



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Síntesis de nanopartículas de plata con control de morfología
y su aplicación en la detección de compuestos fenólicos por
efecto SERS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Licenciatura en Ingeniería Química

PRESENTA

Juan Carlos de la Rosa García

DIRECTORA DE TESIS

**Dra. Ma. De Lourdes Ruiz Peralta
Cuerpo Académico Ingeniería em Materiales**

CO-DIRECTORA

**Dra. Edith Corona Jiménez
Cuerpo Académico Innovación en tecnología para el desarrollo de
productos alimenticios**

MARZO 2026



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/162/2025

Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. JUAN CARLOS DE LA ROSA GARCÍA
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

"Síntesis de nanopartículas de plata con control de morfología y su aplicación en la detección de compuestos fenólicos por efecto SERS"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1
CAPÍTULO 2
CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES
METODOLOGÍA
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. María de Lourdes Ruiz Peralta.
Co-Directora de Tesis: Dra. Edith Corona Jiménez

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 23 de Septiembre de 2025

Dr. Rubén Jonathan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Directora de Tesis: Dra. María de Lourdes Ruiz Peralta.
C.c.p. Co-Directora de Tesis: Dra. Edith Corona Jiménez
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
(222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

Ricardo Valderrama Valdez
Director de la Administración Escolar
De la BUAP.
Presente

ASUNTO:
AUTORIZACIÓN
IMPRESIÓN DE TESIS

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería Química:

Juan Carlos de la Rosa García

Quién presenta como tema de registro de Tesis:

Síntesis de nanopartículas de plata con control de morfología y su aplicación en la detección de compuestos fenólicos por efecto SERS.

La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.

Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

ATENTAMENTE

“Pensar Bien, para Vivir Mejor”

H. Puebla de Z., a 04 de marzo de 2026

Dra. Ma. de Lourdes Ruiz Peralta

Directoras de Tesis

Dra. Edith Corona Jiménez



BUAP

Oficio No. FIQ/DI/147/2026

Asunto: Modalidad de Titulación por Examen Profesional por Tesis

Mtro. Juan Manuel Rosas Tapia
Director de Administración Escolar de la BUAP
Presente:

At'n: Psic. Marcela Juárez Zenteno
Jefa del Departamento de Titulación

Por este medio, me permito hacer de su conocimiento que el alumno:

Nombre completo del alumno:
Matrícula:
Sustentante de la Carrera en:
Fecha de Examen Profesional:
JURADO:

Juan Carlos de la Rosa García
201910134
Ingeniería Química
Lunes 13 de abril 2026 9:00 horas Presencial.

NOMBRE	CARGO
Dra. María Leticia Calderón Fernández	Presidente
Dr. Ernesto Chigo Anotá	Secretario
Dra. María de Lourdes Ruiz Peralta	Vocal

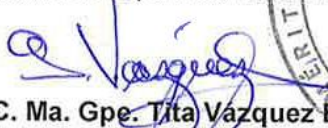
NOTA: ESTE DOCUMENTO TIENE VIGENCIA POR 6 MESES A PARTIR DE LA FECHA DE SU EXPEDICIÓN.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi atenta y distinguida consideración.

Atentamente

"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"

H. Puebla de Z., a 5 de marzo de 2026


M.I.C. Ma. Gpe. Tita Vazquez Espinosa de los Monteros
Directora



C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
(222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

DEDICATORIA

*A mis padres y a mi hermano.
A mis abuelos Damían, Adelaída,
Dionicio y Aurora † (q.e.p.d.).*

A todos mis seres queridos que siempre guardo en el
corazón.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Paulina y Salvador por brindarme los recursos necesarios, por estar a mi lado apoyándome, aconsejándome, guiándome, solo me queda dar gracias a ustedes por hacer de mí una mejor persona a través de sus enseñanzas, amor y confianza. Sin su aliento constante y su fe en mí, este momento no habría sido posible. Este logro también es de ustedes. Con todo mi amor y gratitud a ustedes.

A mi hermano Ismael por estar siempre presente, cuidándome y brindándome palabras de aliento cuando más las necesitaba. Este logro también es tuyo.

A mi asesora, **Dra. María de Lourdes Ruiz Peralta** por todo su apoyo brindado cuando más lo necesite, por cada enseñanza, consejo brindado y dedicación.

A mi **co-asesora**, la **Dra. Edith Corona Jiménez** por el tiempo y esfuerzo que dedico a compartir sus conocimientos.

A el comité de evaluación, Dr. María Leticia Calderón Fernández y Dr. Ernesto Chigo Anota, que en cada revisión sugirieron y aportaron ideas para mejorar este trabajo.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por permitirme participar en el programa Haciendo ciencia en la BUAP, y asistir al 31st International Materials Research Congress.

A todas las personas que en algún momento me dieron apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer estas palabras quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado.

“No busques ser visto, busca ser recordado por el corazón.”

- Anónimo-

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis	3
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.....	4
1.1 Materiales nanoestructurados	5
1.2 Nanopartículas	6
1.3 Nanopartículas de plata	7
1.3.1 Aplicaciones de las nanopartículas de plata.....	9
1.4 Métodos de caracterización de materiales	10
1.5 Industria del vino	12
1.5.1 Tipos de vinos y de uvas	12
1.5.1.1 Uvas blancas	13
1.5.1.2 Uvas tintas	13
1.5.1.3 Uva Sauvignon Blanc	13
1.5.1.4 Composición de la uva.....	14
1.5.2 Calidad del vino	15
1.6 Compuestos fenólicos.....	16
1.6.1 Ácidos fenólicos	16
1.6.2 Flavonoides	17
1.6.3 Taninos	18
1.7 Actividad antioxidante	19
1.9 Métodos de cuantificación de compuestos fenólicos y actividad antioxidante	20
1.10 ABTS y DPPH	21
.....	21
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	23
2.1 Síntesis por reducción química.....	24
2.2 Síntesis de nanoestrellas de plata.....	25
2.3 Fabricación de espejos de plata.....	27

2.4 Condiciones de detección de vino blanco mediante efecto SERS	28
2.5 Técnicas de caracterización de materiales	30
2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)	30
2.5.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)	30
2.5.3 Espectroscopía UV-Vis	30
2.5.4 Micro RAMAN	31
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
3.1 Difracción de rayos X (DRX)	33
3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)	37
3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)	42
3.2 Espectroscopía UV-Vis	43
3.5 Detección de compuestos fenólicos	45
CONCLUSIONES	50
ANEXOS	51
1.4.1 Difracción de rayos X (XRD)	51
1.4.2 Espectroscopia UV-visible	51
1.4.3 Micrografía electrónica de barrido (SEM)	52
1.4.4 Espectroscopía UV-Vis	53
1.4.5 Efecto SERS	55
BIBLIOGRAFIA	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Clasificación de los materiales nanoestructurados según su dimensionalidad x,y, z [3].	6
Fig.2 Diagrama de los métodos de síntesis de nanomateriales [8].	7
Fig. 3 Imágenes de microscopía electrónica de barrido de Nanopartículas de plata con morfología de flor tomadas a distintas magnificaciones [12].	9
Fig. 4 Morfología de la uva Sauvignon Blanc [23]	14
Fig. 5 Ácidos Hidroxibenzoicos [27].	17
Fig. 6 Ácidos hidroxicinámicos [27].	17
Fig. 7 Estructura básica de un flavonoide [27].	18
Fig. 8 Acutissimina A (ejemplo de un tanino complejo) [27].	18
Fig. 9 Actividad antioxidante de algunos alimentos conocidos [29].	20
Fig. 10 Mecanismo de reacción del método FC [32].	21
Fig. 12 Principio del ensayo de capacidad antioxidante mediante ABTS [34].	22
Fig. 13 Esquema representativo de la síntesis por reducción química.	24
Fig. 14 Métodos de síntesis de nanomateriales [39].	25
Fig. 15 Imagen representativa de la síntesis de nanopartículas de plata a) Matraz, sistema de reflujo y bomba de recirculación, b) solución de nitrato de plata y c) formación de las nanopartículas.	26
Fig. 16 Imagen ilustrativa de la síntesis de Ag NP's a) Retiro del excedente de solvente, b) lavados de etanol, c) secado de muestra en la parrilla y b) Muestra en polvo de las nanopartículas de plata.	27
Fig. 17 a) Mezcla de hexano y acetato de etilo, b) Precipitación de las nanopartículas de plata, c) Espejo de plata ya formado y d) Espejo de plata recuperado y colocado en borosilicato recubierto con aluminio.	28
Fig. 18 Imagen de los pasos para la detección de vino blanco a) soportes preparados a diferentes condiciones, b) Detección de vino blanco en el equipo de Micro Raman, c) Ejemplo de espectro micro Raman obtenido.	29
Fig. 19 Patrones de difracción de rayos-X de las muestras a) M1 y b) M2 obtenidas con diferente concentración de precursor de plata.	34
Fig. 20 a) Imágenes típicas SEM para la muestra M1 e b) histograma de distribución de tamaño, con un tamaño de partícula promedio de 847 nm.	38
Fig. 21 a) Imágenes típicas SEM para la muestra M2 e b) histograma de distribución de tamaño, con un tamaño de partícula promedio de 954 nm.	38
Fig. 22 Mecanismo de nucleación y crecimiento de las nanopartículas de plata.	40

Fig. 23 a) Imágenes típicas SEM y b) histograma de distribución de tamaño del espejo de AgNP's, con un tamaño de partícula promedio entre 900 nm.	42
Fig. 24 a) Imágenes típicas SEM y espectros de EDS característicos de las muestras M1.	43
Fig. 25 b) Imágenes típicas SEM y espectros de EDS característicos de las muestras M2.	43
Fig. 26 a) Espectro UV-VIS de absorbancia de la muestra M1 sintetizada a baja concentración de precursor de plata AgNO_3	44
Fig. 27 b) Espectro UV-VIS de absorbancia de la muestra M2 sintetizada a una más alta concentración de precursor de plata AgNO_3	45
Fig. 28. Espectro Raman de la Rodamina B a) soportada en el sustrato de aluminio y b) espectro Raman de la RhB soportada sobre el espejo de plata.	46
Fig. 29. Espectro Raman del vino Sauvignon Blac, a) soportado sobre el sustrato de aluminio, b) in situ y b) con espejos de plata.	47
Fig. 30 Efecto de la interacción de rayos X con un material cristalino [71]	51
Fig. 31 Fundamento de Espectroscopia UV-visible. [73].....	52
Fig. 32 Fundamento de Espectroscopia UV-visible. [76].....	53
Fig. 33 Principio de funcionamiento de un espectro UV-visible. [78].....	54
Fig. 34 Principio Raman [81].....	55
Fig. 35 Ilustración esquemática del mecanismo de SERS [82].	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.4 Técnicas de caracterización de las propiedades de los nanomateriales	11
Tabla 3.2. Parámetros correspondientes a la reflexión (111) y tamaño de cristalito para las muestras (M1, M2).....	36
Tabla 3.3. Asignación y relación entre grupo funcional y atributo sensorial del vino Sauvignon Blanc.	48

INTRODUCCIÓN

La detección de moléculas ha cobrado importancia en la actualidad y esto se debe a los diversos campos de aplicación como lo es la medicina, la industria, el medioambiente, entre otras. La facilidad de poder identificar y cuantificar moléculas en concentraciones bajas o bien en muestras complejas, se ha vuelto esencial, por ejemplo, en la detección de enfermedades, contaminantes ambientales, en la mejora de productos o materiales en la industria. Se han desarrollado diferentes métodos de detección, como la espectrofotometría UV-VIS, cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), cromatografía de gases, espectrometría de masas, espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR), entre otros, cada uno con ventajas y limitaciones en cuanto a la detección, sensibilidad, capacidad de diferenciar una molécula con respecto a otra, pero sobre todo su rapidez y costo [1].

La identificación de moléculas enfrenta nuevas necesidades, ya que se requieren dispositivos portátiles en algunas áreas, métodos de bajo costo, detección rápida, etc., y estos desafíos han incentivado a la investigación para desarrollar soluciones innovadoras. Conforme la ciencia avanza, se han fabricado dispositivos miniaturizados, pero la mayoría de las investigaciones se centran en el desarrollo de sistemas de detección “*in situ*”, los cuales, buscan mejorar la rapidez para hacer los análisis moleculares más accesibles y eficientes. Por lo que, se siguen desarrollando innovaciones en el diseño de materiales que permitan aumentar la sensibilidad, especificidad y accesibilidad [2].

Con el objetivo de superar las limitaciones de las técnicas espectroscópicas convencionales, se ha desarrollado la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS, por sus siglas en inglés *Surface-Enhanced Raman Spectroscopy*), una herramienta analítica que combina los principios de la espectroscopía Raman con los avances de la nanotecnología. Esta técnica

amplifica notablemente la señal Raman de moléculas adsorbidas sobre superficies metálicas nanoestructuradas —principalmente de oro o plata—, lo que permite alcanzar niveles de sensibilidad y selectividad muy superiores a los de los métodos tradicionales.

En el ámbito de la industria vinícola, esta capacidad adquiere especial relevancia, ya que la identificación precisa de compuestos como los fenólicos, pigmentos y otros metabolitos secundarios resulta esencial para evaluar la calidad, autenticidad y estabilidad del vino. Estos compuestos determinan propiedades sensoriales clave —como el color, el aroma y el sabor—, por lo que su detección y caracterización mediante SERS permitiría optimizar los procesos de vinificación y fortalecer el control de calidad en todas las etapas de producción. En consecuencia, la aplicación del SERS no solo impulsaría la innovación analítica en el sector, sino que también contribuiría al desarrollo de vinos con perfiles químicos y organolépticos más consistentes, distintivos y competitivos en el mercado global.

En este sentido, en el presente trabajo se planteó el método de síntesis de nanopartículas de plata, mediante la reducción química de AgNO_3 utilizando dos diferentes concentraciones y controlando su morfología para la obtención de estrellas, para posteriormente, mediante el efecto SERS, aplicarlas en la detección cualitativa de compuestos fenólicos presentes en el vino blanco de uva Sauvignon Blanc, de denominación chilena.

Para ello se sintetizaron dos muestras a dos concentraciones diferentes de precursor (AgNO_3), las cuales se les denominó como M1 (8.49 mg de AgNO_3) a la de menor concentración y M2 (33.974 mg de AgNO_3) a la de mayor concentración. Se obtuvieron tamaños de partículas de 800 nm para la muestra M1 y de 900 nm para la muestra M2, y un tamaño de cristalito de 25.7 nm para la muestra M1 y de 29.1 nm para la muestra M2. Así, los resultados obtenidos a partir de los espectros de absorbancia mostraron bandas a 367 nm para M1 y a 375 nm para M2. Se confirmó el crecimiento de las nanopartículas con la morfología de estrellas en las dos muestras sintetizadas, posteriormente se fabricó un espejo de plata y se observó el aglomeramiento de las nanopartículas, para posteriormente realizar la

detección de compuestos fenólicos en el vino blanco soportado sobre los espejos, los resultados más sobresalientes fueron la detección de taninos, ácido gálico, catequina, ácido málico, ácido tartico y ácido succínico por mencionar algunos compuestos detectados en el vino blanco de uva Sauvignon Blanc, marca 120 de denominación Chilena del año 2022 .

Objetivo general

Sintetizar nanopartículas de plata por el método de reducción química con control en la morfología y aplicarlas en la detección cualitativa de compuestos fenólicos en el vino blanco de uva Sauvignon Blanc, marca 120 de denominación chilena.

Objetivos específicos

1. Sintetizar las nanopartículas de plata por el método de reducción química.
2. Caracterizar las nanopartículas metálicas mediante las técnicas de DRX (Difracción de rayos-X), SEM (microscopía electrónica de barrido, por sus siglas en inglés) y espectroscopía UV-VIS.
3. Detectar cualitativamente los compuestos fenólicos en el vino mediante la técnica Raman y el efecto SERS.

Hipótesis

Es posible la detección cualitativa de compuestos fenólicos en vino blanco (uva Sauvignon Blanc, marca 120 de denominación chilena) mediante el efecto SERS, aplicando nanopartículas de plata.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

Este capítulo explica de forma general el concepto de material nanoestructurado, sus principales características, clasificación y se mencionan algunas de sus aplicaciones. Las nanopartículas metálicas juegan un papel muy importante ya permiten detectar compuestos de interés en muchas industrias, tal es el caso de la industria vinícola. Se describe de manera general las características del tipo de uva utilizada para la producción de vino blanco Sauvignon blanc.

*La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando." -
Pablo Picasso*

1.1 Materiales nanoestructurados

Los materiales con una microestructura de tamaño nanométrico se denominan “Materiales nanoestructurados” (Nanostructured Materials), estos exhiben propiedades únicas y mejoradas en comparación con sus contrapartes macroscópicas, incluyendo mayor resistencia, dureza, conductividad. Para que sean considerados como Nanostructured Materials (NsM) al menos una de sus dimensiones debe estar en la escala nanométrica; estas incluyen nanopartículas que se clasifican según sus dimensiones [1-2]:

- 0 D (cero dimensiones) donde los parámetros de longitud, altura y anchura están fijos en un único punto, por ejemplo, en un punto cuántico [2].
- 1D (una dimensión): Donde solo existe un parámetro, por ejemplo, el grafeno. Las nanoestructuras 1D tienen electrones que pueden moverse a lo largo del eje (x) [2].
- 2D (dos dimensiones): Donde existen los parámetros de longitud y anchura, por ejemplo, los nanotubos de carbono. Las nanoestructuras 2D tienen electrones que pueden moverse a lo largo del eje (x, y) [2].
- 3D (tres dimensiones): Donde existen los tres parámetros, por ejemplo, nanopartículas (NPs) de Pd y ZnO. Las nanoestructuras 3D tienen electrones que pueden moverse a lo largo del eje (x, y, z) [2].

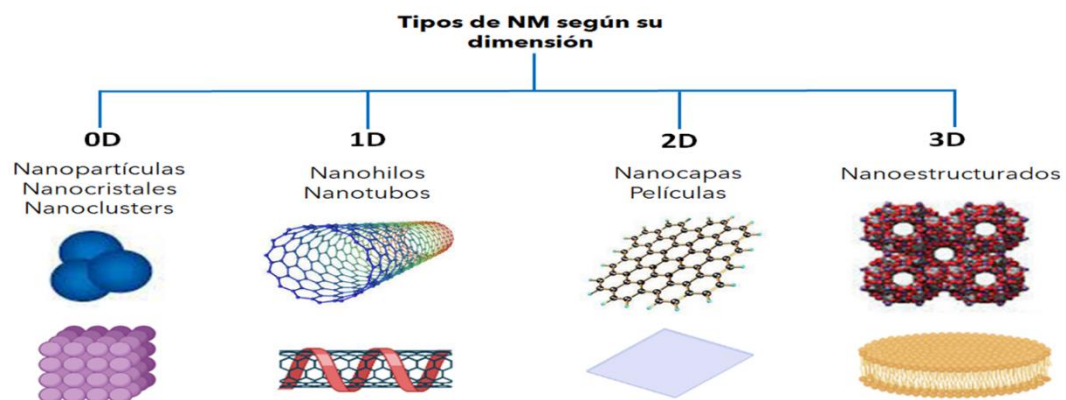


Fig. 1 Clasificación de los materiales nanoestructurados según su dimensionalidad x,y, z [3].

