



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

TESIS

**Como requisito para obtener el grado académico de:
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ÓPTICA)**

**Tesis presentada por:
Lic. en Fís. IZCOATL SAUCEDO OROZCO**

**Con el tema:
APLICACIONES POLARIMETRICAS PARA LA
IDENTIFICACION DE ADULTERACIONES EN LA MIEL
DE ABEJA**

**Asesor de tesis:
DR. RAFAEL ESPINOSA LUNA**

Versión definitiva. Incluye cambios sugeridos por revisores de tesis.

LEÓN, GUANAJUATO DICIEMBRE DEL 2012

Agradecimientos.

Un sincero agradecimiento al Centro de Investigaciones en Óptica A. C, por brindarme la oportunidad de formar parte de tan importante centro de conocimientos en la óptica. Al CONACYT por el apoyo económico que se me ha otorgado durante este periodo mediante una beca para mis estudios de Maestría en Ciencias (Óptica), así como al proyecto 100361 que hizo posible el contar con el equipo experimental para la realización de mi trabajo de tesis. En especial al Dr. Rafael Espinosa Luna quien bajo su dirección este trabajo fue posible, aprendiendo día con día el valor del trabajo científico, llegando a ser un ejemplo a seguir no solo como investigador sino como la calidad de ser humano que representa. Al Dr. Claudio Fraustro Reyes por la ayuda en las mediciones y asesoría con la técnica Raman. Al Dr. Victor Joel Pinto Robledo por su contribución como sinodal en la tesis al igual que el Dr. Claudio Fraustro Reyes.

A mis padres Bruno y Araceli, mis hermanos Huitzilihuitl y Bruno que en este y en muchos momentos y redacciones están y seguirán presentes. A mis amigos que suelo saludar y a los que solo los puedo recordar.

Gracias...

Resumen.

El objetivo del presente trabajo de tesis es el desarrollo de un estudio de factibilidad que permita, mediante técnicas ópticas, la identificación de parámetros polarimétricos que sean capaces de identificar cambios en mieles adulteradas respecto a mieles genuinas. Para ello, se utilizan técnicas polarimétricas basadas en las formulaciones de Mueller y Stokes, así como en la técnica de espectroscopia Raman. Esta última se aplica con el objetivo de identificar alguna posible respuesta óptica al fenómeno de maduración de la miel. Se utilizó una serie de mieles comerciales envasadas, las cuales fueron estudiadas por la Procuraduría Federal del Consumidor, PROFECO, en estudios independientes, las cuales fueron utilizadas como referente en este trabajo. Los resultados obtenidos permiten concluir que sí es posible identificar cambios en la respuesta polarimétrica asociada a mieles puras y a mieles adulteradas.

Índice.

Capítulo 1.....	1
Introducción.....	1
1.1Planeamiento del Problema.....	2
1.2 Miel de Abeja.....	3
1.3 Objetivo General.	7
Capítulo 2.....	8
Marco Teórico.	8
2.1 Polarización de la Luz.	8
2.2 Parámetros de Stokes.....	12
2.3 Matrices de Mueller.....	20
2.4 Esfera de Poincaré.	28
2.5 Espectroscopia Raman.....	30
Capítulo 3.....	35
Resultados Experimentales.....	35
3.1 Montaje experimental.	36
3.2 Espectroscopia Raman.....	39
3.3 Resultados Experimentales.	41
Capítulo 4.....	74
Conclusiones.....	74
4.1 Caracterización polarimétrica de la miel.	74
4.2 Estudio Raman de la miel.	75
4.3 Trabajo a futuro.....	76
Bibliografía.....	77
Apéndice A.....	80
Matrices de Mueller de las muestras de miel e imágenes de las presentaciones en el mercado. ..	80
Apéndice B.....	84
Presentación de resultados en congresos.....	84

Capítulo 1.

Introducción.

El objetivo del presente trabajo de tesis es el desarrollo de un estudio de factibilidad que permita, mediante técnicas ópticas, la identificación de parámetros polarimétricos que sean capaces de identificar cambios en mieles adulteradas respecto a mieles genuinas.

Para ello, se presenta un estudio aplicado a la autenticación de mieles nacionales mediante métodos ópticos, en especial técnicas polarimétricas basados en las teorías de Mueller y Stokes así como en la técnica de espectroscopia Raman. Esta última se aplica con el objetivo de identificar alguna posible respuesta óptica al fenómeno de maduración de la miel. Se utilizó una serie de mieles comerciales envasadas, las cuales fueron estudiadas por la Procuraduría Federal del Consumidor, PROFECO, en estudios independientes, las cuales fueron utilizadas como referente en este trabajo.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se detalla las teorías relacionadas con la metodología teórica a utilizarse para cumplir con dicho objetivo, explicando como las teorías de polarización pueden ser aplicadas a la solución de este tipo de problemas. Se desarrolla la matemática necesaria para entender los procedimientos experimentales y poder dar una interpretación a los resultados que arroje para cada una de las mieles.

En el Capítulo 3 se presentan la metodología seguida para el montaje del sistema óptico, para el generador de estados de polarización (PSG) y analizador de estados de polarización (PSA), se detallan cada uno de los implementos ópticos que involucra el arreglo experimental. En este mismo apartado de la tesis se presentan los resultados para cada una de la mieles, algunas de las métricas de polarización que distinguen a cada muestra así como representaciones graficas de los cambios en los estados de polarización generados por las mieles y los espectros Raman de cada muestra y una interpretación los resultados de cada estudio realizado.

En el Capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos, buscando cumplir el objetivo general de este trabajo de tesis, destacando las ventajas y limitantes

que presenta esta alternativa en la caracterización óptica de la miel. Cotejando los resultados obtenidos con las referencias a estudios ya existentes, que a pesar de ser obtenidos por diferentes métodos, hemos podido llegar a resultados concluyentes. Se presentan propuestas de trabajo a futuro utilizando otro tipo de muestras traslúcidas que permitan generar interés en el estudio mediante esta técnica polarimétrica.

1.1 Planeamiento del Problema.

El desarrollo de civilizaciones humanas se ha sustentado en el uso y consumo de los recursos naturales; la apicultura tiene raíces en los primeros asentamientos humanos por lo que se considera como una actividad que ha crecido junto con las civilizaciones. La apicultura es una actividad orientada a la crianza de abejas con el objetivo de obtener en su prioridad la miel de abeja y algunos de sus derivados.

La miel se entiende como una sustancia dulce de origen natural producida por abejas que a partir del néctar de las flores o de secreciones de algunas plantas, las abejas transportan, combinan y transforman con sustancias propias de las abejas para quedar almacenada en el panal hasta que esta madure y este apta para su consumo.

Con la definición general de la miel mencionada anteriormente los azúcares que no son procesados por la abeja no son mieles, por lo que resulta suficiente con el solo hablar de miel de abeja. Por otro lado, el origen botánico confiere las características aromáticas, de color, consistencia y sabor; esta amplia variedad de mieles hace que la identificación de una miel sea difícil [1,2].

La miel en el mundo presenta diferentes variaciones en color, olor y sabor, debido a los diferentes factores como el medio ambiente de donde las abejas recolectan el néctar de las flores, los distintos tipos de floraciones y las especies florales de las cuales dependen los azúcares que contiene el néctar o polen recolectado. Sin embargo, todas las mieles presentan variaciones en porcentaje de los tres componentes principales de la miel como lo es la fructuosa, glucosa y agua, esto dependiendo del lugar de procedencia de la miel.

La importancia de la apicultura en nuestro país ha llevado a México al cuarto lugar en producción de miel y tercer lugar en exportación a nivel mundial. Las exigencias en la calidad así como las pruebas necesarias para su autenticación están descritas en las normas mexicanas NOM-F-036-1981 y la norma NOM-051-SCFI-1994. En estas normas se realizan diversos estudios físico-químicos para su total validación como una miel auténtica, cabe mencionar que las normas que rigen la calidad de la miel han sido tomadas de documentos ya existentes de normas de diferentes países.

Con el crecimiento del mercado nacional e internacional se presentan diversas formas de adulteración que permiten la confusión del producto original, una vez presente algún azúcar ajena o algún tipo de adulterante en la miel pierde en su totalidad las propiedades nutrimentales que la caracterizan hasta llegar a ser un alimento nocivo para la salud.

1.2 Miel de Abeja.

La Norma Oficial Mexicana NOM-051-SCFI-1994 establece que la miel es “la sustancia dulce natural producida por las abejas a partir del néctar de las flores o de secreciones o de otras partes vivas de la planta, que las abejas recogen, transforman, combinan con sustancias específicas propias y almacenan en panales, de los cuales se extrae el producto sin ninguna adición”. Sin embargo la miel constituye uno de los endulzantes más antiguos que ha conocido el hombre a través de los años; su composición no es sencilla. Los carbohidratos tienen mayor presencia en esta sustancia dulce, los que destacan son la fructuosa y glucosa, sin dejar a un lado las sustancias de menor proporción como lo son los aminoácidos, ácidos orgánicos, antioxidantes, vitaminas y minerales. Todo esto en conjunto hace que la miel no solo sea considerada un endulzante natural sino una sustancia con propiedades nutrimentales y curativas en algunos aspectos [3].

La composición de la miel depende de diversos factores como el tipo de planta, condiciones ambientales, suelo, entre otras. En la antigüedad la miel no solo era considerada como alimento sino también como una sustancia medicinal; hoy en día se ha demostrado que la miel es una fuente natural de

antioxidantes, contando además con propiedades antibacteriales por su contenido de peróxido de hidrógeno, flavonoides y ácidos fenólicos. Las utilidades van variando dependiendo de los diferentes países o culturas que para cada una de ellas tiene un significado nutrimental hasta llegar al religioso para la miel de abeja.

