>
- Titova, T., & Nachev, V. (2020). Electronic tongue in the Food Industry. *Food Science and Applied Biotechnology*, 3(1), 71-76. <https://doi.org/10.30721/fsab2020.v3.i1.74>
- Toko, K. (1996). Taste sensor with global selectivity. *Materials Science and Engineering*, 4(2), 69-82. [https://doi.org/10.1016/0928-4931\(96\)00134-8](https://doi.org/10.1016/0928-4931(96)00134-8)
- Tsopelas, F., Konstantopoulos, D., & Kakoulidou, A. T. (2018). Voltammetric fingerprinting of oils and its combination with chemometrics for the detection of extra virgin olive oil adulteration. *Analytica Chimica Acta*, 1015, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.042>
- Tudor, M., Ksenija, M., Kalit, S., Vahčić, N., & Havranek, J. (2014). Application of electronic nose and electronic tongue in the dairy industry. *Mljekarstvo*, 64(4), 228-244. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2014.0402>
- Veloso, A., Sousa, M., Estevinho, L., & Dias, L. (2018). Honey Evaluation Using Electronic Tongues: An Overview. *Chemosensors*, 6(3), 1-25. <https://doi.org/10.3390/chemosensors6030028>

- Wadehra, A., & Patil, P. S. (2015). Application of electronic tongues in food processing. *Analytical Methods*, 8(3), 474-480. <https://doi.org/10.1039/c5ay02724a>
- Wang, W., & Liu, Y. (2019). Electronic tongue for food sensory evaluation. In *Evaluation Technologies for Food Quality* (pp. 23-36). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00003-2>
- Wei, Z., & Wang, J. (2011). Detection of antibiotic residues in bovine milk by a voltammetric electronic tongue system. *Analytica Chimica Acta*, 694(1-2), 46-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2011.02.053>
- Wei, Z., Yang, Y., Wang, J., Zhang, W., & Ren, Q. (2017). The measurement principles, working parameters and configurations of voltammetric electronic tongues and its applications for foodstuff analysis. *Journal of Food Engineering*, 217, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.005>
- Wen, Y., Liao, X., Deng, C., Liu, G., Yan, Q., Li, L., & Wang, X. (2017). Imprinted voltammetric streptomycin sensor based on a glassy carbon electrode modified with electropolymerized poly(pyrrole-3-carboxy acid) and electrochemically reduced graphene oxide. *Microchimica Acta*, 184(3), 935-941. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00604-017-2089-3>
- Winquist, F., Olsson, J., & Eriksson, M. (2011). Multicomponent analysis of drinking water by a voltammetric electronic tongue. *Analytica Chimica Acta*, 683, 192-197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2010.10.027>
- Woertz, K., Tissen, C., Kleinebudde, P., & Breitzkreutz, J. (2011). Taste sensing systems (electronic tongues) for pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 417, 256-271. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.11.028>
- Wójcik, S., & Jakubowska, M. (2021). Deep neural networks in profiling of apple juice adulteration based on voltammetric signal of the iridium quadruple-disk electrode. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 209, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104246>
- Zhang, J. X. J., & Hoshino, K. (2019). Electrical transducers: Electrochemical

sensors and semiconductor molecular sensors. En *Molecular Sensors and Nanodevices* (pp. 181-230). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814862-4.00004-1>

Zhao, X., Zhang, Q., Chen, H., Liu, G., & Bai, W. (2017). Highly Sensitive Molecularly Imprinted Sensor Based on Platinum Thin-film Microelectrode for Detection of Chloramphenicol in Food Samples. *Electroanalysis*, 29(8), 1918-1924. <https://doi.org/10.1002/elan.201700164>

Zheng, Z., Qiu, S., & Wei, Z. (2022). A Novel Voltammetric Electronic Tongue Based on Nanocomposites Modified Electrodes for the Discrimination of Red Wines from Different Geographical Origins. *Chemosensors*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080332>