1.2 Nanopartículas

Las nanopartículas pueden estar constituidas por, metal, óxidos metálicos u otras sustancias orgánicas [4], es decir, se refieren a partículas de tamaño muy pequeño, a escala nanométrica; las nanopartículas exhiben propiedades físicas, químicas y biológicas únicas en comparación con sus respectivas partículas a mayor escala (bulto). Este fenómeno se debe a una relación superficie-volumen relativamente mayor, una mayor reactividad o estabilidad en un proceso químico, una resistencia mecánica mejorada, entre otros factores [5]. Estas propiedades de las nanopartículas han llevado a su uso en diversas aplicaciones.

Existen diversos reportes de los métodos de síntesis que buscan mejorar las propiedades y/o reducir los costos de producción de las nanopartículas. Algunos métodos se modifican para lograr nanopartículas con una morfología específica o para modificar alguna propiedad óptica, mecánica, física o química [6].

Las nanopartículas se sintetizan a partir de metales a tamaños nanométricos mediante métodos físicos o químicos y constituyen un grupo clave de nanomateriales ampliamente investigados en diversas áreas científicas e industriales. Los metales más utilizados para la síntesis de nanopartículas son el aluminio (Al), el cadmio (Cd), el cobalto (Co), el cobre (Cu), el oro (Au), el hierro (Fe), el plomo (Pb), la plata (Ag) y el zinc (Zn). Las nanopartículas pueden ser sintetizadas mediante dos enfoques principales (figura 2), método *top-down*, en este enfoque, los materiales más grandes se dividen o se reducen a escala nanométrica, técnicas como la molienda, la litografía o el grabado son ejemplos de este enfoque y el método *bottom-up* implica la construcción de nanopartículas a partir de átomos o moléculas individuales, métodos como la deposición de vapor, la síntesis química en solución o la autoensamblaje son ejemplos de este enfoque, este método tiende a producir nanopartículas con mayor control sobre sus propiedades [7]. Su estructura puede ser cristalina o amorfa, con diversas

formas geométricas, como esféricas o cilíndricas. También poseen una reactividad y sensibilidad particulares a factores ambientales como el aire, la humedad, el calor y la luz solar, lo cual puede influir en su color y comportamiento.

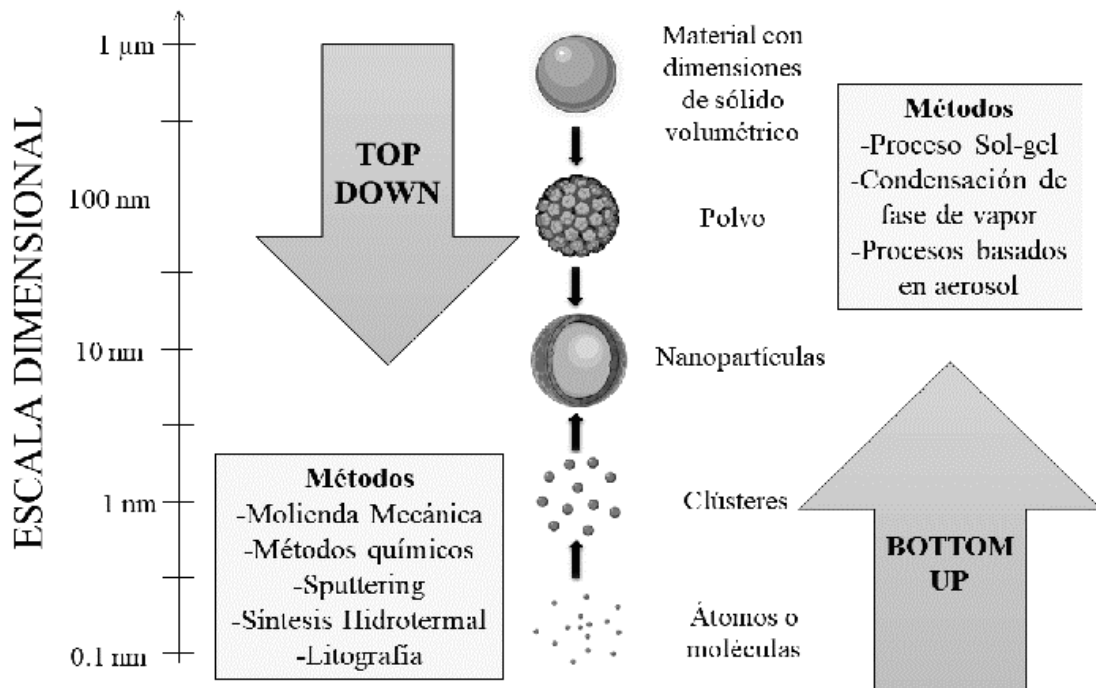


Fig.2 Diagrama de los métodos de síntesis de nanomateriales [8].

1.3 Nanopartículas de plata

Las nanopartículas de plata (AgNPs), tienen un tamaño en el rango de 1 a 100 nanómetros (nm) en al menos una de sus dimensiones. Se usan en diversas aplicaciones, debido a sus características entre las propiedades características de la plata nanométrica, estas propiedades son el resultado de su alta relación superficie-volumen y los efectos cuánticos que predominan a nanoescala, estas poseen propiedades ópticas debido a la resonancia plasmónica de superficie

(conocida por sus siglas en inglés: SPR, surface plasmon resonance), el fenómeno de SPR ocurre porque los electrones en la superficie de una nanopartícula metálica oscilan al interactuar con una onda electromagnética y se induce un momento dipolar sobre la partícula en un intervalo de tiempo [9].

Las nanopartículas de plata muestran propiedades únicas como una excelente conductividad, estabilidad química y actividad catalítica, entre otras, las cuales dependen del tamaño de la partícula, la distribución del tamaño y la forma, las propiedades intrínsecas de las nanopartículas metálicas están determinadas principalmente por su tamaño, forma, composición, cristalinidad y estructura, cualquiera de estos parámetros podría controlarse para ajustar con precisión las propiedades de las nanopartículas metálicas [10].

Los métodos de síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) son cruciales, ya que influyen directamente en sus propiedades fisicoquímicas finales, como el tamaño, la forma, la distribución de tamaño, la cristalinidad y la pureza. La variación de parámetros como el agente reductor, la concentración de los reactivos, el pH y la temperatura permite controlar el crecimiento y la estabilidad de las nanopartículas. Los métodos químicos son ampliamente utilizados por su simplicidad y reproducibilidad; sin embargo, un control inadecuado puede afectar sus características estructurales de manera significativa, como sus propiedades ópticas, particularmente la resonancia de plasmones superficiales. [11].

Existen diversos reportes de la síntesis de nanopartículas de plata, por ejemplo, Liu T. et. al. [12] sintetizaron nanopartículas de Ag en forma de flor, con picos que salen de un núcleo. Sus resultados muestran que es posible sintetizar nanopartículas de plata con un control morfológico, como se muestran en la figura 3 estas se presentan en un núcleo plateado y muchas puntas en forma de varilla.

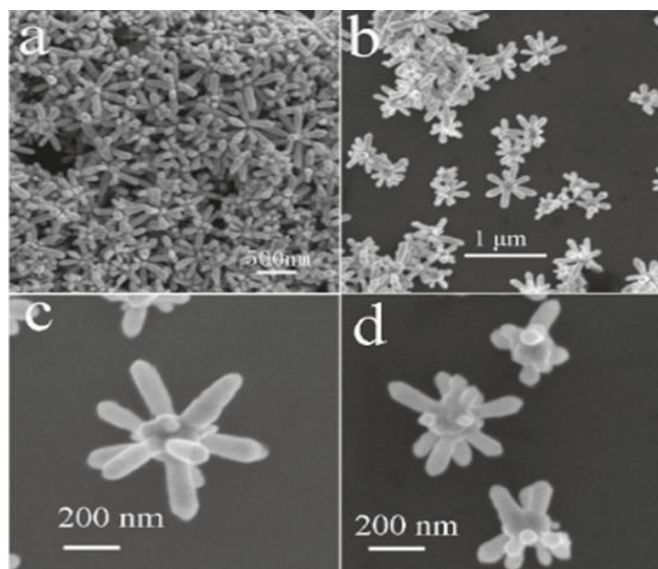


Fig. 3 Imágenes de microscopía electrónica de barrido de Nanopartículas de plata con morfología de flor tomadas a distintas magnificaciones [12].

1.3.1 Aplicaciones de las nanopartículas de plata

En la actualidad, las nanopartículas (NPs) se utilizan en diferentes campos como textiles, cosméticos, productos farmacéuticos, ingeniería, biología y medicina [13].

En la industria alimentaria, al igual que en otros sectores, la nanotecnología está desempeñando un papel crucial para resolver problemas mediante soluciones innovadoras relacionadas con la seguridad alimentaria, el procesamiento de alimento, el envasado de alimentos, la aplicación de nanotecnología al envasado de alimentos ha recibido mayor atención y esto debido a que permite mejorar la calidad y seguridad de los productos alimenticios [14].

En cuanto al procesamiento de alimentos, la nanotecnología se emplea para mejorar el sabor, el color, la textura y la calidad nutricional, por ejemplo, se usan nanocápsulas para aumentar la biodisponibilidad de nutraceuticos; la nanoencapsulación de sabores se emplea para mejorar el gusto de alimentos, y los nanotubos y nanopartículas pueden usarse como agentes gelificantes y viscosificantes, también se emplean nanopartículas para mejorar la disponibilidad y dispersión de nutrientes, cabe mencionar que la mayoría de las

aplicaciones de nanotecnología relacionadas con el sector alimentario se encuentran en fase de investigación y desarrollo [14].

Por otra parte, se sabe que la aplicación de las nanopartículas de plata para la detección de compuestos e imagen mediante el efecto SERS (SERS, por sus siglas en inglés *Surface-Enhanced Raman Spectroscopy*) es un sector de investigación altamente activo, en donde cientos de artículos se publican cada año, tanto en aspectos fundamentales como en aplicaciones. SERS ha alcanzado su potencial en la detección ultrasensible apoyándose de las nanopartículas, pudiendo detectar una amplia variedad de compuestos, que van desde contaminantes químicos hasta biomoléculas, con umbrales de detección tan bajos como una sola molécula, y la ventaja añadida para proporcionar información estructural sobre la molécula objetivo [15].

de Almeida et al., (2019) [16] estudiaron la espectroscopia Raman mejorada en superficies (SERS) usando nanopartículas de plata. Sus resultados muestran que es posible determinar las huellas dactilares del vino mediante efecto SERS, y las nanopartículas de plata (AgNP's). Las señales del efecto SERS se forman cuando hay un fenómeno de transferencia de carga. Esta amplificación se debe principalmente a la interacción electromagnética entre la luz y la superficie del metal, lo que produce resonancias plasmónicas que crean un campo de luz muy localizado, lo que permite que sea posible aplicar a las nanopartículas en diferentes áreas.

1.4 Métodos de caracterización de materiales

La nanotecnología es un área multidisciplinaria que se encuentra en desarrollo todo el tiempo. Cuando se sintetiza un nanomaterial o se descubre una nanoestructura natural, es necesario realizar su caracterización, para ello hay técnicas específicas para determinar la estructura de un material (tabla 1.4), composición química, morfología, propiedades ópticas, mecánicas, y cada una

de estas da información importante del material, para posteriormente dar una aplicación [17,18].

La Información acerca del tamaño y la forma del material por ejemplo se puede obtener mediante microscopía electrónica de transmisión, microscopía electrónica de barrido, microscopía de fuerza atómica, incluso difracción de rayos X. Las propiedades ópticas pueden ser analizadas mediante espectroscopía UV visible o por espectroscopía Raman y las propiedades térmicas se pueden estudiar por análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido, entre otras [17].

Tabla 1.4 Técnicas de caracterización de las propiedades de los nanomateriales

Propiedad caracterizada	Técnicas
Tamaño	Microscopía electrónica de transmisión, Microscopía electrónica de barrido, Difracción de rayos X, Microscopía de fuerza atómica, UV-vis, Resonancia magnética nuclear, Dispersión dinámica de la luz
Composición química	Difracción de rayos X, Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X, Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, Microscopía de barrido electrónica acoplada a rayos X de energía dispersiva, Resonancia magnética nuclear
Estructura cristalina	Difracción de rayos X, Microscopía electrónica de transmisión de alta resolución
Concentración	UV-vis, Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, Resonancia magnética nuclear, Sedimentación centrífuga diferencia
Propiedades ópticas	UV-vis, Espectroscopia de fotoluminiscencia

1.5 Industria del vino

La industria vinícola es uno de los sectores más antiguos e influyentes del mercado de bebidas. El mercado vinícola mundial es una industria multimillonaria, con una producción de vino estimada en 290 millones de hectolitros anuales. Según informes recientes, el tamaño del mercado mundial del vino se valoró en unos 324.000 millones de dólares en 2020 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 4,3% de 2021 a 2028 [19].

El vino se produce en varias regiones del mundo, y cada región aporta características únicas a la oferta mundial de vino. Los países productores de vino más grandes incluyen [19]:

- Italia: El mayor productor mundial de vino, conocido por su rica historia y diversos estilos de vino.
- Francia: Hogar de algunas de las regiones vinícolas más prestigiosas, incluyendo Burdeos, Borgoña y Champagne.
- España: Un productor de primer nivel centrado en los estilos vinícolas tradicionales y modernos, incluyendo Rioja y Cava.
- Estados Unidos: Principalmente conocido por Napa Valley, California, un importante productor de vinos de alta calidad.
- Argentina y Chile: Principales productores de Sudamérica, conocidos por sus vinos Malbec y Cabernet Sauvignon.

1.5.1 Tipos de vinos y de uvas

La variedad de uva es muy importante para entender un vino. En países anglosajones y países productores del nuevo mundo, las variedades de uva se consideran el factor más importante para diferenciar un vino [20].

1.5.1.1 Uvas blancas

Las uvas blancas se utilizan para hacer vinos blancos, rosados y espumosos.

Algunas de las variedades de uva blanca más populares son [21]:

- Chardonnay: una uva blanca versátil que se puede usar para hacer una variedad de vinos, desde secos hasta dulces.
- Sauvignon Blanc: una uva blanca con sabores a cítricos y hierbas.
- Riesling: una uva blanca con sabores a frutas tropicales y flores.
- Viognier: una uva blanca con sabores a flores y miel.
- Semillon: una uva blanca con sabores a manzana y pera.

1.5.1.2 Uvas tintas

Las uvas tintas se utilizan para hacer vinos tintos, rosados y espumosos.

Algunas de las variedades de uva tinta más populares son [21]:

- Cabernet Sauvignon: una uva tinta con sabores a frutos rojos y especias.
- Merlot: una uva tinta con sabores a frutos negros y chocolate.
- Pinot Noir: una uva tinta con sabores a fresa y frambuesa.
- Syrah: una uva tinta con sabores a frutos negros y especias.
- Malbec: una uva tinta con sabores a frutos negros y tabaco.

1.5.1.3 Uva Sauvignon Blanc

La Sauvignon Blanc viene principalmente del Valle del Loira (Francia), Burdeos (Francia), Marlborough (Nueva Zelanda), California (Estados Unidos) y Casablanca (Chile). El tipo de uva Sauvignon Blanc suele formar racimos pequeños a medianos. La forma de las uvas es cónica y estas son, a su vez, también de tamaño pequeño o medio. Las bayas de Sauvignon Blanc son pequeñas, de forma ovalada, su piel es de color verde-amarillento y se vuelve más dorada conforme alcanza la madurez, su pulpa es jugosa, incolora y contiene entre dos y tres semillas por baya, aunque el sabor de la pulpa es relativamente neutro, las bayas poseen precursores aromáticos, que, mediante la vinificación, dan lugar a los característicos aromas [22].

La uva Sauvignon Blanc brota pronto, pero tarda mucho en madurar, por eso tiene buena aceptación en climas templados, con mucho sol, pero no excesivo calor. Los Sauvignon Blanc son vinos ácidos y elegantes, con aromas a hierbas y productos de la tierra. Es un vino seco y robusto, lleno de matices frutales y herbáceos.

1.5.1.4 Composición de la uva

La uva está compuesta por tres tipos de tejidos, que corresponden a la piel, pulpa y semillas (figura 4). La composición de cada uno de estos tejidos puede variar al cambiar el tamaño de la uva, por la relación superficie/volumen. En relación con la piel, está formada por 6 a 7 capas de células con paredes gruesas, la cual es recubierta por una capa cerosa denominada cutícula, que le otorga protección a la uva. Un segundo tejido corresponde a la pulpa, la cual ocupa un volumen cercano al 60% del total de la uva. Este tejido se caracteriza por poseer células con grandes vacuolas, las cuales contienen el jugo celular. Un último tejido son las semillas que se localizan en el centro, y que contienen el embrión que permitirá perpetuar la especie [22].

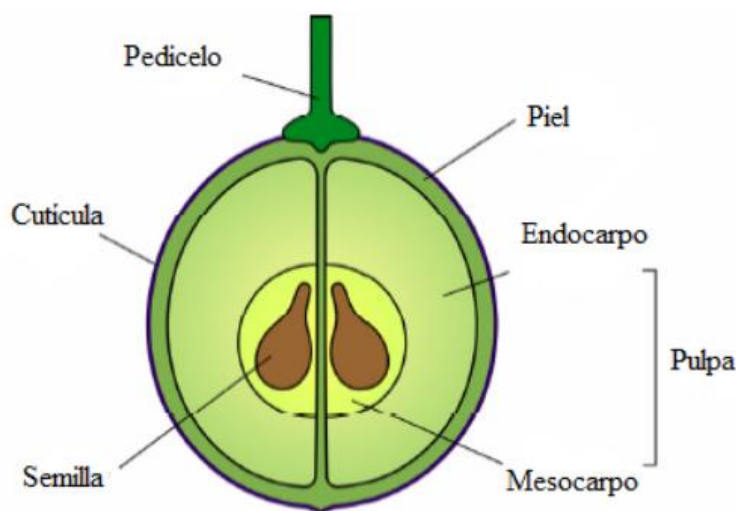


Fig. 4 Morfología de la uva Sauvignon Blanc [23]

La uva se encuentra compuesta principalmente por:

Azúcares: son compuestos químicos que (contienen 6 átomos de carbono), y se encuentran esencialmente representados por la glucosa y la fructosa. Estos

azúcares son ocupados por las levaduras durante la fermentación alcohólica, obteniéndose etanol y dióxido de carbono [24].

En la uva también existe la presencia de pentosas tales como la xilosa y la arabinosa, pero estos azúcares no son fermentables por las levaduras vínicas.

Ácidos orgánicos: estos compuestos tienen un efecto favorable en la fermentación, dan color, gusto y envejecimiento del vino y estabilidad tartárica y pH. Los ácidos más importantes son el tartárico, el málico y en menor cantidad el cítrico. En general durante la maduración de la uva, los ácidos disminuyen, pudiendo encontrarse en forma libre. La disminución se debe a la respiración de estos o a su transformación en azúcares [24].

Compuestos fenólicos: corresponde a un grupo de compuestos que son estructuralmente diversos y presentes en diferentes cantidades. Ellos juegan un papel importante en la determinación del color, astringencia y amargor del vino. También se encuentran involucrados en las reacciones de pardeamiento de las uvas y en el vino tienen un rol clave en el envejecimiento y maduración [24].

1.5.2 Calidad del vino

El sabor y calidad del vino está influenciado por una variedad de factores, incluyendo la variedad de uva, el clima, el suelo y el método de elaboración. El clima es uno de los factores más importantes que afectan el sabor del vino. Las diferentes variedades de uva se desarrollan mejor en diferentes climas. Por ejemplo, la Cabernet Sauvignon se desarrolla mejor en climas cálidos y secos, mientras que la Pinot Noir se desarrolla mejor en climas fríos y húmedos.