1.2.1 Propiedades físico-químicas de la miel.

La composición de la miel depende de las fuentes donde las abejas recolectan el polen, las prácticas de apicultura realizadas por el productor y las condiciones ambientales a las que ha estado expuesta.

Los carbohidratos son los elementos que predominan en la miel. De los carbohidratos o azúcares, los principales son la fructuosa y la glucosa, estos representan un 85% de contenido en la miel, esta representa una mezcla o solución de gran cantidad de azúcares disueltos en agua. Existen en la miel otros 25 diferentes tipos de azúcares en menores concentraciones.

El agua es una de las características más importantes de la miel, con ella está relacionado el contenido de humedad, factores ambientales a los que estuvo expuesto el néctar (líquido rico en azúcares producido por la plantas). Una miel madura contiene hasta un 18.5% de humedad, cuando se supera este nivel es propensa a la fermentación. El contenido de agua influye en el color, viscosidad y peso específico, el contenido de humedad puede cambiar no solo por las condiciones ambientales sino también por las condiciones de almacenamiento de la miel.

Las enzimas son añadidas por las abejas con el fin de lograr el proceso de maduración del néctar a miel, estas enzimas son las responsables de la complejidad en la estructura de la miel dándole sus propiedades antioxidantes y antibacteriales. Las enzimas se involucran en el proceso de transformación de tres azúcares básicos del néctar y a otros 25 azúcares adicionales, una de las más importantes por mencionar es la α -glucosidasa conocida como sucrasa que convierte el disacárido sacarosa en los monosacáridos fructuosa y glucosa [4].

La miel contiene aproximadamente un 0.5% de proteínas como enzimas y aminoácidos. Alrededor de 20 proteínas no enzimáticas se ha detectado en la miel, algunas de ellas generadas por la abeja y otras por el néctar de las flores. Los aminoácidos reaccionan con algunos azúcares para producir los colores amarillo o café que dan el oscurecimiento a la miel.

Los ácidos orgánicos en la miel agregan el toque de dulzura así como del pH estable en la miel (3.5 a 5.5). La cantidad de vitaminas y minerales se presentan en muy bajas proporciones, siendo el potasio el elemento de mayor presencia en la miel. Los azúcares son la principal componente del sabor en la miel, el alto contenido de fructuosa hace más dulce la miel que un alto contenido de glucosa, el aroma de la miel depende directamente de los ácidos y aminoácidos. El color de la miel está relacionado con el contenido de minerales, polen y compuestos fenólicos, las mieles oscuras tienen un alto contenido en fenoles y consecuentemente una alta capacidad antioxidante [4].

La evaluación de la calidad en la miel consiste en diversos parámetros relacionados con las cualidades antes mencionadas. Unos de los puntos a revisión es la ausencia de contaminantes (antibióticos, pesticidas y metales pesados). Los índices de frescura de la miel, se determinan por su contenido de hidroximetilfurfural (HMF) y la actividad diastática. La HMF aumenta en las mieles cada mes de envejecimiento, por lo que es una clara medida de madurez en la miel; la diastasa es una enzima natural en las mieles frescas, donde sus niveles disminuyen durante el almacenamiento o calentamiento.

Existen métodos de comprobación de calidad en la miel donde destacan la presencia de azúcares reductores, altos contenidos en sacarosa, glucosa, humedad, cenizas, acidez y los anteriores ya mencionados. Importante señalar que el análisis óptico en este tipo de estudios de calidad no ha sido explotado como lo ha sido en otras áreas de investigación dirigidas al análisis de calidad en alimentos y complementos alimenticios.

El proceso de pasteurización que utilizan las grandes industrias que comercializan la miel hace que permanezca líquida. En este proceso la pasteurización mata las levaduras, destruye los cristales, aumentando la sucrosa de un 80 a 100%; no modifica los azúcares y provoca la formación de

hidroximetilfurfural (HMF), tal como se encuentra en mieles viejas o calentadas.

La pasteurización de la miel disminuye su riqueza enzimática, que es la garantía del proceso que solo pueden realizar las abejas y el fundamento de sus propiedades nutritivas. El proceso de pasteurización se realiza mediante un calentamiento de la miel entre 78⁰ C y 82⁰ C, lo que destruye principalmente las estructuras cristalinas de los azúcares. Si el proceso de calentamiento no es el adecuado la miel puede cambiar su tonalidad, olor, sabor y todas sus propiedades quedando solo como caramelo de azúcares [3-4].

La cristalización de la miel es un fenómeno importante, la granulación o cristalización consiste en la formación de cristales de azúcar dentro de la miel; es decir, es la separación de glucosa en forma sólida. Teniendo en cuenta que la miel es químicamente una solución sobresaturada de azúcares, estos tienden a precipitar; es decir, a formar cristales sólidos según las proporciones de glucosa, fructosa y agua [4].

De esta característica de cristalización depende mucho la calidad de la miel. Las mieles son de consistencia fluida en el momento de su extracción y a poco tiempo de este proceso la miel inicia el proceso de cristalización o también conocido este proceso como de solidificación. Existen mieles que pueden tardar días o hasta años para experimentar este fenómeno de cristalización de manera natural; este proceso es posible acelerarlo por calentamiento o retardarlo mediante su enfriamiento.

Los estudios físicos y químicos aplicados al problema de la adulteración, contaminación y origen floral de la miel inician con el estudio del pH, posteriormente con la conductividad eléctrica, color de la miel, contenido de fructuosa y sacarosa, HMF, entre otros. Obteniendo a partir de estos estudios parámetros entre las componentes la miel sin importar la procedencia de la miel. La siguiente tabla 1.1 presenta algunos de ellos con el fin de observar las condiciones para que sea considerada una miel como auténtica [5].

Medida.	Medio	Mínimo	Máximo
<i>Agua</i>	16.3	13.4	24.6

<i>Fructuosa</i>	37.8	24.6	49.8
<i>Glucosa</i>	30.2	18.5	40.0
<i>Sacarosa</i>	0.5	0.0	5.5
<i>Razón Fructuosa/Glucosa</i>	1.28	0.90	2.11
<i>Razón Glucosa/Agua</i>	1.90	1.09	2.60
<i>HMF</i>	10	0	112
<i>Conductividad Eléctrica</i>	0.61	0.10	1.70
<i>pH</i>	4.4	3.5	6.1

Tabla 1.1 Componentes característicos medibles para la autenticación de la miel de abeja.

1.3 Objetivo General.

El objetivo en el que se centra este trabajo de tesis es en la búsqueda de una metodología alternativa con bases en la óptica, principalmente con el uso de luz polarizada, con la finalidad de identificar métricas de polarización que respondan a los adulterantes en la miel de abeja así como en el proceso inevitable de cristalización de la miel.

Las adulteraciones con azúcares procesados como lo es la fructuosa comercial generan cambios en los estados de polarización al ser diferentes concentraciones de azúcares no naturales de la miel, cambiando acidez, coloración y proceso de maduración (cristalización de la miel o generando un proceso de fermentación), cambios que se ven reflejados en los estudios con luz polarizada. La determinación de una métrica de polarización capaz de determinar los cambios entre mieles en función a los cambios en el estado de polarización resultantes.

El estudio de la miel con espectroscopia Raman se concentra en la determinación de los espectros correspondiente a las cantidades de agua que contenga la muestra de miel, adulterada y sin adulterar. Recordando que las mieles naturales contiene un porcentaje de agua, ésta puede manejarse como un factor de adulteración en mieles existentes en el mercado.

Capítulo 2.

Marco Teórico.

En esta sección se describe la teoría que respalda este trabajo de tesis. El desarrollo de una teoría ondulatoria de la luz para poder entender el fenómeno de polarización, así mismo, se presentan diversas metodologías enfocadas en el estudio de sistemas ópticos basados en teorías de luz polarizada.

2.1 Polarización de la Luz.

La polarización óptica fue descubierta por E. L. Malus. Esta teoría fue desarrollada con el objetivo de dar una explicación acerca de las propiedades ópticas de algunos materiales. La polarización la podemos describir por medio de una orientación específica del campo eléctrico en un periodo de oscilación. La polarización o estado de polarización es una propiedad común para todo tipo de ondas electromagnéticas. Las ondas electromagnéticas se describen por cuatro vectores: el campo eléctrico \mathbf{E} , campo de desplazamiento eléctrico \mathbf{D} , campo magnético \mathbf{H} y la densidad de flujo magnético \mathbf{B} .

Al considerar el campo eléctrico como una onda transversal la luz toma un sentido vectorial; es decir, una dirección de propagación en particular. Cuando una onda transversal está polarizada linealmente sus oscilaciones ocurren en una dirección fija.

La propagación de la luz la podemos describir mediante la ecuación de onda, la cual se deduce de las ecuaciones de Maxwell. La ecuación de onda en el vacío está definida como:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad \nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

El campo eléctrico y magnético son cantidades vectoriales que puede variar en cualquier dirección, siendo mutuamente ortogonales entre sí y ortogonales ambas a la dirección de propagación en el vacío. Una solución a la ecuación de onda (1) se representa de la siguiente forma:

$$\vec{E}(r, t) = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta) \quad (2)$$

Donde $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ es el vector de posición, k es el llamado vector de onda, el módulo de este es llamado número de onda:

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

El término de variación espacial $\varphi = -\vec{k} \cdot \vec{r} + \delta$, es llamado la fase espacial. También es posible describir una onda en notación exponencial.

$$\vec{E}(r, t) = E_0 \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta) = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)} \quad (3)$$

La naturaleza vectorial de la luz es llamada polarización. La luz se considera bien descrita una vez que se conocen sus componentes transversales. Tomando como la dirección de propagación el eje z , la onda en el espacio libre queda descrita de la siguiente forma.

$$E_x(z, t) = E_{0x}(t) \cos(\omega t - kz + \delta_x(t)) \quad (4)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y}(t) \cos(\omega t - kz + \delta_y(t)) \quad (5)$$

Donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes máximas y δ_x y δ_y son fases arbitrarias asociadas a cada componente de la onda.