El suelo también afecta el sabor del vino. Las diferentes variedades de uva prefieren diferentes tipos de suelo. Por ejemplo, la Cabernet Sauvignon prefiere suelos ricos en minerales, mientras que la Pinot Noir prefiere suelos ligeros y arenosos.

El método de elaboración también afecta el sabor del vino. El proceso de elaboración del vino incluye una variedad de pasos, como la fermentación, la

crianza y el embotellado. El método de elaboración puede afectar el sabor del vino de una variedad de maneras, como la duración de la fermentación, la temperatura de la fermentación y el uso de barricas [22].

1.6 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos, son moléculas caracterizadas por la presencia de uno o más anillos aromáticos con grupos hidroxilo unidos a su estructura. Se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, especialmente en las plantas, donde pueden localizarse en diferentes partes como tallos, raíces, flores, frutos y semillas, su papel es fundamental en diversos procesos, incluyendo el metabolismo, el crecimiento, la reproducción y la defensa contra agentes patógenos como virus, bacterias, hongos, protozoarios y nematodos. Además, protegen a las plantas de depredadores como insectos y herbívoros, así como de factores ambientales adversos, como el estrés y la radiación ultravioleta. Estos compuestos también son responsables de la pigmentación en muchas especies vegetales [25].

En la industria del vino, la presencia de polifenoles se debe a la uva. La cantidad de polifenoles está determinada por muchos factores que pueden ser ambientales, tales como el clima o las condiciones del suelo, o estar relacionados con la variedad y madurez del fruto [26]. Los polifenoles de la uva no están distribuidos homogéneamente en el fruto si no que se concentran principalmente en las semillas (60%), la piel (30%), y en un menor grado en la pulpa y tallos (menos de 10%) [26]. Los compuestos fenólicos presentes en el producto y su porcentaje proporcionan al vino ciertas características sensoriales como: aroma, color, sabor, amargura o astringencia.

1.6.1 Ácidos fenólicos

La denominación ácido fenólico se aplica a todos los compuestos orgánicos que poseen como mínimo una función carboxílica y un hidroxilo fenólico, en este mismo

compuesto fenólico pueden estar presentes el ácido protocatéquico, ácido vanílico y ácido gálico [26].

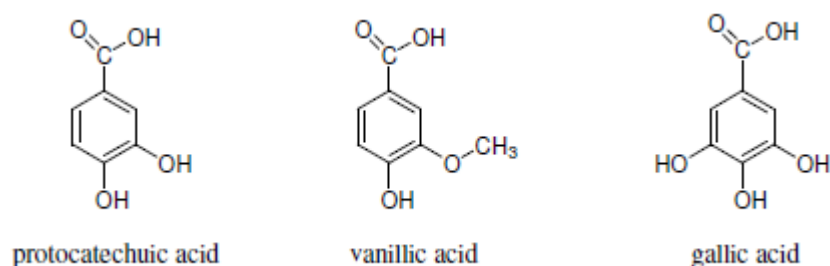


Fig. 5 Ácidos Hidroxibenzoícos [27].

Ácidos hidroxicinámicos se caracterizan por la presencia del grupo $\text{CH} = \text{CH} - \text{COOH}$ en remplazo del grupo COOH presente en los ácidos hidroxibenzoico. Ejemplos de fuentes de ácido hidroxicinámicos en los alimentos son las uvas, manzanas, arándanos, espinacas, brócoli, col rizada, el café y los cereales [27].

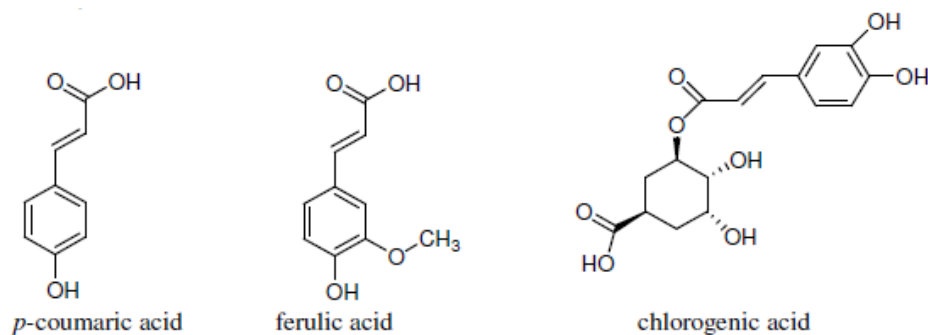


Fig. 6 Ácidos hidroxicinámicos [27].

1.6.2 Flavonoides

Los flavonoides son un grupo de pigmentos casi universales en el reino vegetal, son hidrosolubles y los responsables de la coloración de flores, frutos e incluso de las hojas. Se trata de un grupo de gran diversidad y complejidad química. Dentro del cual, en el caso específico de la uva y el vino, merecen mención especial los flavonoles por su abundancia [26].

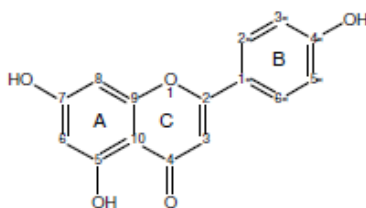


Fig. 7 Estructura básica de un flavonoide [27].

1.6.3 Taninos

Los taninos son compuestos polifenólicos que muestran propiedades astringentes las cuales participan en el proceso de precipitación de proteínas, la concentración de estos disminuye durante el envejecimiento del vino debido a procesos de oxidación y precipitación.

Los taninos complejos contienen unidades de catequina vinculados a galotaninos o elagitaninos, y se ha comprobado que los productos del añejamiento en el vino tinto se deben a la reacción entre catequinas de las uvas y galotaninos en los barriles de roble formando estos taninos complejos [27].

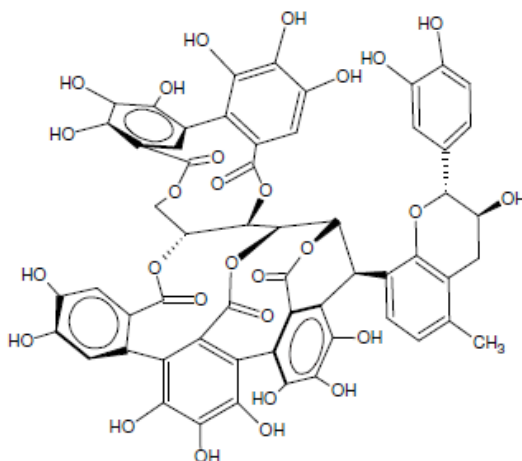


Fig. 8 Acutissimina A (ejemplo de un tanino complejo) [27].

La detención cualitativa de estos compuestos es fundamental para tener un mejor control de calidad de los vinos, dado que estos compuestos son principalmente responsables de las características sensoriales del mismo (color, sabor,

astringencia y amargura) y juegan un papel esencial en el proceso de envejecimiento del vino debido a sus propiedades de oxidación [26].

1.7 Actividad antioxidante

Un antioxidante es una sustancia capaz de neutralizar la acción oxidante de los radicales mediante la liberación de electrones al medio u otro mecanismo. Generalmente, los antioxidantes son moléculas pequeñas de origen endógeno y/o exógeno. Los endógenos son aquellos que a causa de la exposición a los radicales libres se desarrollan dentro del organismo, tal es el caso de la remoción a través de la catálisis de radicales por diferentes enzimas como la catalasa y superóxido dismutasa (sistema de defensa enzimático), mientras que los exógenos provienen de los alimentos que se ingieren como la vitamina E, vitamina C y carotenoides. Otro grupo de moléculas importantes que pueden obtenerse de manera exógena son los compuestos fenólicos (isoflavonas, flavonoides, quercetina, etc.). Por esta razón, la forma más eficiente de suplir los antioxidantes para proteger al organismo del efecto oxidativo producido por los radicales libres, es el consumo de alimentos ricos en estos, que permitan amortiguar los efectos causados al daño celular [28].

Las frutas son conocidas como alimentos ricos en antioxidantes, existen un gran número de estudios que muestran los contenidos de compuestos antioxidantes, pero la mayor parte de investigaciones se centra el fruto de regiones templadas, estos debido a su composición química aportan considerablemente a la actividad antioxidante [28].

ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LOS ALIMENTOS MÁS CONOCIDOS ^{2,3}

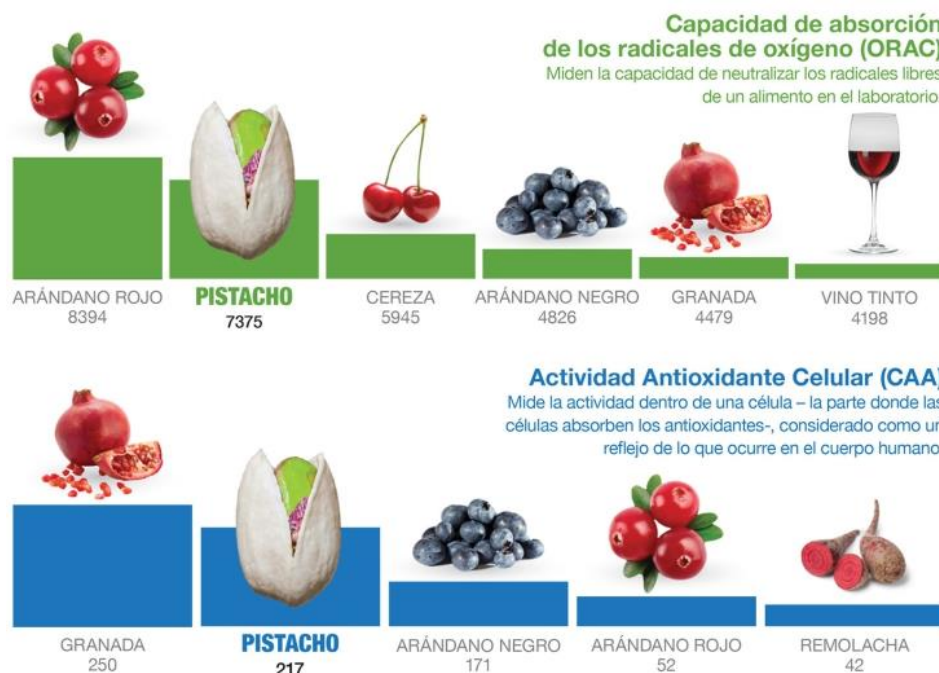


Fig. 9 Actividad antioxidante de algunos alimentos conocidos [29].

1.9 Métodos de cuantificación de compuestos fenólicos y actividad antioxidante

Los compuestos fenólicos o polifenoles constituyen un amplio grupo de sustancias químicas, con diferentes estructuras y propiedades químicas y actividad biológica, englobando más de 8000 compuestos distintos. Químicamente, los compuestos fenólicos son sustancias que poseen un anillo aromático, con uno o más grupos hidróxidos.

El método más usado comúnmente para determinar y cuantificar fenoles totales en alimentos y vegetales es el método Folin-Ciocalteu.

Este método se basa en la capacidad de los fenoles para reaccionar con agentes oxidantes. El reactivo de Folin-Ciocalteu contiene molibdato y tungstato sódico,

que reaccionan con cualquier tipo de fenol, formando complejos fosfomolibdico-fosfotúngstico. La transferencia de electrones a pH básico reduce los complejos fosfomolibdico-fosfotúngstico en óxidos, cromógenos de color azul intenso, de tungsteno (W_8O_{23}) y molibdeno (Mo_8O_{23}), siendo proporcional este color al número de grupos hidroxilo de la molécula [30-31].

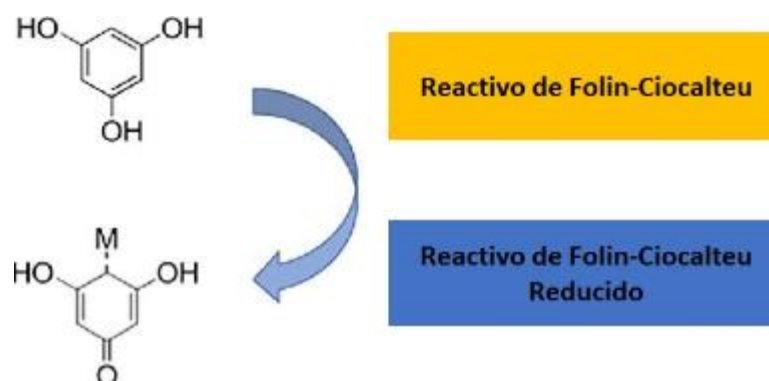


Fig. 10 Mecanismo de reacción del método FC [32].

Esta reacción es una oxidorreducción, por lo que además se puede considerar como un método de medida de la actividad antioxidante. La velocidad depende del pH, siendo la reacción lenta a pH ácido y rápida a pH básico [32].

1.10 ABTS y DPPH

En los últimos años, se ha adoptado una amplia gama de ensayos espectrofotométricos para medir la capacidad antioxidante de los alimentos, siendo los más populares el ensayo de ácido 2,2'-azino-bis-3-etilbenztiazolina-6-sulfónico (ABTS) y 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH).

La mayoría de los ensayos emplean el mismo principio: se genera un radical sintético coloreado o un compuesto redox-activo; y la capacidad de una muestra biológica para eliminar el radical o reducir el compuesto redox-activo se monitorea mediante espectrofotómetro, aplicando un estándar apropiado para cuantificar la capacidad antioxidante.

En la especificación, el ensayo ABTS se basa en la generación de un ABTS.+ azul/verde que puede ser reducido por antioxidantes; mientras que el ensayo DPPH se basa en la reducción del DPPH púrpura a 1,1-difenil-2-picrilhidrazil. Ambos ensayos son convenientes en su aplicación y por lo tanto los más populares; sin embargo, son limitados ya que utilizan radicales no fisiológicos [33].



Fig. 11 Método DPPH (cambio de color después del contacto con antioxidantes) [34].

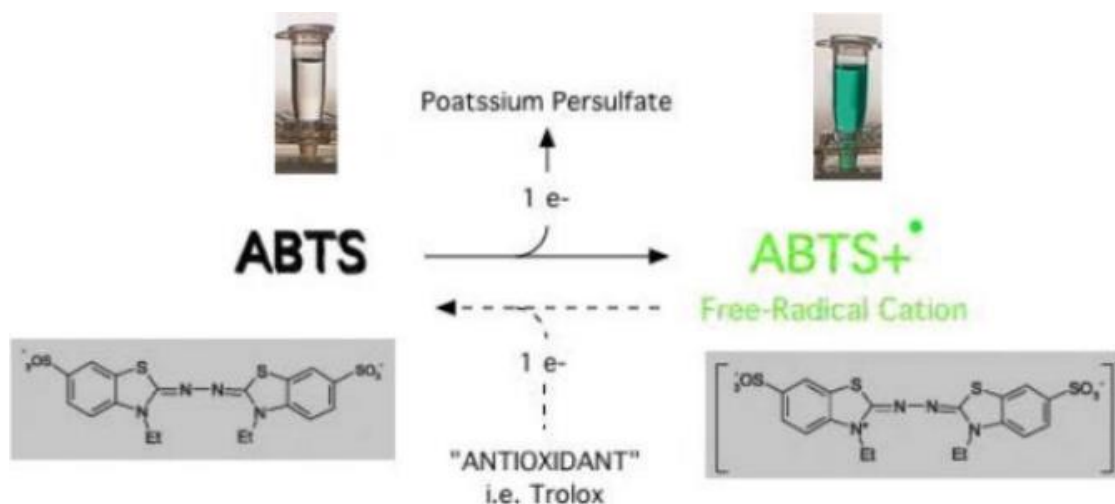


Fig. 12 Principio del ensayo de capacidad antioxidante mediante ABTS [34].

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Este capítulo explica los métodos de síntesis que se siguieron para la obtención de las AgNPs, y también de la obtención de los espejos de plata. Además, se reportan las condiciones de adquisición de las distintas técnicas de caracterización que se aplicaron en el estudio de las propiedades de los materiales obtenidos. Por último, se describen los parámetros empleados en la detección de compuestos fenólicos del vino blanco.

Si crees que puedes, ya estás a medio camino.

- Theodore Roosevelt -

2.1 Síntesis por reducción química

La reducción química es uno de los métodos más utilizados para la síntesis de nanopartículas metálicas y semiconductoras, este enfoque es el más utilizado para el control morfológico y de tamaño de las nanopartículas, algunas morfologías obtenidas son prismas, cubos, estrellas, entre otras [35]. Cada morfología proporciona respuestas diferentes en sus propiedades ópticas, las cuales pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones. El método de reducción emplea diversos agentes reductores como: citrato de sodio, borohidruro de sodio, N,N-dimetilformamida, entre otros, los agentes estabilizantes usados para la síntesis de nanopartículas son: polivinilpirrolidona, alcohol polivinílico, entre otros [35-36].

Este método es fácil y eficiente, y se tiene un buen control de tamaño optimizando algunos factores experimentales, la velocidad de crecimiento de las nanopartículas depende de diversas variables, la concentración de iones metálicos, el tipo de agente reductor que se emplea, el pH de la reacción, la temperatura y el más importante el tiempo de reacción [37].

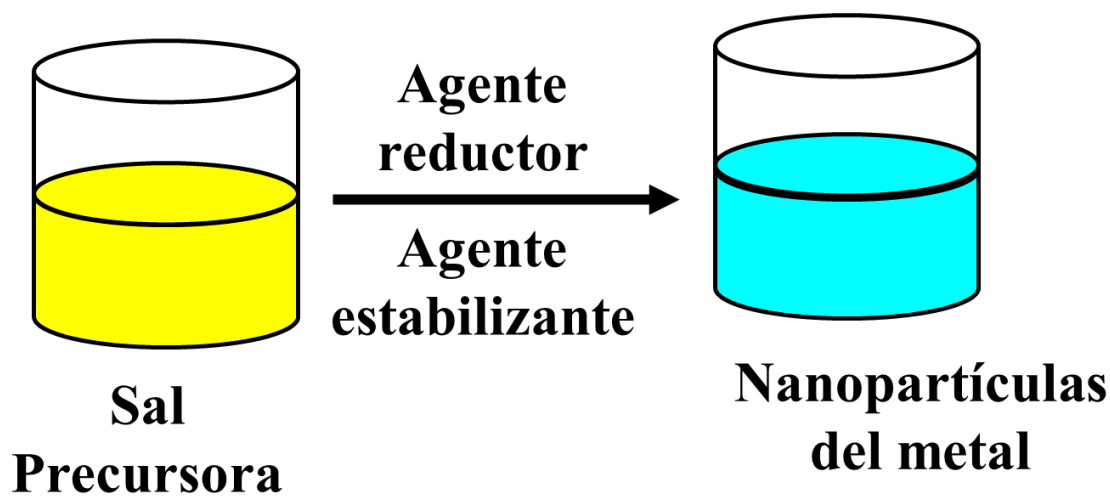


Fig. 13 Esquema representativo de la síntesis por reducción química.

2.2 Síntesis de nanoestrellas de plata

Las nanopartículas se sintetizan a partir de metales a tamaños nanométricos mediante métodos físicos o químicos, constituyen un grupo clave de nanomateriales ampliamente investigados en diversas áreas científicas e industriales. Los metales más utilizados para la síntesis de nanopartículas son el aluminio (Al), el cadmio (Cd), el cobalto (Co), el cobre (Cu), el oro (Au), el hierro (Fe), el plomo (Pb), la plata (Ag) y el zinc (Zn). Las nanopartículas pueden ser sintetizadas mediante dos enfoques principales (figura 14), método *top-down*, en este enfoque, los materiales más grandes se dividen o se reducen a escala nanométrica, técnicas como la molienda, la litografía o el grabado son ejemplos de este enfoque y el método *bottom-up* implica la construcción de nanopartículas a partir de átomos o moléculas individuales, métodos como la deposición de vapor, la síntesis química en solución o la autoensamblaje son ejemplos de este enfoque, este método tiende a producir nanopartículas con mayor control sobre sus propiedades [38].