Las ecuaciones (4) y (5) ayudan a determinar lo que se conoce como ecuación general de la elipse de polarización, esta ecuación se presenta como un estado de polarización general del cual se generan los diferentes estados de polarización particulares.

El estado de polarización elíptico corresponde al caso más general para un campo eléctrico monocromático. Para la deducción de la ecuación general de polarización las ecuaciones (4) y (5) se multiplican por funciones trigonométricas en diferentes secuencias para obtener las siguientes relaciones. Se realiza el cambio de variables polarimétricas de x a p y de y a s .

$$\frac{E_{op}(z,t)}{E_{op}} \text{sen}(\delta_s) - \frac{E_{os}(z,t)}{E_{os}} \text{sen}(\delta_p) = \cos(\tau) \cos(\delta_s - \delta_p) \quad (6)$$

$$\frac{E_{op}(z,t)}{E_{op}} \cos(\delta_s) - \frac{E_{os}(z,t)}{E_{os}} \cos(\delta_p) = \text{sen}(\tau) \text{sen}(\delta_s - \delta_p) \quad (7)$$

Las ecuaciones (6) y (7) son elevadas al cuadrado y sumadas para dar como resultado la ecuación general de polarización.

$$\frac{E_{op}(z,t)^2}{E_{op}^2} + \frac{E_{os}(z,t)^2}{E_{os}^2} - 2 \frac{E_{op}(z,t)}{E_{op}} \frac{E_{os}(z,t)}{E_{os}} \cos(\delta_s - \delta_p) = \text{sen}^2(\delta_s - \delta_p) \quad (8)$$

De la ecuación anterior se derivan los demás estados de polarización, para esto es necesario conocer las condiciones asociadas a cada estado de polarización. La diferencia de fases, así como la relación entre las amplitudes de campo eléctrico son los parámetros que definen el estado degenerado o estados de polarización lineales o circulares [6].

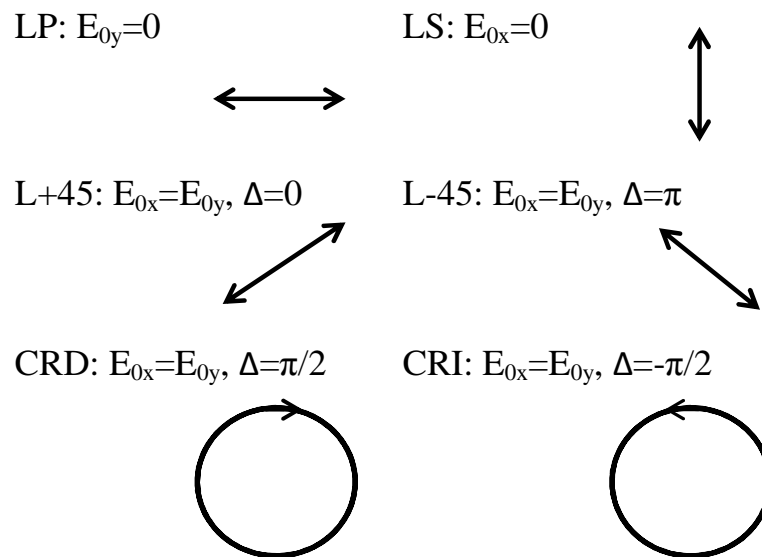
La diferencia de fase $\Delta = \delta_s - \delta_p$ puede tomar diferentes valores, los más significativos son cuando las funciones trigonométricas presentan un comportamiento de máximo o mínimo, para estos valores $\Delta = 0, \pi$ y $\pm\pi/2$.

Si $\Delta = 0$ tendremos polarización horizontal lineal (polarización p), si $\Delta = \pi$ tendremos polarización vertical (polarización s), estas polarizaciones ocurren bajo la condición de que una de las amplitudes de los campos sea cero para una de las componentes. Bajo estas condiciones en Δ y teniendo en cuenta que las amplitudes de los campos sean las mismas, el resultado será polarización lineal a $\pm 45^\circ$.

Cuando la diferencia de fase presenta los valores de $\Delta = \pm\pi/2$, el resultado será polarización elíptica; donde el signo define la dirección de giro del campo eléctrico. Cuando tenemos que las amplitudes del campo son iguales entre sí, tendremos polarizaciones circulares derecha (+) o izquierda (-), según sea el valor del signo.

Como se describió anteriormente, la combinación de amplitudes y diferencias de fase dan como resultado lo que se llama estados de polarización

degenerados, podemos observar las siguientes relaciones entre amplitudes y fases tomando el criterio de la descripción del campo observando hacia la fuente:



Donde los estados de polarización lineales horizontales o paralelos al plano de incidencia se representan por LP, los verticales o perpendiculares al plano de incidencia por LS y los estados lineales orientados a ± 45 grados respecto al plano de incidencia, como L+45 y L-45, respectivamente. Los estados de polarización circular derecha se representan como CRD y como CRI los asociados a polarización circular izquierda. El estado de polarización elíptico es de igual importancia que sus estados degenerados por lo que se le asocian diversos parámetros de polarización que lo caracterizan. En la figura 1 observamos un estado de polarización elíptico, las características que lo distinguen son: amplitudes (E_{0x}, E_{0y}), ángulo de rotación (ψ) y elipticidad (χ). En la figura 2.1 vemos una elipse rotada un ángulo ψ .

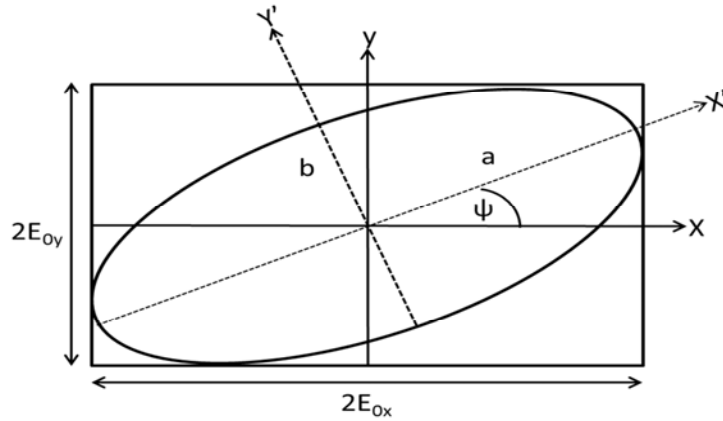


Figura 2.1. Elipse de polarización rotada.

El ángulo de rotación está definido mediante la siguiente relación.

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \Delta \quad 0 \leq \psi \leq \pi \quad (9)$$

Otro parámetro importante es el ángulo de elipticidad, que está directamente relacionado con los ejes de la elipse, eje mayor y eje menor [7].

$$\tan \chi = \frac{\pm b}{a} \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

2.2 Parámetros de Stokes.

En la búsqueda de nuevas representaciones de los estados de polarización, como fue anteriormente descrita la elipse de polarización, se puede apreciar que esta descripción es agradable pues de una sola ecuación se derivan los restantes estados. Es importante señalar que como toda teoría tiene limitantes para la descripción total de un estado de polarización, la elipse de polarización es una idealización de la descripción de un haz de luz en un plano fijo a medida que se propaga durante un ciclo temporal completo. En general la naturaleza de la luz es no polarizada o parcialmente polarizada,

características que no son posibles describir mediante la elipse de polarización. Lo que lleva a la necesidad de realizar un promedio del campo eléctrico en el tiempo para la total descripción de un estado de polarización.

En 1852, Sir George Gabriel Stokes descubre que la polarización puede ser descrita en términos de observables, como son las intensidades. Su desarrollo lo lleva a la posibilidad de representar cualquier estado de polarización en cuatro cantidades medibles llamados parámetros de Stokes [7].

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

En la deducción de los parámetros de Stokes, se inicia de las ecuaciones (4) y (5), las amplitudes, las fases y su frecuencia ω varían con el tiempo, muy lento comparado con la rapidez en la variación de la función coseno [7]. Para representar la ecuación general de polarización (8) en términos de observables del campo óptico, es necesario realizar un promedio en el tiempo de observación. El promedio en el tiempo es representado por el símbolo $\langle \dots \rangle$ y se define de la siguiente forma.

$$\langle E_i(t)E_j(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t)E_j(t) dt \quad i, j = x, y \quad (12)$$

Para poder aplicar la ecuación de promedio en el tiempo a la ecuación de elipse de polarización, es necesario multiplicar esta ecuación por $4E_{0x}^2 E_{0y}^2$, resultando la ecuación (13a). Aplicando a las ecuaciones (4) y (5) el promedio temporal (12), dando como resultado.

$$4E_{0y}^2 \langle E_x(t)^2 \rangle + 4E_{0x}^2 \langle E_y(t)^2 \rangle - 8E_{0y}E_{0x} \langle E_x(t)E_y(t) \rangle \cos\Delta = (2E_{0y}E_{0x} \sin\Delta)^2 \quad (13a)$$

$$\langle E_x(t)^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{0x}^2 \quad (13b)$$

$$\langle E_y(t)^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{0y}^2 \quad (13c)$$

$$\langle E_x(t)E_y(t) \rangle = 2E_{0x}E_{0y} \cos \Delta \quad (13d)$$

Con la sustitución de las ecuaciones anteriores en la relaciones (13) podemos determinar los parámetros del vector de Stokes de la siguiente forma.