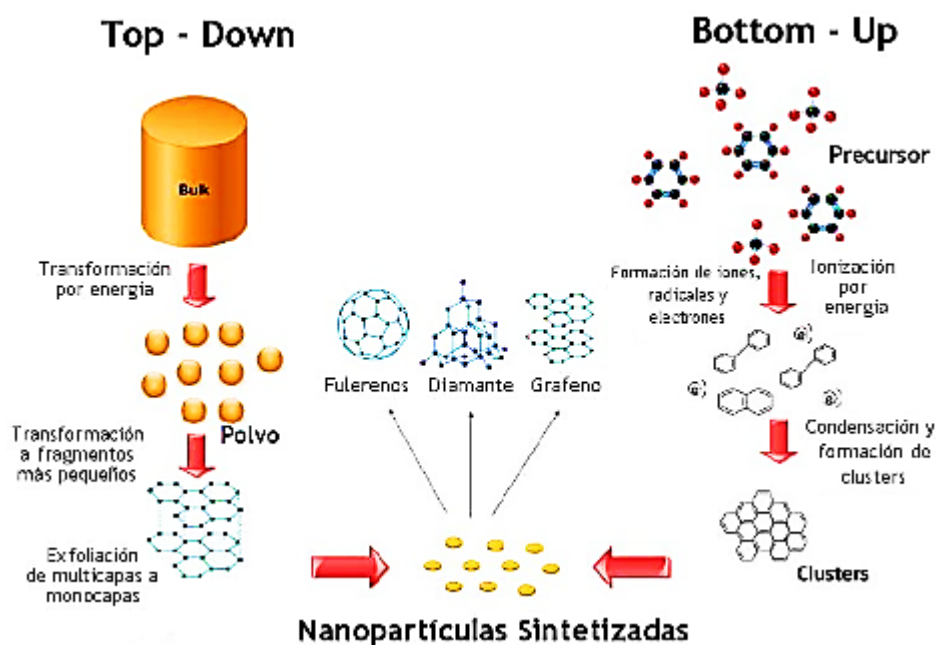


Fig. 14 Métodos de síntesis de nanomateriales [39].

Se sintetizaron dos muestras de nanopartículas de plata ambas por el método de reducción química, para la muestra M1 se pesaron 8.49 mg de AgNO_3 y se diluyeron en 200 mL de agua desionizada, esta disolución se colocó en un matraz de bola de tres bocas (reactor), con agitación constante. La muestra se calentó hasta alcanzar la temperatura de reacción de 45 °C, y se agregaron 0.2 mL de una solución acuosa al 37% de CH_2O y, seguidamente se agregaron 0.4 mL de $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ al 28%. Se observó un cambio de color a gris cuando se adicionó el amoníaco sugiriendo la formación de partículas metálicas de plata. Una vez que toda la disolución cambió de color se adicionaron 20 ml de PVP al 5% en solución acuosa, y se mantuvo la temperatura de reacción por 1 hora.

La muestra M2 se sintetizó siguiendo el método descrito en el párrafo anterior, pero modificando la masa de los precursores, para el precursor de plata se pesaron 33.974 mg de AgNO_3 , el volumen del CH_2O y $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ al 28% fue de 0.8 mL y 1.6 mL, respectivamente. La temperatura se mantuvo de 45°C y se adicionó 20 mL de PVP al 5% de solución acuosa, y se mantuvo la temperatura de reacción por 1 hora.

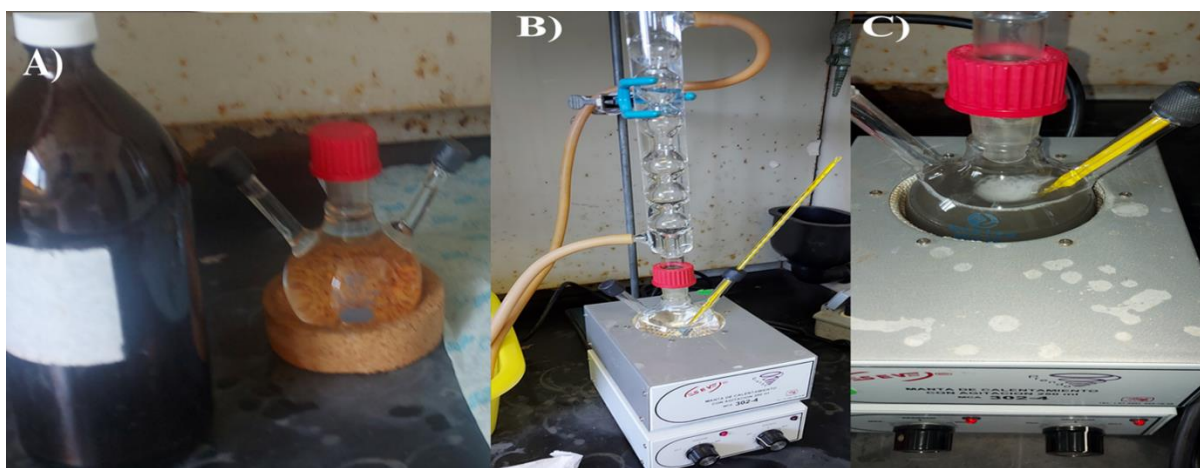


Fig. 15 Imagen representativa de la síntesis de nanopartículas de plata a) Matraz, sistema de reflujo y bomba de recirculación, b) solución de nitrato de plata y c) formación de las nanopartículas.

Una vez transcurrido el tiempo de síntesis la muestra se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Para eliminar el exceso de PVP (polivinilpirrolidona), se realizaron 10 lavados con etanol. Para obtener la muestra en polvo, la muestra fue

secada en una parrilla, a una temperatura de 80 °C y finalmente se recuperó la muestra en polvo (nanopartículas) en un tubo de microcentrífuga.

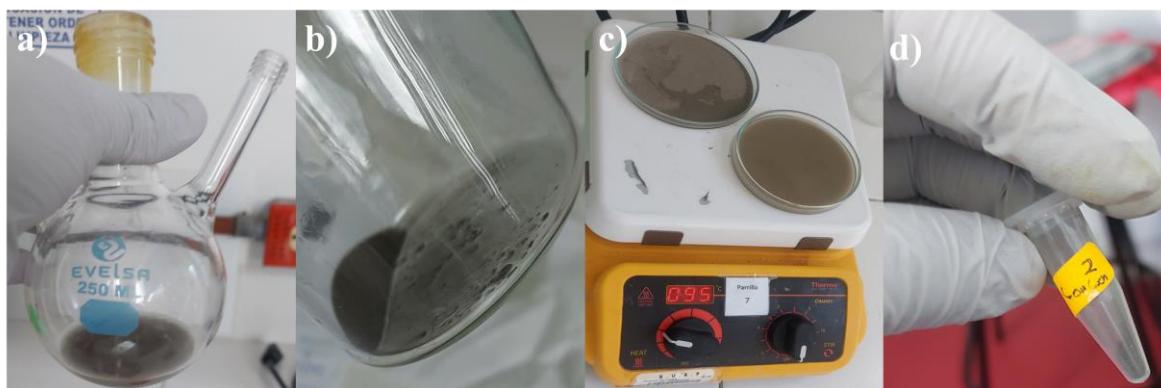


Fig. 16 Imagen ilustrativa de la síntesis de Ag NP's a) Retiro del excedente de solvente, b) lavados de etanol, c) secado de muestra en la parrilla y b) Muestra en polvo de las nanopartículas de plata.

2.3 Fabricación de espejos de plata

Las nanopartículas metálicas de entre 1-100 nm presentan la resonancia de plasmones superficiales, las cuales son excitaciones colectivas de la densidad carga que se presenta en sistemas con altas densidades electrónicas, el entendimiento de las propiedades de la resonancia del plasmón superficial de las nanopartículas ha abierto la puerta a diferentes aplicaciones [40].

El efecto SERS se basa en el aumento de la difusión inelástica (señal Raman), procedente de determinadas moléculas en presencia de una nanoestructura metálica, esto debido a la resonancia del plasmón, es por ello que se sintetizaron espejos de plata, estos formarían la nanoestructura metálica que permite aumentar la resonancia del plasmón, permitiendo realizar detecciones de moléculas con mayor precisión, los espejos se fabricaron mezclando acetato de etilo y hexano en una proporción de 1:1, la mezcla se agitó vigorosamente durante 5 minutos, hasta que las dos fases inmiscibles estuvieron bien mezcladas, posteriormente se dejó reposar 15 segundos, se observaron dos fases inmiscibles nuevamente, en seguida se separó la fase superior conocido como solvente mediador, posteriormente se

añadieron 20 μL del solvente mediador en un microtubo de centrifuga, seguidamente se añadieron 10 μL de AgNP al 0.26 mg ml^{-1} , si se desea obtener un mejor espejo estas cantidades elevan manteniendo la relación de 2:1, al agregar las partículas en el microtubo de centrifuga, se observó cómo se empiezan a formar las fracciones de espejo de AgNP, se dejó reposar de 15-20 minutos. El de AgNP fue recuperado con una pipeta, y se depositó sobre una superficie (borosilicato recubierto con aluminio).



Fig. 17 a) Mezcla de hexano y acetato de etilo, b) Precipitación de las nanopartículas de plata, c) Espejo de plata ya formado y d) Espejo de plata recuperado y colocado en borosilicato recubierto con aluminio.

2.4 Condiciones de detección de vino blanco mediante efecto SERS

La industria vitivinícola, es un sector de importancia económica y cultural en muchas regiones del mundo, que enfrenta el desafío constante de asegurar la calidad de su producto. Actualmente en la industria del vino, se realizan pruebas de calidad sensoriales, por personas expertas (catadores), realizando pruebas organolépticas. La composición polifenólica de los vinos es uno de los parámetros de calidad más importantes que contribuye a definir características tales como color, aroma, sabor, astringencia y estabilidad oxidativa [41]. Sus propiedades son determinantes en la evolución de los vinos con el tiempo, la presencia de cada una de estas propiedades

da como resultado un vino con alta calidad. El papel de los compuestos fenólicos en la variedad de uva es determinante para la calidad del vino cuyo destino es la crianza en barrica, el contenido en compuestos fenólicos del vino depende tanto de la variedad de la uva, del rendimiento de cosecha, así como de las condiciones climáticas. La importancia de detectar los compuestos fenólicos radica en que se puede tener un mejor control de las características principales que aportan al vino.

Apoyados del efecto SERS el cual se basa en el aumento de la difusión inelástica (señal Raman), se hizo la detección de compuestos fenólicos en el vino blanco, para ello se prepararon tres tipos diferentes de muestras; la primera consistió en agregar 20 microlitros de vino y depositarla en borosilicato recubierto en aluminio. La segunda muestra consistió en medir 20 microlitros de nanopartículas de plata depositados en el sustrato de vidrio y agregando 20 microlitros de vino blanco. La tercera muestra se realizó en presencia de espejo de plata y 20 microlitros de vino blanco.

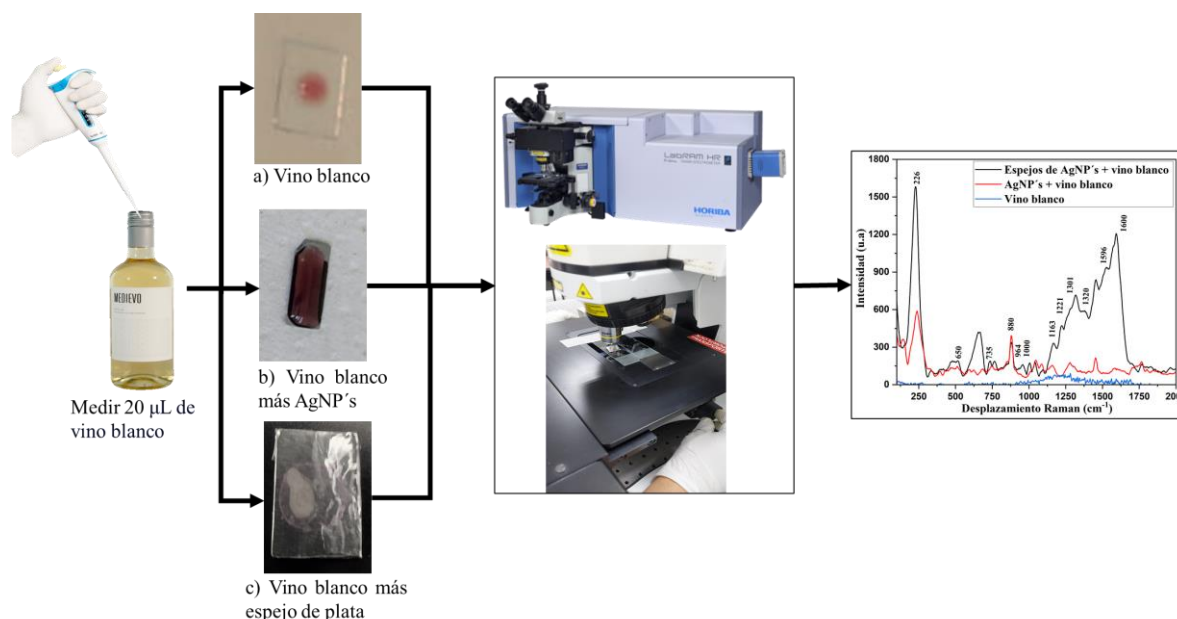


Fig. 18 Imagen de los pasos para la detección de vino blanco a) soportes preparados a diferentes condiciones, b) Detección de vino blanco en el equipo de Micro Raman, c) Ejemplo de espectro micro Raman obtenido.

2.5 Técnicas de caracterización de materiales

La caracterización de las nanopartículas es indispensable para conocer las propiedades físicas, químicas, estructurales y morfológicas de las nanopartículas, la caracterización ayuda para darles una aplicación en los diferentes sectores.

La caracterización permite determinar el tamaño, la morfología, la distribución, la composición química, entre otras propiedades, esta información es esencial para controlar y optimizar los procesos de síntesis, algunas de las principales técnicas de caracterización son difracción de rayos-X (DRX), Microscopía electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía UV-Vis, Espectroscopía Raman y el Efecto SERS.

Los equipos utilizados en la caracterización de las dos muestras (M1 y M2) son los siguientes:

2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)

El estudio de la estructura cristalina de las AgNP's se realizó utilizando un difractómetro PANALYTICAL – EMPYREAN, con una longitud de onda característica de $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ (Cu-K α). El patrón de difracción fue adquirido haciendo un barrido de 30° a 90° en 2θ , con un tamaño de paso de 0.016° y un tiempo de paso de 45 s.

2.5.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)

El estudio de la morfología de la muestra sintetizada se realizó mediante microscopia electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), el equipo utilizado fue un microscopio de emisión de campo modelo JSM-7800F Jeol, con un modo de adquisición mediante rayos X, con una resolución de imagen de 9.4 mm y un voltaje de aceleración de 10.0 Kv.

2.5.3 Espectroscopía UV-Vis

Las propiedades ópticas de las AgNP'S fueron estudiadas por medio de espectroscopia UV-VIS empleando un espectrofotómetro Agilent Cary 5000, con un rango espectral de 300 a 800 nm, el tipo de celda utilizada fue de cuarzo de 1 cm de paso óptico, y de disolvente se empleó etanol.

2.5.4 Micro RAMAN

El estudio de la composición molecular fue a través del análisis de la dispersión inelástica de la señal RAMAN, en un micro RAMAN modelo Horiba LabRam HR, con un láser de He-Ne (632.8 nm, 16mW), resoluciones espaciales (20, 5 y 2 μ m) y espectral de ± 0.2 a ± 0.5 cm⁻¹. Un detector CCD enfriado termoeléctricamente, un microscopio óptico (10, 50 y 100X) y una videocámara para enfocar.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las caracterizaciones realizadas de DRX (difracción de rayos-X), SEM, espectroscopía UV-VIS para las dos muestras de AgNP's (M1, M2) que se sintetizaron mediante el método de reducción química. Se identificó la fase cristalina del material y su pureza mediante la técnica de DRX; por SEM se estudió la morfología y el tamaño que presentan las partículas metálicas, por espectroscopia UV-VIS se determinó la absorbancia de las AgNP's. Finalmente se discuten los resultados de la caracterización de las dos muestras de AgNP'S y de la detección cualitativa de compuestos fenólicos de vino blanco con una variedad de uva Sauvignon Blanc, mediante espectroscopia Raman y el efecto SERS con los espejos de AgNP's.

*La mejor preparación para mañana
es hacer lo mejor que puedas hoy
- H. Jackson Brown -*

3.1 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos x (DRX) es una técnica analítica utilizada para el estudio de la estructura cristalina, debido a la información que arroja un difractograma se puede calcular el tamaño de cristal, éste está conformado por reflexiones (picos) que corresponden a las distancias de dimensiones nanométricas entre los planos de átomos [42]. En la figura 19 se presentan los patrones de difracción de rayos X de las muestras obtenidas (M1, M2) de AgNP's. Los cuales presentan señales en 38° , 44° , 64° y 77° asociados con los planos (111), (200), (220), (311) y (222) atribuidos a plata con fase cúbica centrada en las caras (FCC) respectivamente, además se observan dos picos en 36° y 40° , los cuales corresponden a los planos (0004) y (1102) de la estructura hexagonal compacta (HCP) de plata. Esto indica la presencia de las fases FCC y HCP en las estructuras que se asemejan a flores. Los datos obtenidos coinciden en posición con los datos reportados en la ficha JCPDS 04-0783 para la plata con una estructura cristalina cubica (FCC) y en la ficha JCPDS 41-1402 para la plata con una estructura hexagonal compacta (HCP). No se observan picos de difracción adicionales que se puedan atribuir a un compuesto secundario, por lo que se confirma que las muestras sintetizadas corresponden solamente a plata metálica.