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (14)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (15)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \Delta \quad (16)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \text{sen} \Delta \quad (17)$$

Los parámetros de Stokes presentan una descripción completa de cualquier estado de polarización de un haz electromagnético, en partículas un haz de luz visible. Para el caso de polarización total, cada componente del vector de Stokes lo podemos relacionar mediante la expresión $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$. Considerando la descripción de la polarización observando hacia la fuente de luz, se tiene que el primer parámetro del vector de Stokes, S_0 representa la intensidad total del haz de luz, el parámetro S_1 representa los estado de polarización lineales horizontal (si su valor es positivo) y vertical (si su valor es negativo), el parámetro S_2 representa las polarizaciones lineales a $\pm 45^\circ$ y el parámetro S_3 representa las polarizaciones circular derecha (positivo) e izquierda (negativo). Destacando que los cuatro parámetros del vector de Stokes representan intensidades, es decir, cantidades reales, medibles directamente.

Empleando este formulismo es posible describir también los estados parcialmente polarizados. Utilizando la desigualdad de Schwarz's (18), si un haz de luz satisface esta desigualdad estaremos hablando de un haz de luz parcialmente polarizado [7]. Si se cumple la igualdad, significa que el haz está totalmente polarizado.

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (20)$$

También podemos describir la orientación de la elipse de polarización mediante este formulismo de Stokes.

$$\tan 2\psi = \frac{S_2}{S_1} \quad (21)$$

$$\text{sen } 2\chi = \frac{S_3}{S_0} \quad (22)$$

Mediante los parámetros de Stokes es posible describir el grado de polarización, DOP, para cualquier estado de polarización.

$$DOP = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0} \quad 0 \leq DOP \leq 1 \quad (23)$$

El valor de DOP=1 corresponde a un haz de luz completamente polarizado, de forma contraria a el caso donde DOP=0 el cual corresponderá a un haz de luz no polarizado. Si el valor de DOP se encuentra entre el rango de medición, será un haz de luz parcialmente polarizado. También es posible estudiar el grado de polarización para el caso lineal y circular.

$$DOLP = \frac{(S_1^2 + S_2^2)^{1/2}}{S_0} \quad (24)$$

$$DOCP = \frac{S_3}{S_0} \quad (25)$$

En una descripción general de los seis estados de polarización en función de amplitudes y fases, se tiene que:

Polarización lineal horizontal. $E_{0y}=0$.

$$S = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 \\ E_{0x}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Polarización lineal vertical. $E_{0x}=0$.

$$S = \begin{pmatrix} E_{0y}^2 \\ -E_{0y}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Polarización lineal a $+45^\circ$. $E_{0x}=E_{0y}=E_0$ y $\Delta=0^\circ$.

$$S = \begin{pmatrix} 2E_0^2 \\ 0 \\ 2E_0^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Polarización lineal a -45° . $E_{0x}=E_{0y}=E_0$ y $\Delta=180^\circ$.

$$S = \begin{pmatrix} 2E_0^2 \\ 0 \\ -2E_0^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (29)$$

Polarización circular derecha. $E_{0x}=E_{0y}=E_0$ y $\Delta=90^\circ$.

$$S = \begin{pmatrix} 2E_0^2 \\ 0 \\ 0 \\ 2E_0^2 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Polarización circular izquierda. $E_{0x}=E_{0y}=E_0$ y $\Delta=-90^\circ$.

$$S = \begin{pmatrix} 2E_0^2 \\ 0 \\ 0 \\ -2E_0^2 \end{pmatrix} \quad (31)$$

La forma clásica de determinación de los parámetros del vector de Stokes se realiza mediante la interacción de un haz de luz con dos elementos ópticos como un retardador de fase y un polarizador. El campo incidente es descrito en términos de los componentes E_x y E_y y el campo emergente de los elementos polarizadores es usado para la determinación de la intensidad del haz.

Las componentes del haz incidente son las siguientes:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_{0x} e^{i\delta_x} e^{i\omega t} \\ E_y(t) &= E_{0y} e^{i\delta_y} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (32)$$

Para la determinación de los parámetros del vector de Stokes de un haz de luz en notación compleja, se representa de la siguiente forma.

$$S = \begin{pmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{pmatrix} \quad (33)$$

Para la descripción de los parámetros del vector de Stokes por medio de dos elementos ópticos, primero por medio del retardador el cual induce un cambio de fase en el campo incidente de $\phi/2$ para la componente en x y para la componente en y de la misma forma como $-\phi/2$, emergiendo un campo desfasado E_x' y E_y' . En la figura 2.2 podemos observar el esquema de medición.

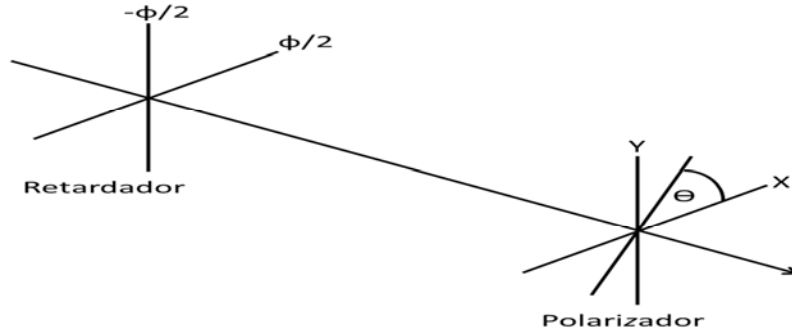


Figura 2.2. Medición de los parámetros del vector de Stokes para un estado de polarización.

$$\begin{aligned} E_x' &= E_x e^{i\phi/2} \\ E_y' &= E_y e^{i\phi/2} \end{aligned} \quad (34)$$

El campo descrito por la ecuación (34) incide en un polarizador lineal con un eje de transmisión a un ángulo θ , como lo vemos en la figura 2.2. Las componentes de campo provenientes del retardador bajo esta condición podrán ser transmitidas, donde el campo total transmitido por el eje de transmisión del polarizador lineal será la suma de las componentes ortogonales.

$$E = E_x e^{i\phi/2} \cos \theta + E_y e^{-i\phi/2} \text{sen } \theta \quad (35)$$

La intensidad registrada por un detector queda descrita como:

$$I = E \cdot E^* \quad (36)$$

La intensidad del haz emergente del sistema se describe mediante:

$$\begin{aligned} I(\theta, \phi) &= E_x E_x^* \cos^2 \theta + E_y E_y^* \text{sen}^2 \theta + E_x^* E_y e^{-i\phi} \text{sen} \theta \cos \theta \\ &+ E_y^* E_x e^{i\phi} \text{sen} \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (37)$$

Sustituyendo las ecuaciones de ángulo medio como identidades trigonométricas en la ecuación (37).

$$\begin{aligned}
I(\theta, \phi) = & \frac{1}{2}(E_x E_x^* + E_y E_y^*) + \frac{1}{2}(E_x E_x^* - E_y E_y^*) \cos 2\theta \\
& + \frac{1}{2}(E_x E_x^* + E_y E_y^*) \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi \\
& + i \frac{1}{2}(E_x E_x^* - E_y E_y^*) \operatorname{sen} \phi \cos 2\theta
\end{aligned} \tag{38}$$

Es posible reducir la ecuación anterior sustituyendo cada parámetro de los vectores de Stokes descritos en la ecuación (33).

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2}[S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \operatorname{sen} 2\theta \cos \phi + S_3 \operatorname{sen} \phi \cos 2\theta] \tag{39}$$

La ecuación (39) es la fórmula de intensidad para la determinación de los cuatro parámetros de Stokes. Para la determinación de cada uno de los parámetros de Stokes es necesario el dominio de los ángulos de giro del retardador y del polarizador; es decir, de ϕ y θ , respectivamente [7].

$$I(0^0, 0^0) = \frac{1}{2}[S_0 + S_1] \tag{40-a}$$

$$I(45^0, 0^0) = \frac{1}{2}[S_0 + S_2] \tag{40-b}$$

$$I(90^0, 0^0) = \frac{1}{2}[S_0 - S_1] \tag{40-c}$$

$$I(45^0, 90^0) = \frac{1}{2}[S_0 + S_3] \tag{40-d}$$

Resolviendo para los cuatro parámetros de Stokes de las relaciones (40).

$$S_0 = I(0^0, 0^0) + I(90^0, 0^0) \tag{41-a}$$

$$S_1 = I(0^0, 0^0) - I(90^0, 0^0) \tag{41-b}$$

$$S_2 = 2I(45^0, 0^0) - I(0^0, 0^0) - I(90^0, 0^0) \tag{41-c}$$

$$S_3 = 2I(45^0, 90^0) - I(0^0, 0^0) - I(90^0, 0^0) \tag{41-d}$$

Las ecuaciones descritas en las relaciones en (41) son las medidas en intensidad para la determinación de los parámetros del vector de Stokes, cabe señalar que en los años cuando Stokes propone esta metodología no se contaba

con ningún tipo de sensor óptico, solo el ojo humano [7]. El desarrollo de los parámetros de Stokes no fue con el entero interés de obtener sus valores sino de poder resolver el problema para los casos donde no era posible considerar la luz como polarizada quedando resuelto el problema de fuentes de luz parcialmente o no polarizadas.

2.3 Matrices de Mueller.

La respuesta lineal de un medio óptico a un haz de luz incidente, puede describirse mediante el formulismo de Mueller-Stokes:

$$S^0 = MS^i \Rightarrow \begin{pmatrix} s_0^0 \\ s_1^0 \\ s_2^0 \\ s_3^0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s_0^i \\ s_1^i \\ s_2^i \\ s_3^i \end{pmatrix} \quad (42)$$

De la relación (42), S^0 representa el haz de luz saliente del sistema óptico, M es llamada matriz de Mueller del sistema bajo estudio y S^i es conocido como el vector de Stokes correspondiente al haz de luz incidente al sistema con un estado de polarización determinado o inducido por elementos ópticos.

La matriz de Mueller (compuesta por 16 elementos) describe completamente las propiedades polarimétricas de una material que haya sido estudiado por reflexión o transmisión.