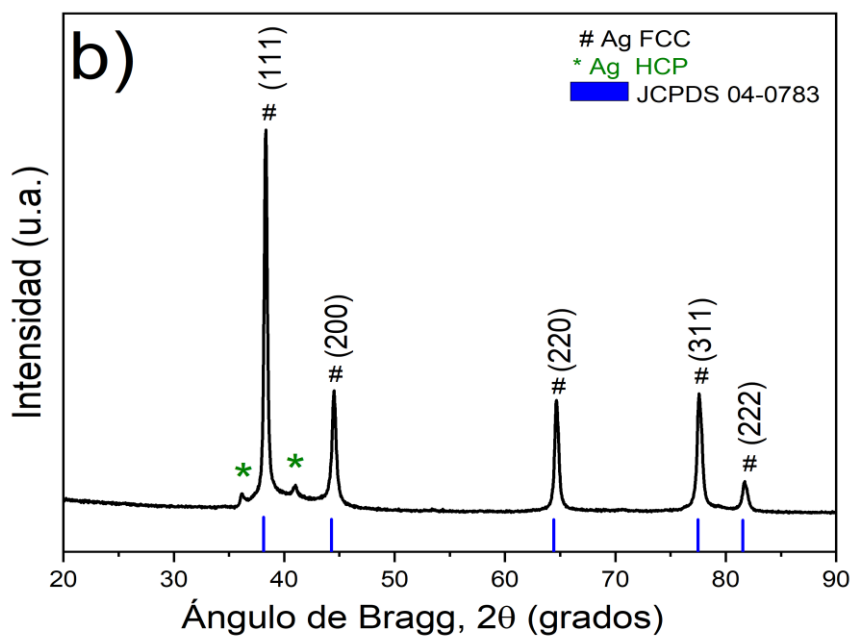
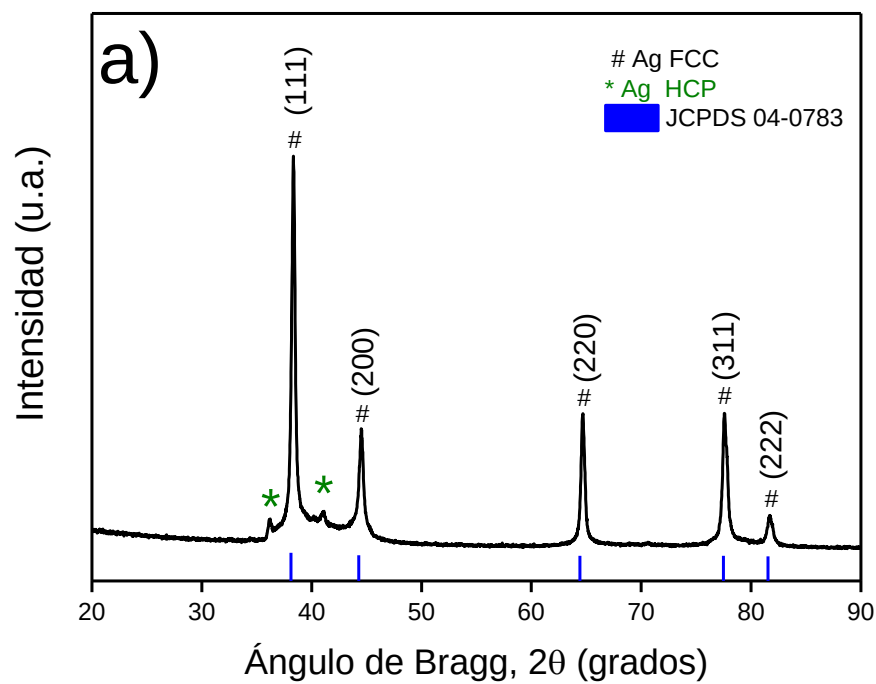


Fig. 19 Patrones de difracción de rayos-X de las muestras a) M1 y b) M2 obtenidas con diferente concentración de precursor de plata.

Martínez F. [43] y colaboradores reportaron la síntesis de nanopartículas de plata mediante reducción química con diversos valores de pH (10.9, 11.5 y 12.0) los cuales presentaron picos de difracción en la misma posición que el presente trabajo. Por lo que se concluye que las condiciones de síntesis empleadas en el presente estudio favorecen la formación de nanopartículas de plata con una estructura cristalina similar, independientemente del pH, coincidiendo con los resultados reportados.

Con el objetivo de conocer el efecto de la concentración de precursor sobre las propiedades cristalinas de las Ag Np's se calculó el tamaño de cristalito relacionado con el perfil de DRX mediante del ancho a media altura (FWHM por sus siglas en ingles), mediante la fórmula de Scherrer [44].

La ecuación se expresa como:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

donde:

D representa el tamaño del dominio cristalino en nanómetros.

K es un factor de forma que depende la geometría del cristal (generalmente cercano a 0.9).

λ es la longitud de onda de la radiación utilizada (por ejemplo, 0.154 nm para Cu $K\alpha$).

β es el ancho del pico a la mitad de su altura máxima (FWHM), medido en radianes.

θ es el ángulo de difracción del pico seleccionado, expresado en radianes.

El ancho a la mitad de la altura (FWHM, Full Width at Half Maximum) es un parámetro importante en la ecuación de Scherrer, ya que representa el ancho del pico de difracción a la mitad de su altura máxima.

Para el cálculo del tamaño de cristalito se tomó la reflexión más intensa de cada muestra analizada (M1, M2) que corresponde al plano (111). En la tabla 3.1 se enlistan los resultados obtenidos del cálculo.

Tabla 3.2. Parámetros correspondientes a la reflexión (111) y tamaño de cristalito para las muestras (M1, M2).

Muestra	2θ (grados)	Plano	FWHM (grados)	D (nm)
M1	38.30	111	0.34115	25.76941
M2	38.33	111	0.3014	29.16667

Para la muestra M1, el pico de difracción observado a $2\theta = 38.30^\circ$ se asigna al plano cristalográfico (111), característico de estructuras cúbicas centradas en las caras, como la plata metálica (Ag). El valor de $\text{FWHM} = 0.34115^\circ$ indica un ensanchamiento moderado del pico, asociado a un tamaño cristalino reducido. Aplicando la ecuación de Scherrer, se obtuvo un tamaño promedio de cristalito (D) de 25.77 nm, para la muestra M2, el pico de difracción observado a $2\theta = 38.33^\circ$ se asigna al plano cristalográfico (111), el valor de $\text{FWHM} = 0.3014^\circ$ con un tamaño promedio de cristalito (D) de 29.77 nm.

El tamaño de cristalito para la muestra de menor concentración (M1) es de 25.76 nm y para la muestra de mayor concentración (M2) es de 29.16 nm, en la formación de cristalito influyen el precursor y otros factores. Alanís A. et al. [45] explican los factores que influyen en la formación del cristalito, si la tasa de nucleación es alta, los cristales serán pequeños y habrá mayor cantidad de ellos, por lo contrario, si la velocidad de crecimiento es elevada, comparada con la de nucleación, los cristales serán menores en cantidad, pero de mayores dimensiones, otro factor, es el enfriamiento rápido y una sobresaturación producen, por lo general, cristales más pequeños, mientras que uno lento produce cristales más grandes.

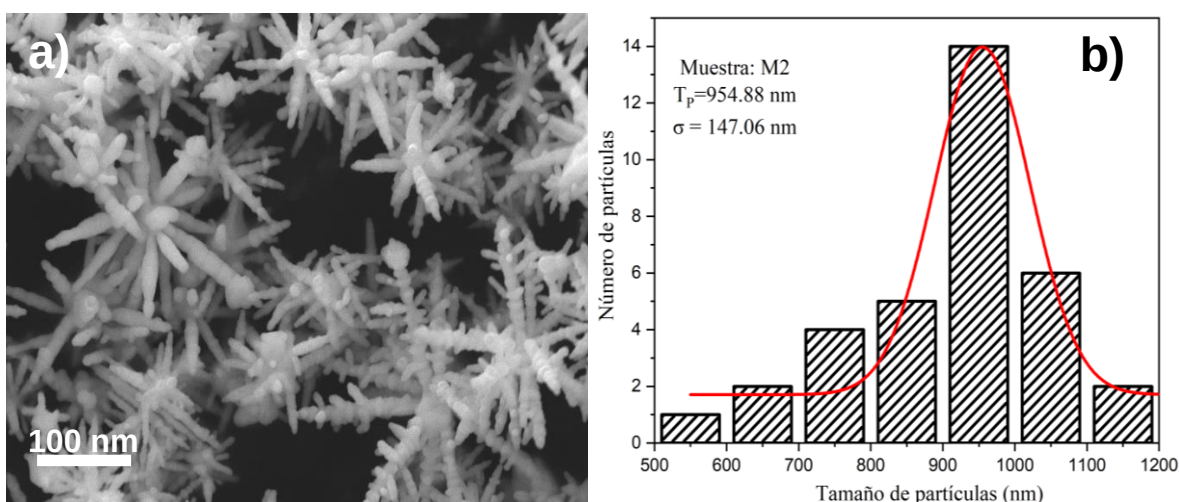
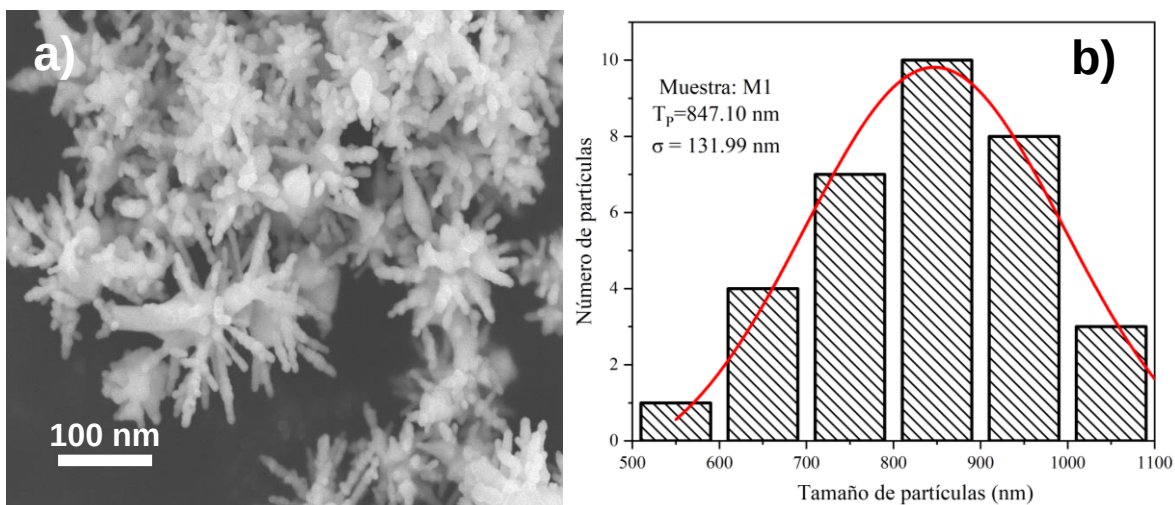
De acuerdo con los resultados obtenidos la velocidad de crecimiento es más rápida en la M2 y esto influye a la formación de cristalitos más grande, en cambio en la

muestra M1 la velocidad de crecimiento es más lenta y esto influye en que el cristalito sea de menor tamaño.

Corzo A. [46] sintetizó nanopartículas de oro mediante la reducción de $\text{H}[\text{AuCl}_4]$ y explica que al disminuir la concentración de la solución precursora, pero manteniendo la concentración del reductor constante y en exceso, el tamaño de partícula aumenta; esto es debido a que muy rápidamente el agente reductor rodea al soluto en menor concentración, obteniendo núcleos o conglomerados más grandes que se ven favorecidos con un crecimiento cristalino, esto nos permite explicar porque obtenemos cristalitos de mayor tamaño en la muestra M2, ya que se está manteniendo constante el agente reductor (formaldehído). En sus resultados Corzo A. [46] explica algo semejante, cuando se cuadruplica la concentración de $\text{H}[\text{AuCl}_4]$ manteniendo constante la concentración del reductor, se obtienen núcleos cristalinos, probablemente en un primer momento muy pequeños, los que tienden a aglomerarse para formar núcleos mayores y con ello formar cristalitos de mayor tamaño.

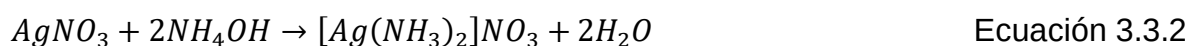
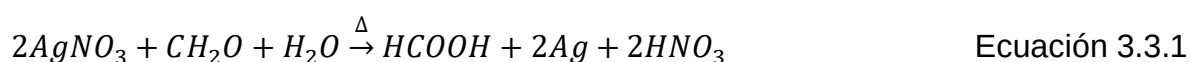
3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)

La morfología de las partículas de plata se obtuvo mediante microscopía electrónica de barrido, en la figura 20 se presenta la imagen típica SEM de las AgNP's, sintetizadas a diferentes concentraciones. En ambos casos se observa una morfología similar a una estrella que consta de un núcleo y de este mismo salen varias ramificaciones en forma de punta. Con la finalidad de determinar su tamaño, se realizaron mediciones de pico a pico y se midieron un promedio de 40 nanopartículas, como resultado se obtuvo un tamaño de partícula en el rango de 800 nm ~ 1000 nm para las muestras M1 y M2, a partir del histograma de distribución se calculó un tamaño promedio de 800 nm para M1 y 900 nm para M2, respectivamente.



Existen diversos reportes de la síntesis de nanopartículas de plata, por ejemplo, Tao Liu T. et al. [12] y Peixoto M. [47] sintetizaron nanopartículas de Ag en forma de flor, con picos que salen de un núcleo. Sus resultados muestran una morfología muy parecida a la obtenida, con la diferencia de un tamaño de partícula más grande y con mayores ramificaciones que terminan en picos.

La síntesis de las AgNP's se realizó por reducción química, la reacción inicia cuando el AgNO₃ reacciona con CH₂O, los iones de Ag⁺ son reducidos por el formaldehído a plata metálica Ag⁰, mientras que el formaldehído se oxida a ácido fórmico (Ec. 3.3.1), esta reacción se llevó a 45°C, el NH₄OH actúa como estabilizador de pH, su principal función es mantener una pH alcalino, si aún quedan iones Ag⁺ sin reducir, al agregar el NH₄OH reaccionan con el NH₃ y forman un complejo de plata amoniacal (Ec. 3.3.2), al adicionar PVP (polivinilpirrolidona), la plata metálica formada en la primera reacción se dispersa en la solución en forma de nanopartículas de plata (AgNP's) estabilizadas por PVP, este se adhiere a la superficie de las nanopartículas de plata, evitando que se aglomeren (Ec. 3.3.3)



Durante la etapa de crecimiento, el PVP se adsorbe de manera selectiva sobre caras cristalográficas específicas de la plata, inhibiendo el crecimiento sobre esas regiones, esto induce una expansión preferencial en direcciones libres, promoviendo la formación de proyecciones puntiagudas (picos), que son responsables de la morfología en forma de estrella.

Simultáneamente, los iones Ag⁺ que aún permanecen en la solución continúan siendo reducidos, poco a poco por el formaldehído, estos iones tienden a depositarse en zonas con alta energía superficial, esto favorece el crecimiento ramificado, intensificando el crecimiento de ramificaciones en distintas direcciones de las nanopartículas, el medio alcalino proporcionado por el NH₄OH también mejora la eficiencia del formaldehído como reductor, acelerando ligeramente la reducción, pero manteniéndola lo suficientemente lenta para permitir un crecimiento diferenciado y direccionado [48].

Thanh N. et al [49] explica el proceso de nucleación de Watzky y Finke que propusieron un enfoque de nucleación lenta constante seguida por crecimiento

autocatalítico. Finke y Watzky describieron un mecanismo en dos etapas para entender los aspectos mecanísticos de las reducciones de sales metálicas: nucleación lenta continuada y crecimiento rápido autocatalítico, se puede asumir que el mecanismo general para la formación de nanopartículas se puede simplificar en tres etapas: nucleación, crecimiento y aglomeración. Es importante mencionar que, para las partículas metálicas, el proceso de nucleación es el resultado de un compendio de factores tales como las condiciones de reacción (temperatura, agitación, etc.) y la diferencia de potenciales redox entre la sal precursora y el agente reductor.

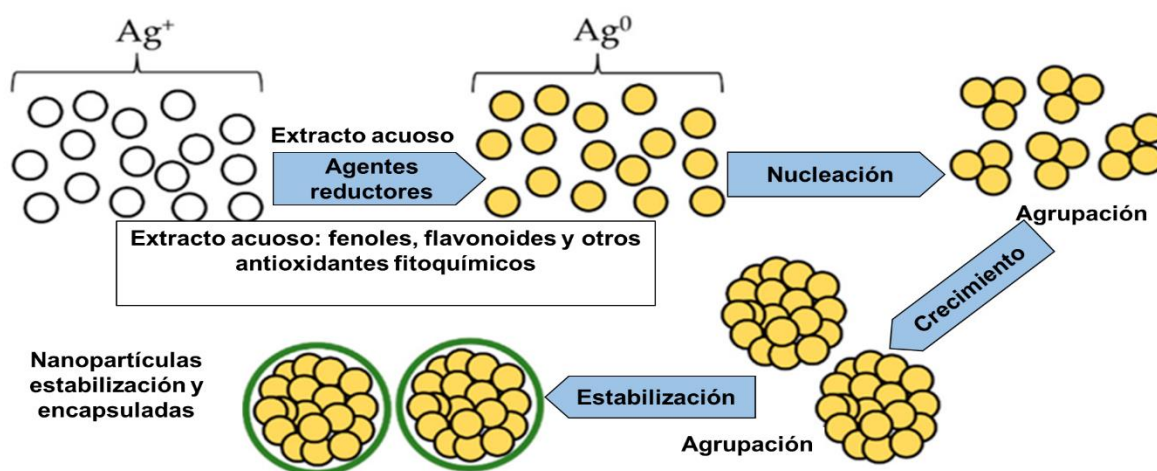


Fig. 22 Mecanismo de nucleación y crecimiento de las nanopartículas de plata.

Dado que las nanopartículas de plata se van a aplicar en la detección de compuestos fenólicos se ha observado que para que exista interacción entre las partículas metálicas y el analito estas deben estar en contacto con una superficie metálica nanoestructurada, en este sentido la dispersión Raman mejorada por superficie (SERS, por sus siglas en inglés) ha emergido como una poderosa técnica analítica debido a su alta sensibilidad y especificidad, algunas sustancias suelen presentar baja reproducibilidad de la señal, para superar esta limitación se han propuesto la fabricación de espejos de nanopartículas, con una alta sensibilidad al efecto SERS y buena reproducibilidad de la señal [51].

El efecto SERS requiere una superficie metálica nanoestructurada para maximizar su eficiencia. El aumento en la intensidad de la señal Raman se debe a la amplificación del campo electromagnético generado por la resonancia de plasmones superficiales localizada en nanomateriales metálicos como la plata. Estas resonancias ocurren cuando la luz incidente excita colectivamente los electrones libres en la superficie de las nanopartículas, generando campos eléctricos intensificados alrededor de estructuras con geometrías específicas a escala nanométrica. Cuando una molécula analito se encuentra adsorbida o muy próxima a estas regiones, conocidas como "hot spots", la señal Raman se ve enormemente amplificada. Por tanto, la presencia de una superficie metálica nanoestructurada no solo es esencial para la generación de estos efectos, sino que su diseño y morfología determinan directamente la sensibilidad y reproducibilidad del análisis SERS.

La síntesis de los espejos de AgNP's, se realizó tomando en cuenta los requerimientos para mejorar el efecto SERS, con una superficie nanoestructurada, los espejos de AgNP's se realizaron mezclando acetato de etilo y hexano, formándose dos fases inmiscibles, se debe separar la fase superior y este será nuestro solvente medidor, en seguida se deben adicionar las nanopartículas en solución acuosa, se debe observar como las nanopartículas comienzan a precipitarse, formando el espejo de AgNP's.

En la figura 23 se presenta la imagen típica SEM de un espejo de AgNP's, en este se puede observar nanopartículas aglomeradas, en contacto, debido al disolvente mediador (hexano y acetato de etilo), este presenta una mayor densidad en comparación con la solución de AgNP's, es por esto por lo que tienden a depositarse en el fondo, dando una interfaz borrosa, esta capa de AgNP's formada se le denomina espejo de AgNP's.