El problema se concentra en resolver un sistema lineal de ecuaciones para la determinación de cada uno de los parámetros de la matriz de Mueller.

$$S_0^o = S_0^i m_{00} + S_1^i m_{01} + S_2^i m_{02} + S_3^i m_{03} \quad (43-a)$$

$$S_1^o = S_0^i m_{10} + S_1^i m_{11} + S_2^i m_{12} + S_3^i m_{13} \quad (43-b)$$

$$S_2^o = S_0^i m_{20} + S_1^i m_{21} + S_2^i m_{22} + S_3^i m_{23} \quad (43-c)$$

$$S_3^o = S_0^i m_{30} + S_1^i m_{31} + S_2^i m_{32} + S_3^i m_{33} \quad (43-d)$$

Para la representación de un sistema óptico interactuando con haces de luz polarizados, en la figura 2.3 observamos un haz incidiendo con un sistema óptico o material bajo estudio dando como resultado un haz emergente. La importancia de la representación de los sistemas ópticos por su matriz de Mueller se expresa en la información resultante de esta, una completa descripción óptica y polarimétrica del sistema bajo estudio.

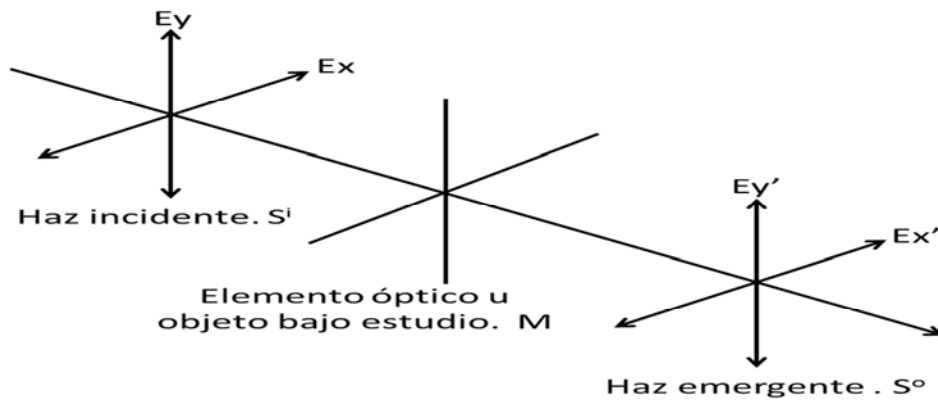


Figura 2.3. Interacción de elementos ópticos con haces de luz polarizados.

El cambio de un estado de polarización de un haz puede realizarse por el cambio en sus amplitudes, cambio de fase, cambio de dirección de las componentes ortogonales del campo o por la transferencia de energía de estados polarizados a estados parcialmente polarizados [7]. Para cada uno de los fenómenos con los cuales es posible cambiar el estado de polarización corresponde a un elemento óptico diseñado para realizar dicha función.

El elemento óptico que cambia las amplitudes ortogonales del campo de forma distinta se llama polarizador o diatenuador. Por su parte, la componente óptica que induce cambios en las fases de las componentes ortogonales del campo es llamado retardador. Si la energía de un estado de polarización queda desplazada a un campo parcialmente polarizado o despolarizado, se debe a la acción de un despolarizador.

Cada elemento óptico descrito anteriormente puede ser representado por medio de una matriz de Mueller. La matriz de Mueller correspondiente a una serie de elementos ópticos es la resultante de la multiplicación de estas matrices, siguiendo la regla de multiplicación de matrices de derecha a izquierda.

$$M = M_N M_{N-1} \cdots M_2 M_1 \quad (44)$$

Para una descripción general de una matriz de Mueller de un polarizador lineal y un retardador lineal, que en el caso general son usadas con mayor frecuencia y con aplicación en este trabajo de tesis, se describen en las siguientes matrices.

Matriz de Mueller para un polarizador lineal, cuyo eje de transmisión forma un ángulo θ respecto del plano de incidencia:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta + 2\sin^2 2\theta & -\sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & -\sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + 2\cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Matriz de Mueller para un retardador lineal con eje rápido orientado a un ángulo θ respecto al plano de incidencia y que induce un retardo de fase δ , puede hacer que se comporte como un retardador de $\lambda/2$ o $\lambda/4$, dependiendo del valor de la misma [8].

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (46)$$

2.3.1 Medición de elementos de la matriz de Mueller de una muestra.

Como se describió en el inicio de la sección anterior, el objetivo de conocer la matriz de Mueller de algún sistema es determinar sus propiedades ópticas para poder dar alguna interpretación del sistema bajo estudio. Existen diferentes formas de llegar a cada valor de la matriz de Mueller, un de ellas se desarrolla en este trabajo de tesis.

La matriz de Mueller cuenta con 16 elementos por determinar; es decir, es necesario 16 ecuaciones para poder obtener cada uno de ellos en caso de un sistema óptico en general (las simetrías que pudieran representar reducen su número).

La metodología a seguir es generar cada estado de polarización, mediante el uso de polarizadores y retardadores de onda, hacer incidir el haz polarizado a la muestra bajo estudio y detectar el estado de polarización resultante de la interacción del objeto con el haz incidente polarizado, mediante polarizadores y retardadores.

Podemos generar 6 estados de polarización y analizar esos 6 estados de polarización resultantes, teniendo así 36 ecuaciones para poder encontrar una solución a la matriz de Mueller. Otra forma de llegar al mismo resultado es generando y analizando 4 estados de polarización resultado exactamente 16 ecuaciones para obtener la matriz de Mueller del sistema, a estos procedimientos se les llama método de 6 y de 4 mediciones, respectivamente.

El generador de estados de polarización es llamado PSG y al analizador de estados de polarización es llamado PSA. La Figura 2.4 representa un esquema del sistema óptico para la determinación de la matriz de Mueller.

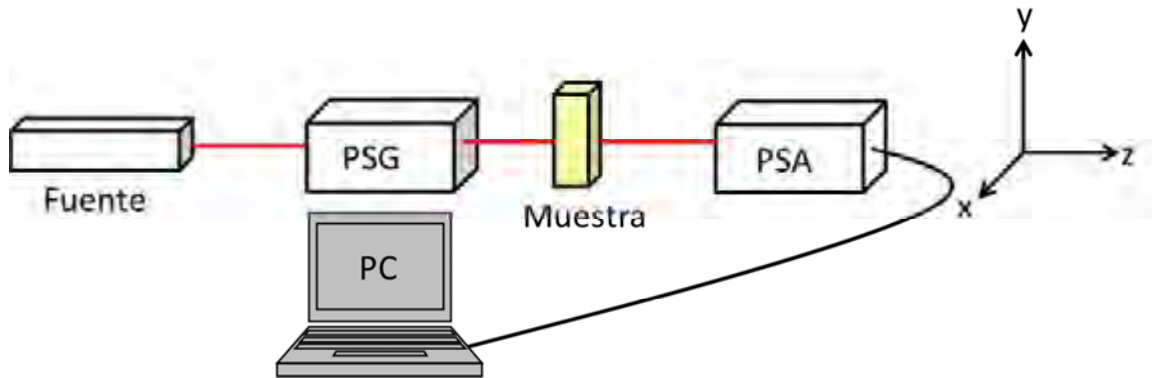


Figura 2.4. Sistema para la determinación de la matriz de Mueller, consiste de una fuente no polarizada, un generador (PSG) y analizador (PSA) de estados de polarización y la computadora que contiene el software para el procesamiento de datos polarimétricos.

En secciones próximas se describirá con mayor detalle el funcionamiento del PSG y PSA.

Las matrices de Mueller proporcionan una caracterización polarimétrica completa de un elemento. La clasificación de las matrices depende de las propiedades polarimétricas de cada elemento como lo es la diatenuación, despolarización, retardancia, entre otros.

Algunas métricas que se despliegan de conjuntos de elementos de la matriz de Mueller ayudan a generar una medida de algunos fenómenos como lo es la despolarización, este término hace referencia al grado de pérdida en la polarización del haz incidente o que se transmite en el sistema óptico bajo estudio.

Una propiedad importante de un sistema óptico es el índice de despolarización $DI(M)$, este término se asigna a la capacidad del sistema de despolarizar el haz incidente y está definido en términos de algunos parámetros de la matriz de Mueller [9].

$$0 \leq DI(M) = \left\{ \sum_{j,k=0}^3 m_{jk}^2 - m_{00}^2 \right\}^{1/2} / \sqrt{3} m_{00} \leq 1 \quad (47)$$

Donde podemos decir si se presenta el siguiente comportamiento $0 \leq DI(M) \leq 1$ tenemos un sistema parcialmente despolarizante. Cuando se presente el comportamiento $DI(M) = 1$ tenemos un sistema no despolarizante. Cuando $DI(M) = 0$, significa que el sistema despolariza totalmente cualquier haz de luz incidente.

Otro parámetro importante es el coeficiente de polarizancia, $P(M)$, este término representa cuanto es que el sistema polariza el haz incidente y está definido en función de algunos parámetros de la matriz de Mueller del sistema bajo estudio [10].

$$0 \leq P(M) = \sqrt{m_{10}^2 + m_{20}^2 + m_{30}^2} / m_{00} \leq 1 \quad (48)$$

Donde para poder dar una interpretación física de los resultados es necesario tener en cuenta los diversos casos posibles. Si $P(M) = 1$ el sistema polariza el haz incidente, si $P(M) = 0$ el sistema no polariza. Si toma valores intermedios, se interpreta como si el sistema polariza parcialmente la luz incidente.

Otro parámetro es el índice de diatenuación, $D(M)$, este parámetro mide la absorción de energía del haz incidente en la muestra y también está definido en función de las componentes de la matriz de Mueller [10].

$$0 \leq D(M) = \sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2} / m_{00} \leq 1 \quad (49)$$

Para dar una interpretación del parámetro de diatenuación, si $D(M) = 0$ no se presenta ninguna diatenuación, del caso contrario si $D(M) = 1$ tenemos un diatenuador al haz incidente. Si toma valores intermedios, se interpreta como si el sistema atenúa parcialmente la luz incidente.