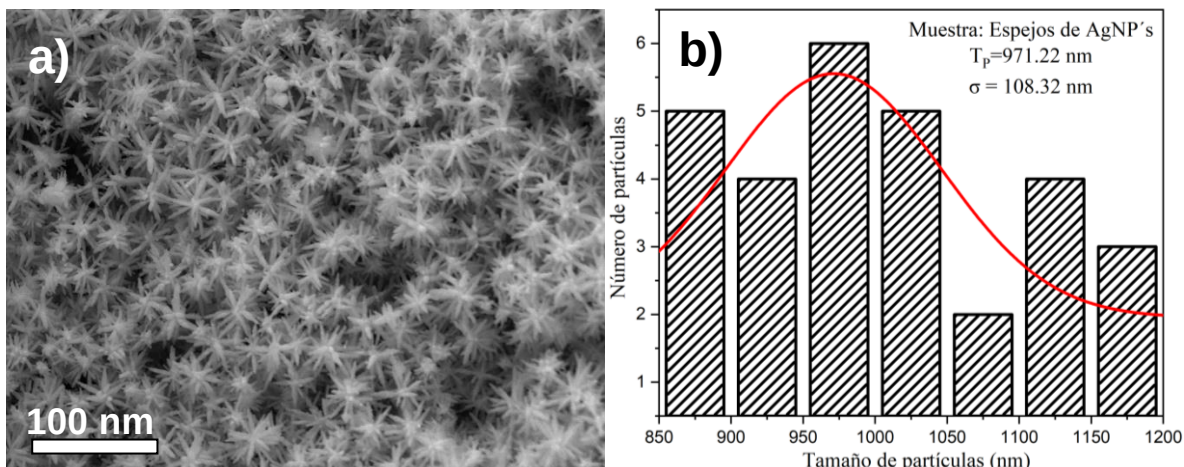


Fig. 23 a) Imágenes típicas SEM y b) histograma de distribución de tamaño del espejo de AgNP's, con un tamaño de partícula promedio entre 900 nm.

3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)

Para la caracterización las AgNP's, fue necesario determinar los elementos químicos presentes en las muestras M1 y M2. Esta información resulta esencial para correlacionar las propiedades observadas con la estructura y la química del material.

Con este objetivo, se utilizó la técnica de espectroscopía de rayos X dispersiva en energía (EDS), acoplada a un microscopio electrónico de barrido (SEM). Esta técnica permite identificar y cuantificar los elementos presentes en la superficie de una muestra mediante la detección de rayos X característicos emitidos por los átomos al ser excitados por un haz de electrones.

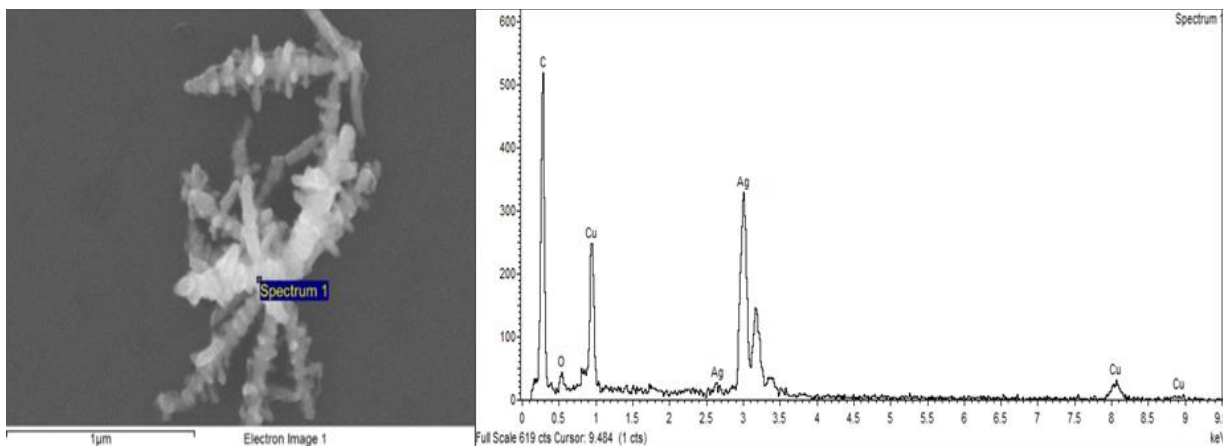


Fig. 24 a) Imágenes típicas SEM y espectros de EDS característicos de las muestras M1.

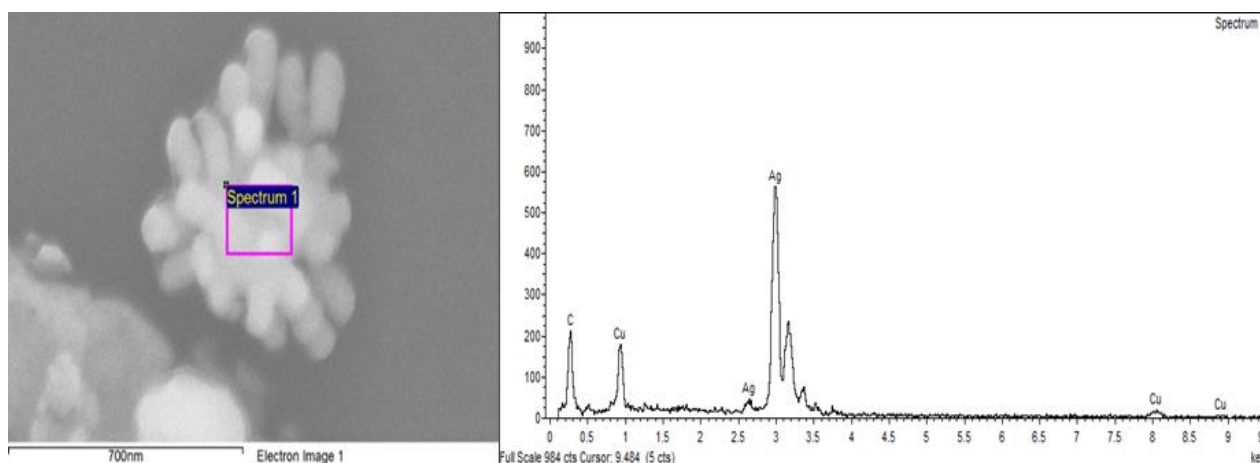


Fig. 25 b) Imágenes típicas SEM y espectros de EDS característicos de las muestras M2.

Los resultados EDS presentan mayor presencia de plata para las dos muestras, la presencia de Carbono y del Oxígeno se puede deber al agente reductor PVP, y la presencia del Cobre se debe al equipo EDS.

3.2 Espectroscopía UV-Vis

En la figura 26 se presenta el espectro de absorbancia de la muestra M1 y M2 de las AgNP'S, para la muestra M1 presenta una banda en 367 nm, y la muestra M2 presenta una banda en 375 nm estas corresponde a la resonancia del plasmón superficial (SPR) de las partículas de plata, entre estas dos muestras su diferencia está en la absorbancia, una mayor absorbancia en el pico SPR generalmente significa que el tamaño de partículas es mayor, ya que la absorbancia está relacionada directamente con el tamaño de partícula, la muestra M1 es la de menor absorbancia en comparación con la muestra M2, el tamaño de partícula influye en el desplazamiento del SPR, como se puede observar en la muestra M2 la banda está más recorrida y es más ancha la banda en comparación con la muestra M1.

Zhou N. et al [52] y colaboradores explican la SPR como la oscilación colectiva de los electrones libres en la superficie de un metal (como la plata), inducida por la luz,

esta propiedad es muy sensible al tamaño, forma y estructura de las nanopartículas, la SPR se da en los picos, bordes y uniones estrellas entre picos, estas nanopartículas favorecen la formación de zonas de alta intensidad del campo electromagnético, llamadas “hot spots” que amplifican la señal Raman (SERS). Además, concluyen que, a mayor cantidad de hidróxido de amonio, se forman varillas (ramificaciones) más pequeñas y numerosas, lo cual cambia el comportamiento del plasmón, a medida que las nanopartículas tienen más ramificaciones, se vuelve dominante la resonancia multipolar, la eficacia de la mejora Raman (SERS) no depende de la fase cristalina (HCP o FCC), sino de la cantidad de los hot spots generados por la geometría del nanomaterial.

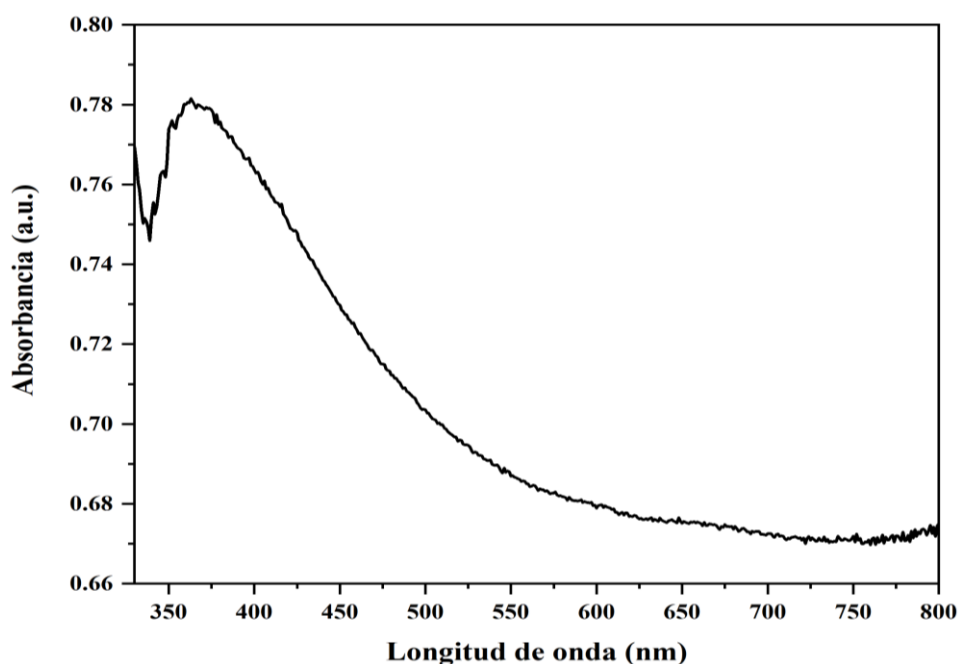


Fig. 26 a) Espectro UV-VIS de absorbancia de la muestra M1 sintetizada a baja concentración de precursor de plata AgNO_3 .

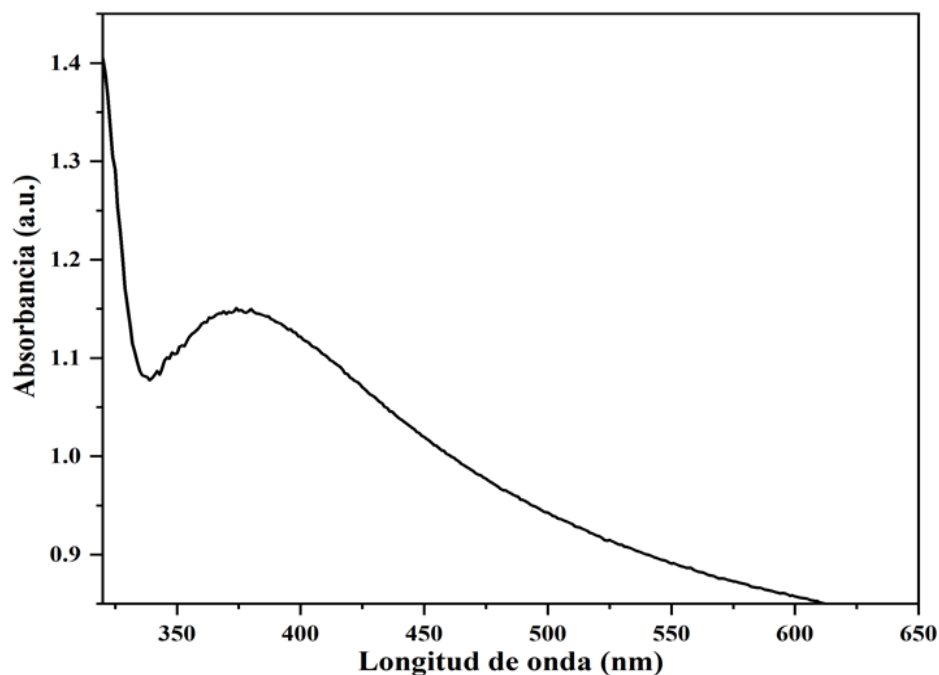


Fig. 27 b) Espectro UV-VIS de absorbancia de la muestra M2 sintetizada a una más alta concentración de precursor de plata AgNO_3 .

3.5 Detección de compuestos fenólicos

La detección de compuestos fenólicos se realizó utilizando espectroscopia Raman, como prueba preliminar se realizó la detección de rodamina B el cual es un colorante orgánico con bandas Raman reportadas ampliamente y que sirve como referencia para poder testar nanopartículas metálicas aplicadas en la detección de moléculas orgánicas. En la figura 28 se presenta el espectro Raman de la molécula de la RhB sin soportar y soportada sobre los espejos de $\text{AgNP}'\text{S}$. En el caso de la molécula sola (figura 28 a) no se observan bandas características que puedan ser asociadas a la RhB. Por otro lado, las bandas se resuelven cuando la rodamina se soporta sobre los espejos de $\text{AgNP}'\text{S}$. Diversos investigadores han reportado las bandas características de la rodamina, por ejemplo, B, Pankaj U. y colaboradores [53] reportan bandas, ubicadas en: 1183 cm^{-1} asociado al modo vibracional flexión de CH, a 1285 cm^{-1} , asociada a los movimientos del grupo metilo y metilo, respectivamente. Además de señales alrededor de 1369 cm^{-1} del modo vibracional

del estiramiento del anillo de xanteno (XR), 1509 cm^{-1} y 1647 cm^{-1} también asociado al estiramiento del XR, presente en la estructura de la RhB. Los resultados reportados, están en acuerdo con los obtenidos al realizar la detección de la rodamina B al usar los espejos AgNP's.

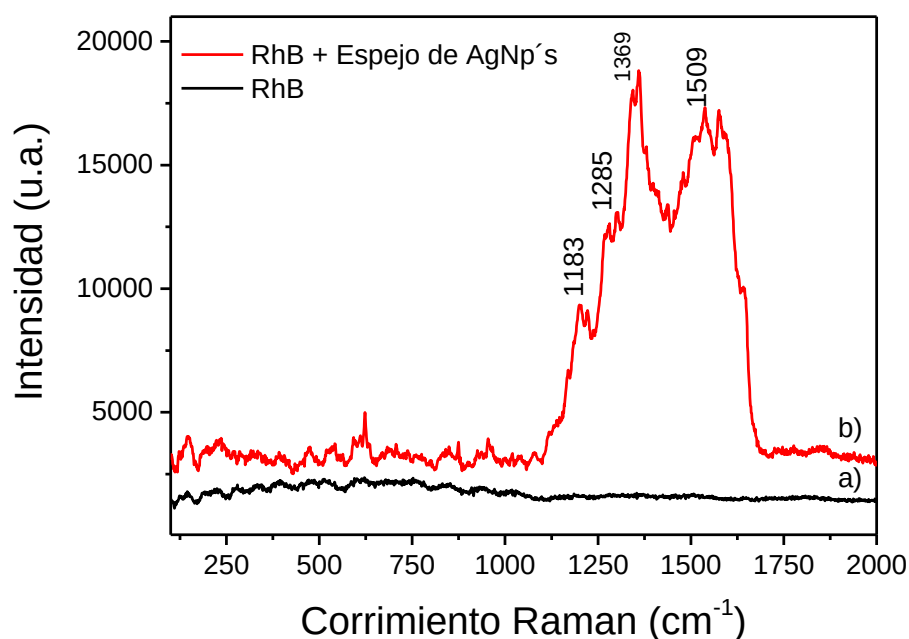


Fig. 28. Espectro Raman de la Rodamina B a) soportada en el sustrato de aluminio y b) espectro Raman de la RhB soportada sobre el espejo de plata.

La identificación de distintas moléculas orgánicas está relacionada con la capacidad de detectar la presencia de éstas a bajas concentraciones y la versatilidad de detección. Se realizaron pruebas de detección de compuestos fenólicos en vino blanco. Como vino a testar se utilizó un vino blanco de la uva Sauvignon Blanc con país de origen Chile. En la figura 29 se presenta el espectro micro Raman del vino blanco, como parte de las pruebas, también se realizó la detección *in situ* del vino con AgNP's y por último se realizó la detención del vino soportado en los espejos de AgNP's.

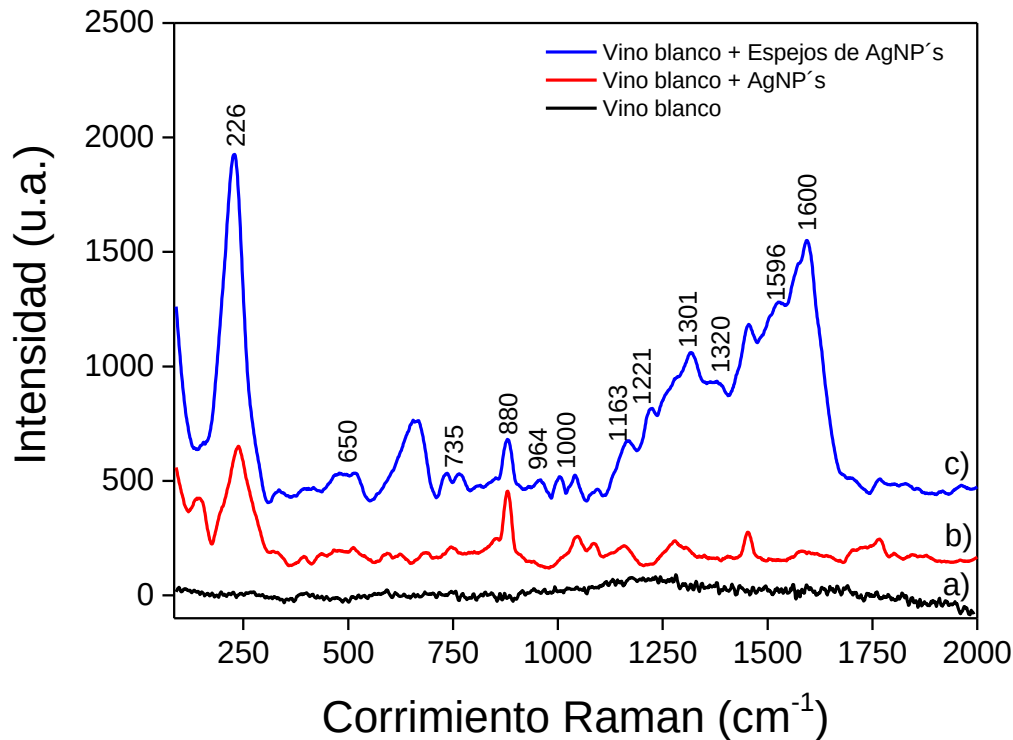


Fig. 29. Espectro Raman del vino Sauvignon Blac, a) soportado sobre el sustrato de aluminio, b) in situ y b) con espejos de plata.

El espectro Raman del vino blanco (figura 29a) no presenta señales características que puedan ser asociadas a algún compuesto fenólico, por otra parte, el espectro Raman arrojado de la prueba *in situ* (figura 29b), presenta señales débiles alrededor de 226 cm^{-1} , 880 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , sin embargo, en el espectro Raman del vino blanco soportado sobre el espejo de plata (figura 29c) se observa la aparición de señales alrededor de 650 cm^{-1} correspondiente a Tanino condensado y a la catequina [54], a 735 cm^{-1} Fructopiranososa [55], a 964 cm^{-1} ácido málico, ácido tartico [56], otra banda característica es a 1163 cm^{-1} correspondiente al glicerol [57], a 1221 cm^{-1} ácido ferúlico [58], a 1025 cm^{-1} ácido gálico [54], a 1301 cm^{-1} correspondiente al ácido cafeico [59], a 1320 cm^{-1} correspondiente a antocianina [60], a 1596 cm^{-1} corresponde a Taninos y cianidina [61], por ultimo a 1600 cm^{-1} Ácido ferúlico, resveratrol [62, 63].