Dada una matriz de Mueller experimental es posible separar la diatenuación, retardancia y la despolarización. Usando la descomposición de Lu-Chipman es posible descomponer la matriz en el producto de tres factores. Es posible considerar la diatenuación en términos de las polarizaciones lineales “s”, “r” y a $\pm 45^\circ$ como una sola diatenuación lineal (DL) en función de algunos

parámetros de la matriz de Mueller que ofrecen información acerca de estos estados incidentes, de la misma forma es posible considerar la diatenuación para los estados circularmente polarizados (DC). Quedan definidos de la siguiente forma [7].

$$DL = \frac{\sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2}}{m_{00}} \quad (50)$$

$$DC = \frac{m_{03}}{m_{00}} \quad (51)$$

Una reciente métrica escalar para la despolarización de la luz, descrita mediante los elementos de una matriz de Mueller, se denota por $Q(M)$, la cual es descrita en la siguiente relación [11].

$$0 \leq Q(M) = \frac{\sum_{j=1,k=0}^3 m_{jk}^2}{\sum_{k=0}^3 m_{0k}^2} = \frac{3[DI(M)]^2 - [D(M)]^2}{1 + [D(M)]^2} = \frac{\left\{ \sum_{j,k=1}^3 m_{jk}^2 \right\} / m_{00}^2 + [P(M)]^2}{1 + [D(M)]^2} \leq 3 \quad (52)$$

La interpretación a los resultados de la métrica $Q(M)$ se da de la siguiente forma. La métrica $Q(M)$ permite identificar una matriz de Mueller asociada a un sistema físico totalmente despolarizante, parcialmente despolarizante, no polarizaste diatenuante y no despolarizante no diatenuante [12,13].

$Q(M) = 0 \Rightarrow$ *Totalmente despolarizante.*

$0 < Q(M) < 1 \Rightarrow$ *Parcialmente despolarizante.*

$1 \leq Q(M) < 3 \Rightarrow \begin{cases} \text{si } 0 < DI(M) < 1 \Rightarrow \text{Parcialmente despolarizante.} \\ \text{si } DI(M) = 1 \Rightarrow \text{No - despolarizante diatenuante.} \end{cases}$

$Q(M) = 3 \Rightarrow$ *No - despolarizante no - diatenuante.*

La retardancia o retardo generado por el sistema bajo estudio es un parámetro que es utilizado como otra característica óptica del material, la cual está

relacionado directamente con los índices de refracción, grosor de la muestra y la longitud de onda de uso. La matriz de Mueller proporciona información acerca de este parámetro y la diatenuación lineal a diferentes estados de polarización incidentes.

En la siguiente representación de la matriz de Mueller relacionamos cada uno de los 16 parámetros con la diatenuación y la retardancia a los diferentes estados de polarización incidentes.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & a & b & c \\ a & 0 & -d & -e \\ b & d & 0 & -f \\ c & e & f & 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

A partir de la matriz de Mueller anterior relacionamos los siguientes parámetros.

- a diatenuación lineal relacionada a polarización lineales horizontal (0^0) y vertical (90^0).
- b diatenuación lineal relacionada a polarización lineales 45^0 y 135^0
- c diatenuación circular
- d retardancia lineal relacionada a polarización lineales horizontal (0^0) y vertical (90^0)
- e retardancia lineal relacionada a polarización lineales 45^0 y 135^0
- f retardancia circular

Concluimos que la interpretación de la matriz de Mueller de un sistema óptico o muestra bajo estudio es dependiente de estados de polarización incidentes generados y analizados después de haber tenido interacción con el sistema bajo estudio.

Las métricas con las que es posible obtener información a partir de la matriz de Mueller se presentan desde un punto de vista óptico de la interacción del sistema bajo estudio con luz polarizada incidente a la muestra.

La condición necesaria y suficiente para que una matriz de Mueller pueda ser deducida como una matriz de Jones tiene que cumplir con el teorema de Gil-Bernabeu [9,14].

$$TC = Tr(M^T M) = 4m_{00}^2 \quad (54)$$

Grado de anisotropía de despolarización (Add), es la característica polarimétrica del material que nos relaciona la capacidad de despolarización que tiene el haz de luz al viajar en el medio isotrópico o anisotrópico, está definido de la siguiente forma [12].

$$0 \leq Add = \frac{(DoP)_{\max} - (DoP)_{\min}}{(DoP)_{\max} + (DoP)_{\min}} \leq 1 \quad (55)$$

Al interpretar los límites, 0, significa que la despolarización es generada por un sistema isotrópico. El límite superior 1, significa que el medio es totalmente anisotrópico. Los valores intermedios corresponden a medios parcialmente anisotrópicos.

2.4 Esfera de Poincaré.

La esfera de Poincaré es una representación alternativa de cualquier estado de polarización total. La elipse de polarización es otra de las formas de representación de un estado de polarización, aunque no es posible observar estados parcialmente polarizados por la determinación de los ángulos de elipticidad y orientación de la elipse.

Alrededor de 1890 Henri Poincaré, un físico matemático, descubre que la elipse de polarización puede ser representada en el plano complejo, proyectando la esfera en un plano. Una de las propiedades más importante de la esfera es que cualquier punto en la esfera corresponde a tres parámetros de Stokes S_1 , S_2 y S_3 para el caso de haces totalmente polarizados y normalizados respecto a la intensidad total. Cuando se presenta la interacción de un haz de luz con algún elemento óptico que induzca un estado de polarización fijo como lo puede hacer un retardador o un polarizador lineal, corresponderá una rotación de la esfera en los polos o en el hemisferio según sea el caso. La siguiente figura 2.5 representa la esfera de Poincaré en coordenadas cartesianas.

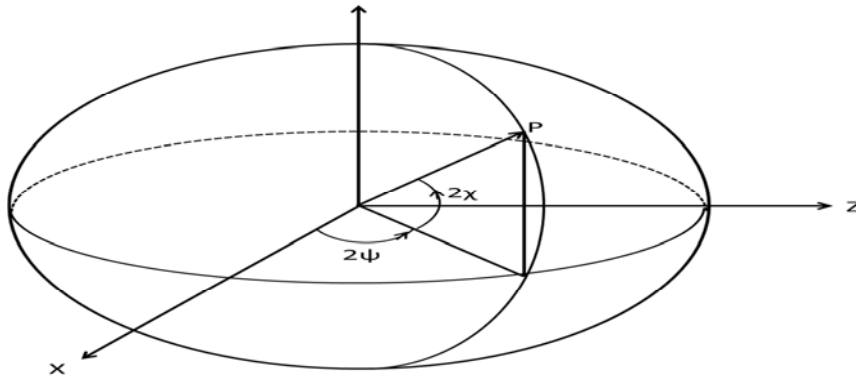


Figura 2.5. Esfera de Poincaré, ejes en coordenadas cartesianas, Ψ y χ son los ángulos de orientación y elipticidad.

Las coordenadas cartesianas de la elipse están representadas por las ecuaciones siguientes.

$$x = \cos(2\chi) \cos(2\psi) \quad 0 \leq \psi \leq \pi \quad (56-a)$$

$$y = \cos(2\chi) \text{sen}(2\psi) \quad -\pi/4 < \chi < \pi/4 \quad (56-b)$$

$$z = \text{sen}(2\chi) \quad (56-c)$$

Donde podemos comprobar que para una matriz de radio unitario se cumple que $x^2+y^2+z^2=1$. De las relaciones (56) podemos representar cualquier estado de polarización en función de las coordenadas $(2\Psi, 2\chi)$. Los estados

degenerados de la elipse de polarización son representados en la esfera de Poincaré [12].

Para el estado de polarización lineal horizontal $P(0^0,0^0)$, polarización lineal vertical $S(180^0,0^0)$, polarización lineal a $+45^0$ $X(90^0,0)$, polarización lineal a -45^0 $Y(270^0,0^0)$, polarización circular derecha $R(0^0, 90^0)$ y polarización circular izquierda $L(0^0, -90^0)$. La representación de los seis estados de polarización en la esfera de Poincaré se muestra en la figura 2.6.

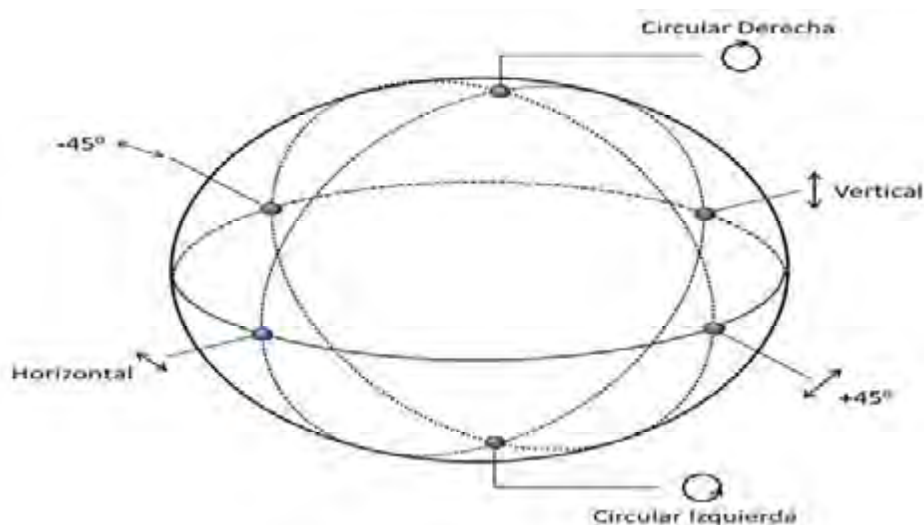


Figura 2.6. Representación de los seis estados de polarización en la esfera de Poincaré.