Las propiedades sensoriales como la textura en boca, el amargor, la astringencia, el aroma y, de manera indirecta el color, provienen de los principales grupos de moléculas como lo son los compuestos fenólicos presentes en las uvas (*Vitis vinifera*) y que son transferidos al vino durante su vinificación.

En comparación con vinos tintos, la concentración total de compuestos fenólicos es generalmente menor en variedades de uva blanca aromática como Sauvignon Blanc, sin embargo, esta pequeña concentración de compuestos desempeña un papel clave en la percepción sensorial global y por lo tanto en la calidad del vino, particularmente en términos de sensación en boca y la modulación aromática [64, 65].

A partir de los compuestos encontrados en el presente trabajo con la técnica SERS, se encontraron relaciones de éstos con aspectos sensoriales (tabla 3.3), lo cual, a continuación, se describe.

Tabla 3.3. Asignación y relación entre grupo funcional y atributo sensorial del vino Sauvignon Blanc.

Corrimiento Raman (cm⁻¹)	Asignación	Propiedad sensorial
650 cm ⁻¹	Tanino condensado y catequina	Astringencia y amargor. [64 y 66]
1221 cm ⁻¹	Ácido ferúlico	Notas frutales, herbáceas y tropicales. [67]
1025 cm ⁻¹	Ácido gálico	notas frutales, herbáceas y tropicales. [67]
1301 cm ⁻¹	Ácido cafeico	En combinación con SO ₂ estos compuestos atrapan oxígeno y evitan la oxidación de los compuestos responsables del aroma en los vinos. [70]
1600 cm ⁻¹	Ácido ferúlico, resveratrol	Percepción sensorial global y en la estabilidad del vino en cata. [65, 67]

Dentro de los grupos fenólicos se encuentran en relevancia los flavan-3-oles, como son la catequina y sus polímeros, conocidos como taninos condensados o proantocianidinas, los cuales están altamente relacionados con la percepción de astringencia y amargor. Lo anterior se debe a que estas sensaciones se originan principalmente por la capacidad de los taninos para interactuar con proteínas salivales, provocando su agregación o precipitación y reduciendo la lubricación oral,

lo que se traduce en sensaciones táctiles de sequedad, aspereza o rugosidad durante la degustación en cata [64 y 66].

Por otro lado, en trabajos sensoriales se ha reportado que la presencia de flavonoles de bajo peso molecular como la catequina y la epicatequina contribuyen de forma intensa al amargor, mientras que los taninos de alta polimerización están más relacionados con la persistencia y calidad de la astringencia percibida en boca [66].

La presencia de compuestos fenólicos en la matriz del vino puede modular la percepción aromática al interactuar con compuestos volátiles responsables de notas frutales, herbáceas y tropicales, las cuales son características de la uva Sauvignon Blanc. Dichas interacciones afectan la volatilidad y liberación retronasal de los aromas, influyendo en la intensidad y la calidad de la percepción olfativa durante el proceso de cata [67]. Considerando lo anterior, ácidos fenólicos como el ácido ferúlico u otros compuestos como el resveratrol, contribuyen al perfil químico del vino e influyen indirectamente en la percepción sensorial global y en la estabilidad del vino en cata [65, 67].

El uso de la espectroscopía Raman intensificada por Superficie (SERS) en la caracterización y “detección” de compuestos fenólicos, como los mencionados anteriormente desde el punto de vista sensorial, representa una herramienta analítica atractiva para el estudio de vinos blancos como Sauvignon Blanc. Esta técnica permite la detección sensible y selectiva de compuestos fenólicos específicos (catequina, taninos, ácidos fenólicos y antocianinas residuales) a través de sus vibracionales características, incluso a bajas concentraciones, permitiendo la predicción del comportamiento sensorial en cata y contribuyendo a la clasificación y determinación de la calidad del vino [68, 69]. En comparación con otras técnicas convencionales, SERS ofrece la ventaja de una alta sensibilidad y la posibilidad de llevar a cabo análisis rápidos con un mínimo pretratamiento de muestra, convirtiéndola en una técnica favorable para estudios cuantitativos y comparativos.

En este sentido, al análisis e integración de datos obtenidos por SERS/Raman con evaluaciones sensoriales permite establecer correlaciones directas entre señales espectroscópicas y atributos sensoriales, como la astringencia, amargor, cuerpo y percepción aromática. La identificación de bandas Raman asociadas a grupos funcionales característicos (flavanoles, taninos y ácidos fenólicos) resulta ser una base sólida para vincular la composición fenólica “cuantificada” con la respuesta sensorial del vino [68, 69]. Para Sauvignon Blanc, donde cambios sutiles en la composición fenólica pueden tener un impacto perceptible en la calidad sensorial, el uso de SERS resulta una herramienta prometedora para profundizar la relación que existe entre la composición química y la percepción sensorial, contribuyendo al entendimiento integral del perfil sensorial del vino.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

1. Es posible la síntesis de nano estrellas de plata (Ag NP's) por el método de reducción química.
2. De acuerdo con los resultados obtenidos por DRX las partículas de plata presentan dos fases; principalmente FCC y en menor cantidad HCP.
3. Las propiedades ópticas de las Ag NP's nos da información de la resonancia del plasmón de las Ag NP's, se concluye que en las ramificaciones se favorece la formación de zonas de alta intensidad del campo electromagnético.
4. Las micrografías obtenidas por SEM muestran la morfología en forma de estrella, con un núcleo y ramificaciones en diferentes direcciones, mediante el histograma de frecuencias se determina un tamaño de partícula de 800 a 900 nm, en los espejos de las AgNP's se observa la aglomeración de las nanopartículas, permitiendo aumentar la difusión inelástica (señal Raman).
5. Los resultados EDS permiten confirmar que el nanomaterial sintetizado presenta un alto porcentaje de la plata (Ag), otros elementos detectados en menor porcentaje son, el cobre (Cu), carbono (C) y oxígeno (O), con esto se confirma que la muestra no está contaminada y que el grado de pureza de plata es alta.
6. En la detección de compuestos fenólicos, mediante el efecto SERS, se obtuvieron las bandas características algunos compuestos fenólicos como ácido gálico (1025 cm^{-1}) y ácido ferúlico (1600 cm^{-1}), estos dan notas frutales, herbáceas y tropicales al vino, los taninos (1596 cm^{-1}) relacionados con propiedades sensoriales como amargor y astringencia.

ANEXOS

1.4.1 Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X, en inglés XRD, X-ray Diffraction, es una técnica ampliamente utilizada para el estudio de materiales, principalmente cristalinos. Existen en general dos tipos de difracción de rayos X en función de la muestra analizada: difracción de rayos X de monocristal (cristal único) y difracción de rayos X en polvo.

El principio de la difracción de rayos X se basa en la incidencia de un rayo X monocromático sobre una muestra en forma de polvo distribuido de manera aleatoria o de manera orientada, lo cual se logra mediante distintos métodos de preparación de la muestra. Los átomos forman planos, a medida que la muestra gira, el rayo que incide sobre estos es difractado a ángulos específicos (2θ) en función de su composición y estructura cristalina.[71]

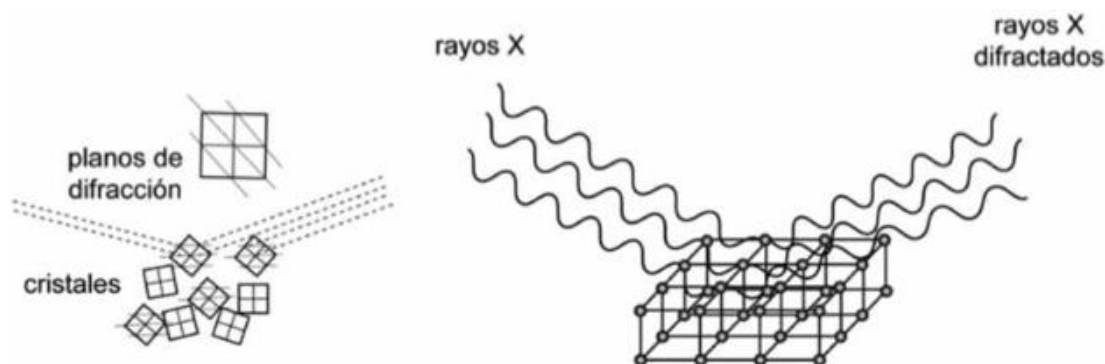


Fig. 30 Efecto de la interacción de rayos X con un material cristalino [71]

1.4.2 Espectroscopia UV-visible

Un espectrofotómetro ultravioleta-visible (UV-vis) utiliza una fuente de luz para iluminar una muestra con luz en todo el rango de longitud de onda del espectro UV y visible (habitualmente, entre 190 y 900 nm). Después, el instrumento mide la luz que absorbe, transmite o refleja la muestra en cada longitud de onda. [72]

A partir del espectro obtenido, resulta posible determinar las propiedades químicas o físicas de la muestra. Por lo general, esto permite lo siguiente:

- Identificar las moléculas de una muestra sólida o líquida.
- Determinar la concentración de una molécula específica en disolución.
- Caracterizar la absorbancia o transmitancia de un líquido o sólido en un rango de longitudes de onda.
- Caracterizar las propiedades de reflectancia de una superficie o medir el color de un material.
- Estudiar reacciones químicas o procesos biológicos

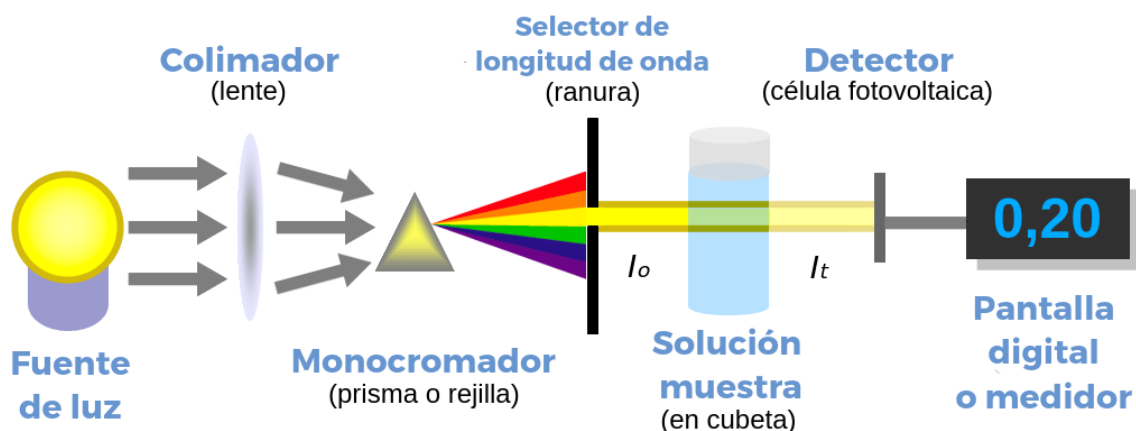


Fig. 31 Fundamento de Espectroscopia UV-visible. [73]

1.4.3 Micrografía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SE, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.[74]

El funcionamiento del SEM se basa en la emisión de un haz de electrones desde un cañón de electrones hacia la muestra. Este haz es enfocado y dirigido mediante lentes electromagnéticas y electrostáticas. Cuando los electrones golpean la superficie de la muestra, generan electrones secundarios y retrodispersados, así como rayos X característicos. Cada una de estas señales

aporta diferente información: los electrones secundarios proporcionan imágenes detalladas de la superficie, mientras que los electrones retrodispersados pueden revelar información sobre el contraste de los materiales. Los rayos X característicos, por su parte, permiten realizar análisis químicos elementales mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS). [75]

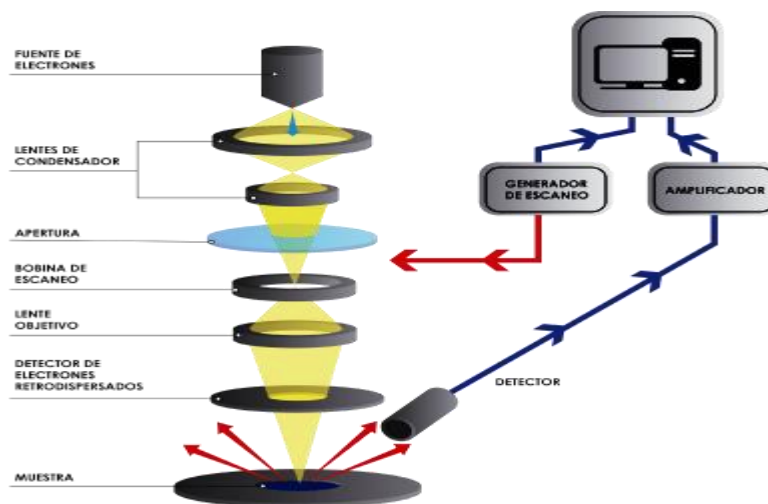


Fig. 32 Fundamento de Espectroscopia UV-visible. [76]

1.4.4 Espectroscopía UV-Vis

La espectroscopia UV-Vis es una técnica de medición basada en la absorción de radiación UV, por parte de las moléculas que componen a una sustancia, esta espectroscopia se trabaja en un intervalo de longitud de onda de 200 a 800 nm, brindando información de los estados energéticos, atómicos o moleculares, de la muestra de estudio.[77]

Cuando la radiación interacciona con la materia pueden ocurrir varios fenómenos tales como; reflexión, dispersión, absorción, etc. En la espectroscopia UV-visible la interpretación de los resultados suele hacerse en términos de la absorbancia, y esto se debe a que cuando la luz atraviesa la muestra, la cantidad de luz que es absorbida es la diferencia entre la intensidad de la radiación incidente y la cantidad de radiación transmitida.[78]

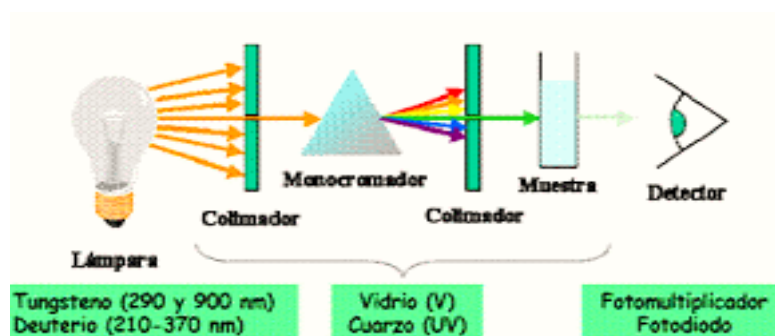


Fig. 33 Principio de funcionamiento de un espectro UV-visible. [78]

1.4.5 Espectroscopía Raman

La espectroscopía se originó como el estudio de la interacción entre radiación y materia en función de la longitud de onda. Actualmente la espectroscopía comprende el uso de los efectos de absorción, emisión o dispersión de radiación electromagnética por el material con el objetivo de estudiar cualitativa o cuantitativamente la materia.

La espectroscopía Raman es una técnica espectroscópica empleada para el análisis cuantitativo de prácticamente cualquier material, ya sea orgánico o inorgánico. Sus principales ventajas radican en que no es necesaria ninguna preparación de la muestra a estudiar y que se trata de un proceso no destructivo.[79]

El fundamento físico de la técnica está basado en el efecto Raman, este consistente en la dispersión inelástica de una fracción de la luz incidente en la muestra, la cual sufre entonces un cambio de frecuencia debido al intercambio de energía con la materia en dicha colisión, según la ecuación de energía de los fotones

$$\Delta E = h\Delta\nu$$

donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la luz incidente.

El procedimiento de medida es el siguiente: un haz de luz monocromático, de frecuencia ν_0 , incide sobre la muestra, dispersándose de manera elástica (dispersión Rayleigh) en su mayor parte, pero existiendo una cantidad de luz que ha sido dispersada inelásticamente, y por tanto presenta un cambio en su frecuencia. Estos cambios en la frecuencia son característicos de la naturaleza química y del estado físico de la muestra, y por tanto son los datos que permiten identificar distintos compuestos y características moleculares. [80]

Para obtener información molecular, se analizan los niveles de energía vibracionales, los cuales son característicos de los átomos del enlace, su conformación y su entorno. Estos niveles tienen frecuencias de resonancia características, las cuales son función de la masa de las moléculas y la fortaleza de

sus enlaces. A diferencia de la espectroscopía infrarroja, en la que es necesario un cambio en el momento dipolar de la molécula, para la espectroscopía Raman es necesario un cambio en la polarizabilidad, lo cual permite obtener información espectral complementaria sobre moléculas mononucleares.

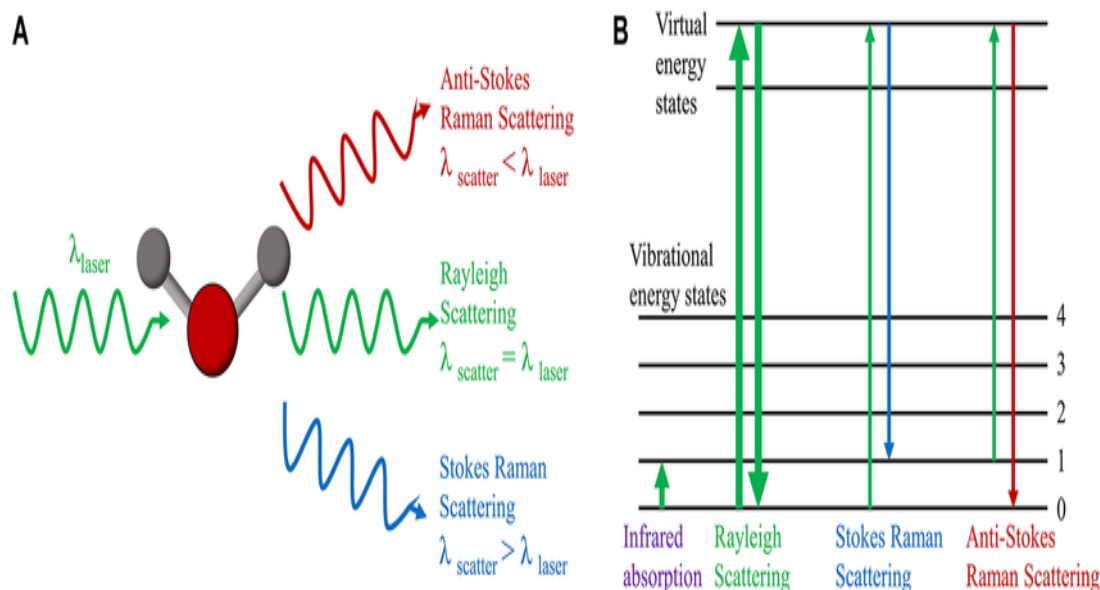


Fig. 34 Principio Raman [81]

1.4.5 Efecto SERS

El efecto SERS se basa en el aumento de la difusión inelástica (señal Raman), procedente de determinadas moléculas en presencia de una nanoestructura metálica rugosa especialmente preparada, cuya intensidad excede en un factor de 10^5 – 10^6 del que cabe esperar cuando la molécula no está ligada a la superficie metálica.

El efecto SERS está relacionado con la existencia de una geometría rugosa en la superficie metálica, el modelo electromagnético (EM) puede simplificarse considerando la intensificación de la señal Raman cuando una radiación de frecuencia ω_0 incide sobre una partícula esférica o esferoidal aislada. Es lo que se conoce como modelo de la esfera metálica y constituye la aproximación más simple al estudio teórico de estos sistemas. Según este modelo, la polarizabilidad de la molécula no se ve afectada por la presencia del metal. [80]

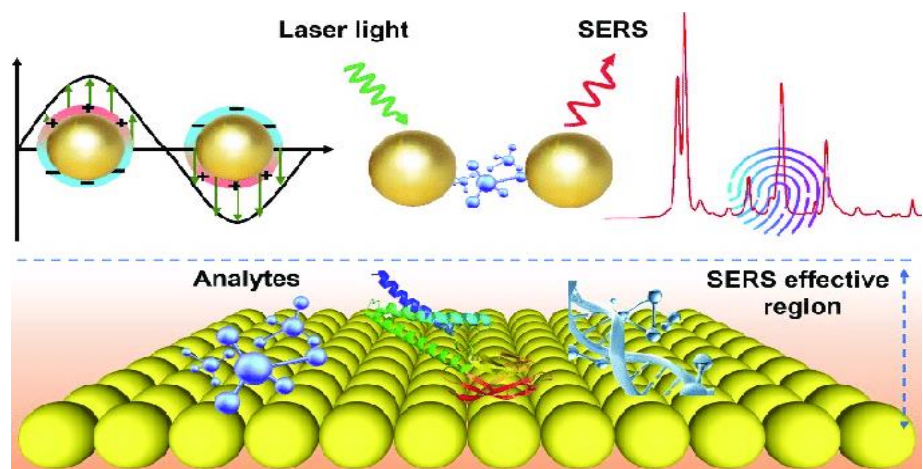


Fig. 35 Ilustración esquemática del mecanismo de SERS [82].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gleiter, H. (1999). Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure. Forschungszentrum Karlsruhe, Institute of Nanotechnology.
- [2] Simin Arabi (2024) Review on types of nanostructured materials. International Journal of New Chemistry., 2024; 11(1), 48-57. <https://doi.org/10.22034/ijnc.2023.2004410.1341>
- [3] Estrada-Flores, S. L., Garcías-Morales, C., Pérez Berumen, C. M., & Cantú-Sifuentes, L. (s. f.). Nanomateriales: conceptos, aplicación en nanoterapia y regulaciones. QuímicaViva. <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v22n1/E0242.htm>
- [4] Mosier-Boss, P. A. (2017). Review of SERS substrates for chemical sensing. Nanomaterials, 7(6), 142. <https://doi.org/10.3390/nano7060142>
- [5] Ealia, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263(3), 032019.
- [6] Pimpin, A., & Srituravanich, W. (2012). Review on micro- and nanolithography techniques and their applications. Engineering Journal, 16(1), 37–56 <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.37>
- [7] Hulteen, J. C., Treichel, D. A., Smith, M. T., Duval, M. L., Jensen, T. R., & Van Duyne, R. P. (1999). Nanosphere lithography: Size-tunable silver nanoparticle and surface cluster arrays. Journal of Physical Chemistry B, 103(19), 3854–3863.
- [8] Hincapié-Rojas, D. F., Rojas-Hernández, S. P., Castaño-González, F., Parra-Castaño, K. N., & Giraldo-Torres, L. R. (2020). Mesoporous silica nanoparticles obtention, functionalization and biomedical applications: a review. DYNA, 87(215), 239–253. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.88586>
- [9] Martinez, F. M., Zuñiga G., E., & Sanchez Lafarga, A. K. (2013). Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la nanotecnología. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en

Nanociencias y Nanotecnología, 6(10), 101–108.
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50967>

[10] Liang, A., Liu, Q., Wen, G., & Jiang, Z. (2012). The surface-plasmon-resonance effect of nanogold/silver and its analytical applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 37, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.03.015>

[11] Jawaad, R. S., Sultan, K. F., & Al-Hamadani, A. H. (2014). Synthesis of silver nanoparticles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(4), 586–592.

[12] Liu, X., Luo, L., & Wang, H. (2021). Recent advances in graphene-based sensors for molecular detection in industrial applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(20), 6432–6448. <https://doi.org/10.1039/D1TC00678H>

[13] Alberti, G., Zanoni, C., Magnaghi, L. R., & Biesuz, R. (2021). Gold and Silver Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: New Trends and Applications. *Chemosensors*, 9(11), 305. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9110305>

[14] Mohammad, Z. H., Ahmad, F., Ibrahim, S. A., & Zaidi, S. (2022). Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. *Discover Food*, 2, 12. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00013-9>

[15] Caro, C., Castillo, P. M., Klippstein, R., Pozo, D., & Zaderenko, A. P. (2010). Silver nanoparticles: Sensing and imaging applications. En D. P. Pérez (Ed.), *Silver Nanoparticles* (pp. 201–224). InTechOpen.

[16] de Almeida, M. P., Leopold, N., Franco, R., & Pereira, E. (2019). Expedite SERS fingerprinting of Portuguese white wines using plasmonic silver nanostars. *Frontiers in Chemistry*, 7, 368. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00368>

[17] Silva Yumi, J. E., & Medina Serrano, C. A. (2022). *Materiales y nanomateriales: Principios, aplicaciones y técnicas de caracterización*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2024-07-24-131511-Materiales%20y%20nanomateriales.pdf>

- [18] Bedolla, M., & Bedolla, M. (2023, 14 septiembre). Material characterization techniques. *Tecnologías Platypus*. https://www.platypustech.com/es/material-characterization-techniques?srsItd=AfmBOooniUNVVkK1RIEMnB-q21rC6kIVXqjVoYOrdqxA_3w4myEExHKB
- [19] Kefiwinery, & Kefiwinery. (2025b, abril 17). Global Wine Market: Trends, Challenges, and Opportunities. Kefi Vineyards & Winery » Estate Winery. <https://kefiwinery.com/global-wine-market-trends-challenges-and-opportunities/>
- [20] Turismodevino.com. (2025, 7 julio). Tipos de uva en el vino. Variedades y varietales. <https://turismodevino.com/saber-de-vino/tipos-de-uva-en-el-vino/>
- [21] Vid Mexicana (2023, 28 agosto). Los Mejores Vinos Mexicanos en un Solo Lugar <https://www.vidmexicana.com/blogs/hablemos-de-vinos/las-variedades-de-uva-para-vino-en-el-mundo>
- [22] Tsai, P.-C., Araujo, L. D., & Tian, B. (2022). Varietal aromas of Sauvignon Blanc: Impact of oxidation and antioxidants used in winemaking. *Fermentation*, 8, 686. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120686>
- [23] Faustino, & Faustino. (2022, 13 junio). Características de la uva Chardonnay. Bodegas Faustino Rivero Ulecia. <https://faustinorivero.com/vino/uvas-chardonnay/>
- [24] Peirano-Bolelli, P., Heller-Fuenzalida, F., Cuneo, I. F., Peña-Neira, Á., & Cáceres-Mella, A. (2022). Changes in the composition of flavonols and organic acids during ripening for three cv. Sauvignon Blanc clones grown in a cool-climate valley. *Agronomy*, 12(6), 1357. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061357>
- [25] mportancia biológica de los compuestos fenólicos | Inventio. (s. f.). Inventio, Revista de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma del Estado de México. <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/111/61>
- [26] Garrido, J., & Borges, F. (2013). Wine and grape polyphenols — a chemical perspective. *Food Research International*, 54, 1844–1858. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.08.002>

- [27] Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). Phenolic compounds in food. *Bolivian Journal of Chemistry*, 31(2), 68–81. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=426339682006>
- [28] Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., Velázquez-Ovalle, G., & Vázquez-Ovando, A. (2022). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 9–33. <https://doi.org/10.23850/24220582.4023>
- [29] Interempresas. (s. f.). VI Ferum Almendro & Pistacho. https://jornadas.interempresas.net/AlmendroPistacho2022/prensa-408794-estudio-revela-gran-poder-antioxidante-pistachos-mecanismos-proteccion-principales.html?utm_source=chatgpt.com
- [30] Cenusa, T. A., Aragón Revuelta, P., & Noguera Murray, P. (2016). Determinación de polifenoles en vinos mediante un sensor de Nanopartículas de Cerio (Trabajo Fin de Máster). Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/73813>
- [31] Dora M., Christopher O. & Arturo M. (2008) Medición de Fenoles y Actividad Antioxidante en Malezas Usadas para Alimentación Animal. Universidad Autónoma de Querétaro. Centro Universitario, Cerro de las Campanas.
- [32] Jared M. (2021) Desarrollo de un microdispositivo analítico basado en microfluídica de papel para la determinación simultánea del contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante en muestras de vino. Universidad Autónoma de México.
- [33] Floegel, A., Kim, D., Chung, S., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal Of Food Composition and Analysis*, 24(7), 1043-1048. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008>
- [34] Ruiz Benítez, M. L. (2020). Determinación de la actividad antioxidante. Ediciones Universidad Simón Bolívar. <https://hdl.handle.net/20.500.12442/7986>

- [35] Valdez J. (2015) Síntesis de nanopartículas metálicas utilizando bioreductores y su potencial aplicación en sensores plasmónicos. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [36] Beyene, H. D., Werkneh, A. A., Bezabh, H. K., & Ambaye, T. G. (2017). Synthesis paradigm and applications of silver nanoparticles (AgNPs): a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 13, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.08.001>
- [37] Calvillo, A. (2019). Evaluación de la viabilidad celular y la actividad antimicrobiana de nanopartículas de cobre (Tesis). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- [38] Hulteen, J. C., Treichel, D. A., Smith, M. T., Duval, M. L., Jensen, T. R., & Van Duyne, R. P. (1999). Nanosphere lithography: Size-tunable silver nanoparticle and surface cluster arrays. *Journal of Physical Chemistry B*, 103(19), 3854–3863. <https://doi.org/10.1021/jp9904771>
- [39] Habiba, K., Makarov, V. I., Weiner, B. R., & Morell, G. (2014). Fabrication of nanomaterials by pulsed laser synthesis. In W. Ahmed & N. Ali (Eds.), *Manufacturing nanostructures* (pp. 263–292). One Central Press. ISBN 978-1910086070.
- [40] Fraga J. et. al. (2021) Nanoestructuras metálicas y su resonancia de plasmones superficial. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, Ciudad de México, México. ISN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre, 2021, Volumen 5, Número 6. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.
- [41] Valls, J., Lampreave, M., Nadal, M., & Arola, L. (s.f.). Importancia de los compuestos fenólicos en la calidad de los vinos tintos de crianza. Recuperado el 17 de agosto de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Lluis-Arola/publication/242685248_Importancia_de_los_compuestos_fenolicos_en_la_calidad_de_los_vinos_tintos_de_crianza/links/00b49529cd9bfd1da6000000/Importancia-de-los-compuestos-fenolicos-en-la-calidad-de-los-vinos-tintos-de-crianza.pdf

- [42] Vazquez, J. (2025, 29 enero). ¿Qué es la Difracción de Rayos X (XRD)? - Espectrometria. Espectrometria. <https://espectrometria.com.mx/que-es-la-difraccion-de-rayos-x-xrd-y-por-que-es-tan-importante-para-la-industria/>
- [43] Martinez, F. M., Zuñiga G., E., & Sanchez Lafarga, A. K. (2013). Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la nanotecnología. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología, 6(10), 101–108. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50967>
- [44] Fermina, J. R., Salcedo, D. Y., Durante Rincóna, C., & Castro, J. A. (2017). Análisis de tensión/tamaño en compuestos ternarios AgIn_5VI_8 (VI = S, Se, Te) mediante difracción de rayos-X. Revista Mexicana de Física, 63(4), 345–350. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035-001X2017000400345&script=sci_arttext
- [45] Alanís, A. C., Maawad, G., Platt, C., & Álvarez, A. J. (2013). Determinación de un modelo de cinética de cristalización de ZnO. Química Hoy. Chemistry Sciences, 3(4), 26–34. <https://doi.org/10.29105/qh3.4-171>
- [46] Corzo Lucioni, A. (2012). Síntesis de nanopartículas de oro obtenidas por reducción de $\text{H}[\text{AuCl}_4]$. Revista de la Sociedad Química del Perú, 78(2), 79–90. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371937627003>
- [47] Peixoto, M., Leopold, N., & Franco, R. (2019). Expedite SERS fingerprinting of Portuguese white wines using plasmonic silver nanostars. Frontiers in Chemistry, 7, Article 368. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00368>
- [48] UNIVERSIDAD DE SONORA. (s. f.). Capítulo 3 [PDF]. Recuperado 3 de junio de 2025, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10604/Capitulo3.pdf>
- [49] Thanh, N. T. K., Maclean, N., & Mahiddine, S. (2014). Mechanisms of nucleation and growth of nanoparticles in solution. Chemical Reviews, 114(15), 7610–7630. <https://doi.org/10.1021/cr400544s>

- [51] Qian, Y., et al. (2017). A facile solvent-mediated self-assembly silver nanoparticle mirror substrate for quantitatively improved surface-enhanced Raman scattering. *Analyst*. <https://doi.org/10.1039/C7AN00784A>
- [52] Zhou N. et al (2014) Morphology and composition-controlled synthesis of flower-like silver nanostructures. *Nanoscale Research Letters*.
- [53] Pankaj U. et al. (2022) Detection of Carcinogenic Dye Sudan I and Rhodamine B Using Indigenous Raman Spectrometer. e-ISSN: 2349-0659
- [54] Qu, Y., Tian, Y., Chen, Y., & He, L. (2020). Chemical profiling of red wines using surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). *Analytical Methods*, 12(10), 1324-1332.
- [55] Mathlouthi M, Luu DV (1980) Laser-Raman spectra of D-glucose and sucrose in aqueous-solution. *Carbohydr Res* 81:203–212
- [56] De Gelder J, De Gussem K, Vandenabeele P, Moens L (2007) Reference database of Raman spectra of biological molecules. *J Raman Spectrosc* 38:1133–1147. <https://doi.org/10.1002/jrs.1734>
- [57] Mudalige, A., & Pemberton, J. E. (2007). Raman spectroscopy of glycerol/D₂O solutions. *Vibrational Spectroscopy*, 45(1), 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2007.04.002>
- [58] Aguilar-Hernandez, I., Afseth, N. K., Lopez-Luke, T., Contreras-Torres, F. F., Wold, J. P., & Ornelas-Soto, N. (2017). Surface enhanced Raman spectroscopy of phenolic antioxidants: A systematic evaluation of ferulic acid, p-coumaric acid, caffeic acid and sinapic acid. *Vibrational Spectroscopy*, 89, 113e122.
- [59] Martin, C., Bruneel, J.-L., Castet, F., Fritsch, A., Teissedre, P.-L., Jourdes, M., et al. (2017). Spectroscopic and theoretical investigations of phenolic acids in white wines. *Food Chemistry*, 221, 568-575.
- [60] Zaffino C, Bruni S, Russo B, Pilu R, Lago C, Colonna GM (2016) Identification of anthocyanins in plant sources and textiles by surface-enhanced Raman

spectroscopy (SERS). *J Raman Spectrosc* 47(3):269–276.
<https://doi.org/10.1002/jrs.478>

[61] Schnabel T, Musso M, Tondi G (2014) Univariate and multivariate analysis of tannin-impregnated wood species using vibrational spectroscopy. *Appl Spectrosc* 68(4):488–494. <https://doi.org/10.1366/13-07181>

[62] Aguilar-Hernandez, I., Afseth, N. K., Lopez-Luke, T., Contreras-Torres, F. F., Wold, J. P., & Ornelas-Soto, N. (2017). Surface enhanced Raman spectroscopy of phenolic antioxidants: A systematic evaluation of ferulic acid, p-coumaric acid, caffeic acid and sinapic acid. *Vibrational Spectroscopy*, 89, 113-122.

[63] Vongsivut, J., Robertson, E. G., & McNaughton, D. (2008). Surface-enhanced Raman scattering spectroscopy of resveratrol. *Australian Journal of Chemistry*, 61(12), 921-929

[64] Casassa, L. F., & Harbertson, J. F. (2014). Extraction, evolution, and sensory impact of phenolic compounds during wine production. *Annual Review of Food Science and Technology*, 5, 83–109. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030713-092438>

[65] Waterhouse, A. L., Sacks, G. L., & Jeffery, D. W. (2016). *Understanding wine chemistry*. John Wiley & Sons.

[66] Ferrer-Gallego, R., Hernández-Hierro, J. M., Rivas-Gonzalo, J. C., & Escribano, T. (2014). Sensory evaluation of bitterness and astringency sub-qualities of wine phenolic compounds. *Food Research International*, 62, 1100–1107. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.049>

[67] Choi, K.-O., Lee, D. H., Park, S. J., Im, D., & Hur, Y. Y. (2020). Correlations between phenolic composition and perceived astringency of wines. *Applied Sciences*, 10(22), 8020. <https://doi.org/10.3390/app10228020>

[68] Pilot, R., Signorini, R., Durante, C., Orian, L., Bhamidipati, M., & Fabris, L. (2019). A review on surface-enhanced Raman scattering. *Biosensors*, 9(2), 57. <https://doi.org/10.3390/bios9020057>

- [69] Chen, Y., et al. (2021). Surface-enhanced Raman spectroscopy for food analysis: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 136, 116199. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116199>
- [70] Seabrook, A. (2019, enero). White wine phenolics: what compounds are there and which ones cause problems? *Grapegrower & Winemaker* (Issue 660), 53–54. Recuperado de <https://winetitles.com.au/gwm/articles/january-660/white-wine-phenolics-what-compounds-are-there-and-which-ones-cause-problems/>
- [71] Jorge E. & Carlos A. (2022) *Materiales y nanomateriales. Principios, aplicaciones y técnicas de caracterización*. ESPOCH. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://cimogsys.espoch.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2024-07-24-131511-Materiales%20y%20nanomateriales.pdf>
- [72] Bedolla, M., & Bedolla, M. (2023, 14 septiembre). Material characterization techniques. *Tecnologías Platypus*. https://www.platypustech.com/es/material-characterization-techniques?srltid=AfmBOooniUNVVkK1RIEMnB-q21rC6klVXqjVoYOrdqxA_3w4myEExHKB
- [73] Componentes del espectrofotómetro - Labster. (s. f.) <https://theory.labster.com/es/spec-components/>
- [74] Microscopía electrónica de barrido. (s. f.). SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN. <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- [75] Microscopía electrónica de barrido. (s. f.). SERVICIOS CENTRALES DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN. <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- [76] ¿Qué es y cómo funciona un microscopio electrónico de barrido? (s. f.). <https://www.blog.metalinspec.com.mx/que-es-y-como-funciona-un-microscopio-electronico-de-barrido>
- [77] Maldonado J. et. al. (2018) *La espectroscopia UV-vis en la evaluación de la viabilidad de células de cáncer de mama*. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada.

[78] Pérez E., Almazán V. (2015) Síntesis de nanopartículas de plata y estudio de la estabilidad temporal de sus propiedades ópticas. Centro de investigación en materiales avanzados. S. C.

[79] Machado S, Pacheco J G, Nouws H P A, Albergaria J T and Delerue Matos C 2015 Characterization of green zero valent iron nanoparticles produced with tree leaf extracts Sci. Environ. 533 76 81

[80] Liu, K., Zhao, Q., Li, B., & Zhao, X. (2022). Raman Spectroscopy: A Novel Technology for Gastric Cancer Diagnosis. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.856591>

[81] Ayala D. (2018) Estudio Raman y aplicación verde de té e infusiones. Universidad Autónoma de México. Facultad de química.

[82] Xie L. et. al. (2021) State of the art in flexible SERS sensors toward label-free and onsite detection: from design to applications. *Nano Research*. ISSN 1998-0124 CN 11-5974/04.