2.5 Espectroscopia Raman.

La espectroscopia Raman es una técnica analítica que permite obtener información química de cualquier compuesto orgánico o inorgánico permitiendo su identificación.

El efecto Raman fue desarrollado teóricamente por A. Smekal en 1923 y demostrado experimentalmente por Sir Chandrasekhra Venkata Raman en 1928 utilizando instrumentos simples de laboratorio, como fuente de iluminación la luz del Sol y como sensor óptico sus ojos [15,16]. La

espectroscopia Raman se ha convertido en una herramienta muy útil en diversas áreas de la investigación como lo es la bioquímica, estado sólido, medicina, entre otras. Esta técnica no invasiva proporciona información sobre la composición mineral-química de la muestra.

El fenómeno Raman ocurre con la interacción de la luz incidente con los electrones de la molécula iluminada. En la dispersión Raman la energía incidente a la molécula no es la suficiente para excitarla a un nivel electrónico de mayor energía. A cada uno de los movimientos vibracionales y rotacionales de la molécula corresponde un nivel de energía molecular.

Los fotones de la fuente de iluminación inciden con energía $h\nu_0$ (h constante de Planck) mayor a la diferencia de energía entre dos niveles vibracionales de la molécula. Los fotones chocan con la molécula, otros la atraviesan y una pequeña minoría se dispersan, esta dispersión se debe a que el fotón lleva a la molécula a un nivel mayor de energía vibracional o rotacional superior al permitido, el cual es abandonado rápidamente para colocarse en un nivel de energía permitido para el fotón. La frecuencia con la cual es liberado este fotón dependerá del salto energético realizado por la molécula. La figura 2.7 muestra un diagrama energético donde cada estado se representa por una línea horizontal.

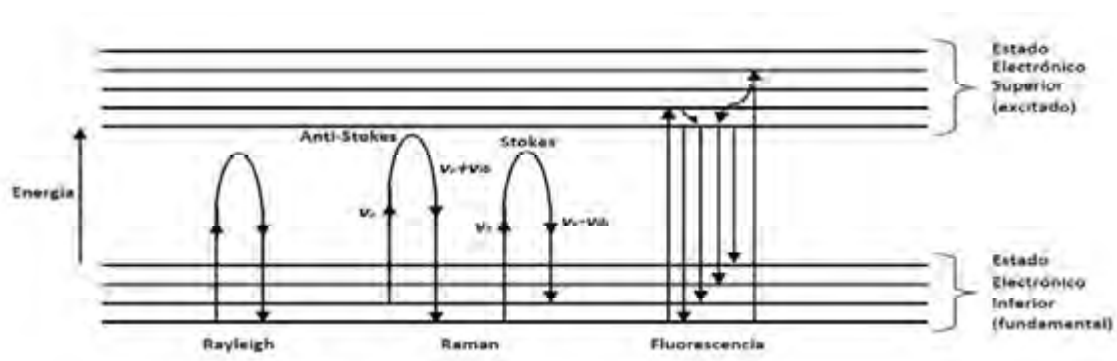


Figura 2.7. Diagrama energético que representa diversos estados vibracionales en el que se muestran las transiciones de estados energéticos para diferentes interacciones de la luz con la materia.

Si el resultado de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a una frecuencia distinta del incidente, se dice que el choque es inelástico; es decir, existe una transferencia de energía entre el fotón y la molécula, bajo estas circunstancias pueden ocurrir dos fenómenos.

1. El fotón dispersado puede tener una frecuencia menor a la del incidente; se produce una transferencia de energía del fotón a la molécula. Después de saltar al nivel energético no permitido vuelve a un estado energético mayor al que tenía inicialmente, es decir, el fotón dispersado con la frecuencia $\nu_0 - \nu_R$ y se produce la dispersión Raman-Stokes.
2. Si el fotón dispersado tiene una frecuencia mayor al incidente se produce una transferencia de energía del fotón a la molécula, esto significa que la molécula antes de la interacción no se encontraba en un estado vibracional fundamental sino en uno de mayor energía y después del choque pasa al estado fundamental. El fotón dispersado lleva una frecuencia $\nu_0 + \nu_R$ y se produce la dispersión Raman Anti-Stokes.

Par la interpretación del fenómeno Raman se trata el caso de una molécula diatómica. El esparcimiento Raman se produce por los cambios en la polaridad eléctrica (α) de una molécula durante la vibración generada por la interacción del fotón con la molécula. La polarizabilidad de una molécula es una medida de la capacidad que tiene las moléculas de distorsionar las nubes de electrones que se encuentran alrededor de los átomos en la molécula. Los átomos más pesados se dice que tienen nubes de electrones más grandes y en consecuencia mayores polarizabilidad eléctricas individuales.

La fuente de iluminación la podemos representar como una onda electromagnética dependiente del tiempo, en la siguiente ecuación.

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (57)$$

Donde E_0 es la amplitud del campo, ν_0 es la frecuencia de la onda. Cuando se ilumina una molécula diatómica con esta fuente se induce un momento dipolar P [15].

$$P = \alpha E = \alpha E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (58)$$

Si la molécula vibra con una frecuencia ν_m , el desplazamiento nuclear Q se describe por la siguiente relación.

$$Q = Q_0 \cos(2\pi\nu_m t) \quad (59)$$

La polarizabilidad de una molécula puede describirse por medio de una serie de Taylor [15], de la siguiente forma.

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0 Q + \dots \quad (60)$$

Donde α_0 corresponde a la polarizabilidad en la posición de equilibrio, Q se refiere a la coordenada normal; es decir, se concentran en este término los estiramientos, flexiones de la molécula durante la vibración. La derivada $\left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0$ es el cambio de polarización durante la vibración. El subíndice cero corresponde a la posición de equilibrio. Al sustituir las ecuaciones anteriores en la ecuación de momento dipolar (58), resulta la siguiente ecuación.

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0 Q_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \cos(2\pi\nu_m t) \quad (61)$$

Aplicamos la identidad trigonométrica:

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{\cos(a-b) \cos(a+b)}{2} \quad (62)$$

Sustituyendo la identidad (62) en la relación de momento dipolar (61).

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha}{dQ} \right)_0 Q_0 E_0 [\cos(2\pi\nu_0 + \nu_m)t + \cos(2\pi\nu_0 - \nu_m)t] \quad (63)$$

El primer término de la relación anterior representa un dipolo oscilante que emite luz de una frecuencia ν_0 (dispersión de Rayleigh), el segundo corresponde a la dispersión Raman de frecuencia $\nu_0 + \nu_R$ (anti-Stokes) y $\nu_0 - \nu_R$

(Stokes). Si la $\left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0$ es cero la vibración Raman no será activa. Por lo que para que exista vibración Raman es necesario que exista cambio en la polarización de los polos de las nubes electrónicas de la molécula para que este cambio sea distinto de cero.

2.5.1 Fluorescencia.

En el estudio de la miel por medio de espectroscopia Raman el fenómeno de fluorescencia está presente por el tipo de coloración en la miel. Bajo estas condiciones la señal Raman es poco visible. Este fenómeno de fluorescencia está presente en aquellas sustancias que tienen la capacidad de absorber luz a una determinada longitud de onda que es por lo general longitudes del rango ultravioleta.

La muestra absorbe fotones con una determinada energía y liberan fotones con menor energía. Este fenómeno es inmediato y ocurre en todas direcciones angulares, la luz es recibida y esparcida en pequeñas fracciones de segundo por lo que la fluorescencia dura lo mismo que el estímulo. La tasa de emisión de fluorescencia en general es alrededor de 10^8s^{-1} por lo que el tiempo de vida de la fluorescencia es alrededor de 10 nanosegundos [17].

Para reducir los efectos de fluorescencia es necesario utilizar una fuente láser que emita longitudes de onda largas, con el uso de estas longitudes se reduce la probabilidad de generar transiciones electrónicas.

Capítulo 3.

Resultados Experimentales.

El sistema óptico que se implementa para la caracterización polarimétrica de la miel se ha diseñado para generar (PSG) y analizar (PSA) estados de polarización de alta calidad; es decir, los mecanismos de generación de estados de polarización son los más cercanos al óptimo que existe en el mercado actual dentro del área.

El uso de luz polarizada como herramienta para la caracterización óptica de materiales proporciona métricas necesarias para la descripción total del material al interactuar con luz polarizada. La respuesta a la interacción del material con la fuente de luz polarizada queda plasmada en una matriz de Mueller de la cual cada uno de sus 16 elementos arroja información acerca del objeto bajo estudio.

Se analizan diferentes tipos de mieles nacionales que se encuentran en el mercado como miel auténtica de abeja envasada. El objetivo del presente trabajo es encontrar por medio del uso de luz polarizada diferencia entre mieles auténticas y mieles que hayan sido adulteradas de alguna forma. Se presentan resultados de estudios Raman realizados a las mismas muestras de miel con el objetivo de encontrar diferencias significativas por medio de este tipo de estudios, buscando contrastar la técnica polarimétrica con la que actualmente se ha utilizado como metodología líder en el estudio de componentes ajenas a la miel de abeja [18].

Las adulteraciones en las mieles se presentan como concentraciones altas de agua o fructuosa, la gran mayoría de mieles comerciales presentan este tipo de adulteraciones. La miel es un producto noble que pierde sus propiedades nutritivas y curativas si es expuesta por algún periodo de tiempo al aumento en temperatura, la luz y la humedad.

La miel natural pasa del estado líquido al estado sólido o cristalizado a pocos días de ser cosechada. Al cristalizarse la miel, una de sus componentes principales, la glucosa, se precipita liberando humedad que licúa los otros azúcares. De esta forma se forman partes sólidas en la miel junto con líquidas

donde predomina la humedad que da origen al proceso de fermentación. La exposición de la miel a la luz en forma directa produce transformaciones que reducen su calidad (en un futuro, esta es una oportunidad de estudiar su afectación por la luz e identificar qué longitudes de onda le resultan más perjudiciales, esto ayudaría a identificar el tipo de envasado óptimo basado en el filtrado de luz mediante su color, transmitancia, etc.). La miel tiene un porcentaje de humedad inferior al 20% según las normas internacionales, el exceso de humedad en la miel da lugar a una pronta fermentación.

En general las adulteraciones pueden ser causadas desde el apicultor hasta procesos industriales que afectan la estructura natural de la miel. El productor puede adulterar el proceso natural alimentando la colmena con suplementos como lo es la azúcar común, jarabe de maíz, entre otros. Este proceso comúnmente es llevado en épocas de invierno donde la falta de floración hace que la colmena emigre al no tener fuentes de alimento, mediante el alimentado con suplementos se mantiene la colmena estable hasta la nueva floración. Los procesos industriales generan cambios en la miel al ser expuesta a generar las condiciones necesarias para una mejor presentación del producto, esto generan adulteraciones como los son aquellos que evitan la cristalización de la miel, perdiendo todo tipo de propiedades nutritivas y medicinales de la miel original.

3.1 Montaje experimental.

La caracterización de sistemas ópticos o materiales por medio de luz polarizada se presenta como una herramienta en el estudio de propiedades ópticas de los materiales [19,20]. El sistema óptico propuesto fue diseñado con la finalidad de caracterizar ópticamente un material, en este trabajo se presenta un estudio polarimétrico a la miel de abeja. La información generada de este estudio permite determinar las diferencias entre distintos tipos de mieles comerciales, con la finalidad de detectar adulteraciones presentes en las mieles.

La figura 3.1 representa el esquema general del arreglo óptico diseñado para la caracterización de los diferentes tipos de mieles. El sistema cuenta con una fuente de luz láser de longitud de onda de 632.8 nm, se considera una fuente

no polarizada con emisión continua. El generador de estados de polarización (PSG) trabaja con un polarizador lineal Glan-Thompson y una placa retardadora de cristal líquido retardadora variable montada en una base giratoria, con servomotores controlados automáticamente (apt-dc Servo Controller de Thorlabs) desde un software de computadora.

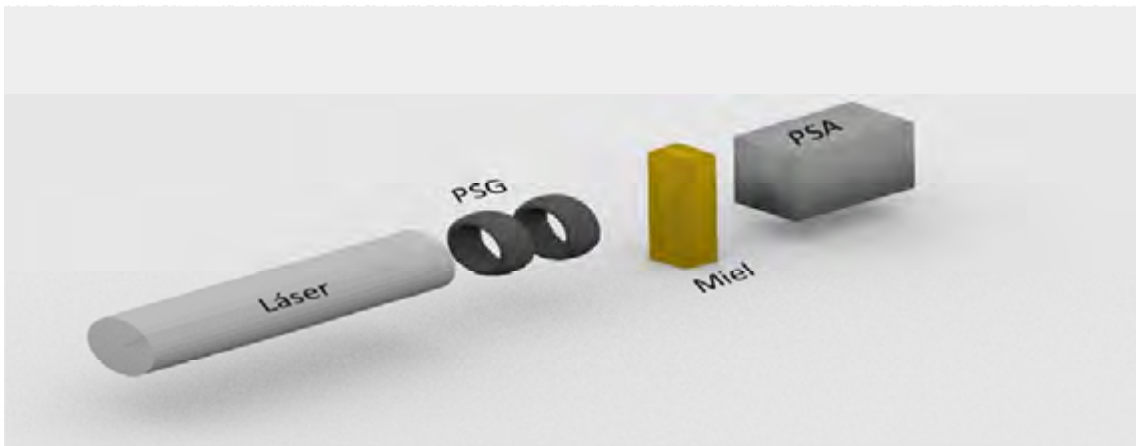


Figura 3.1. Diseño Experimental. En este arreglo óptico se presenta una fuente de luz láser no polarizada a una longitud de onda de 632 nm. El generador de estados de polarización (PSG) el cual trabaja con un polarizador lineal Glan-Thompson fijo y una placa retardadora de cristal líquido variable que tiene la capacidad de girar 180° sobre el eje óptico para poder generar los seis estados de polarización. La muestra de miel es colocada en una celda de cuarzo ya que este presenta la propiedad de no cambiar el estado de polarización del haz incidente. El analizador de estos de polarización (PSA) trabaja con una placa retardadora de $\lambda/4$ que gira a una cierta frecuencia, un polarizador lineal y un sensor de silicio.

El polarizador lineal Glan-Thompson consiste de dos prismas triangulares rectos de calcita unidos con pegamento óptico, el haz incidente se divide en dos haces que experimentan dos distintos índices de refracción por efecto de la birrefringencia. El haz que se refleja queda polarizado horizontalmente “p” por el proceso de reflexión total interna y el haz transmitido queda polarizado verticalmente “s”.

La placa retardadora de cristal líquido variable se comporta como una placa de retardo de onda de $\lambda/2$ o $\lambda/4$; el retardo es controlado con una diferencia de potencial conectada a la placa ($\lambda/4 = 2.849$ Volts y $\lambda/2 = 1.779$ Volts). Para los casos donde sea necesario la generación de estados linealmente polarizados (s, p, $\pm 45^\circ$) se utiliza la placa retardadora con un comportamiento de $\lambda/2$ y ésta se gira acimutalmente respecto a la polarización lineal incidente. Para complementar el estudio, es necesaria la interacción de estados de polarización circulares izquierda y derecha (r y l) con las muestras bajo estudio, para ello se usa la placa retardadora de cristal líquido con un comportamiento de $\lambda/4$ y su posicionamiento acimutal respecto a la polarización lineal incidente.

El analizador de estados de polarización (PSA) trabaja con una placa retardadora de $\lambda/4$ acromática girando a una frecuencia determinada por el fabricante, un polarizador lineal y un sensor de silicio que recibe la irradiancia del haz al interactuar con la miel, figura 3.1. El estado de polarización resultante se describe de tres maneras: mediante la esfera de Poincaré, de los parámetros de Stokes y las variables polarimétricas (acimut y elipticidad). El dispositivo utiliza un software que analiza el estado del haz emergente de la muestra de miel, este haz es tratado por una descomposición de Fourier para poder ser representado como un vector de Stokes resultante (para conocer a detalle los cambios en la polarización resultado de la interacción de la miel con el haz totalmente polarizado).

Una vez conocido el vector de Stokes resultante es posible conocer la matriz de Mueller de la miel bajo estudio; es decir, tenemos completo el sistema de ecuaciones como lo explican las ecuaciones (43) de la sección anterior. La matriz de Mueller representa el comportamiento de la miel a cada uno de los seis estados de polarización incidentes en cada uno de sus 16 elementos.

El vector de Stokes resultante para cada muestra de miel y para cada uno de los seis vectores de polarización generados se introducen a un programa realizado en MatLab, con el cual es posible obtener de forma rápida la matriz de Mueller y el cálculo de las métricas de polarización de cada miel.

Las métricas de polarización son descritas en función de los 16 elementos de la matriz de Mueller, con ellas es posible describir cambios en la miel según sean sus estados de concentración de fructuosa, glucosa, agua, por mencionar los más importantes de sus componentes, todo ello respecto a un patrón de referencia (miel auténtica).

Es importante destacar que con esta técnica no es posible determinar las concentraciones exactas de elementos que componen la miel de abeja sino diferencias entre cambios en los estados de polarización entre distintos tipos de mieles, para con ello poder dar una interpretación entre mieles auténticas y adulteradas.

3.2 Espectroscopia Raman.

Uno de los sistemas utilizados para la determinación de la respuesta Raman, fue el Espectrómetro Micro-Raman Renishaw, modelo 1000B, el cual está equipado con un diodo láser (Renishaw serie HPMIR) que emite en el infrarrojo cercano, en 830 nm, y con una potencia máxima de 300mW. Tiene un filtro notch, el cual es usado como un divisor de haz para guiar el haz láser hacia el microscopio ensamblado y también para eliminar la luz Rayleigh en el camino de retorno. El monocromador tiene una rejilla de 600 líneas/mm con una resolución de 4 cm^{-1} . Como detector se tiene una cámara de CCD (RenCam) enfriada termoeléctricamente a $-70 \text{ }^\circ\text{C}$, con 576x384 pixeles. Este sistema esta acoplado a un microscopio Leica (Modelo DMLM) que tiene 3 objetivos (5x, 20x y 50x) con una cámara de video para la visualización de la muestras. Se utiliza un software GRAMS/32 para el control de las funciones de este sistema Raman. En la figura 3.2 se muestra el sistema de espectrómetro Raman.



Figura 3.2. Equipo Raman (Renishaw, modelo 1000B)

El segundo equipo utilizado fue un sistema óptico montado en una mesa óptica, se trataba de un sistema VIS-Raman convencional ensamblado por el Dr. Claudio Frausto Reyes en el laboratorio de Espectroscopia Raman del Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Unidad Aguascalientes, el cual consta de los siguientes elementos:

- Un láser de He-Ne (Melles Griot) como fuente de excitación, que tiene una línea de emisión en 632.8 nm y una potencia máxima es de 17 mW.
- Un filtro de interferencia (Edmund Scientific-FWHM ± 2 nm). Un filtro holográfico (Super Notch-Plus™).
- Un monocromador (Jobin-Yvon, modelo HR 460) con resolución espectral de 0.05nm que cuenta con una rejilla de difracción de 1200 líneas/mm. Microscopio Axioskop 2.
- Como detector se tiene una cámara CCD de 256x1024 pixeles (modelo CCD-3000 Spectrum One) enfriada por aire.
- Tarjeta de interface GPIB-IEEE 488 de la National Instruments.
- Software SpectraMax (Galactic) para el control del sistema Raman.

En la figura 3.3 podemos observar una imagen del sistema Raman montado.

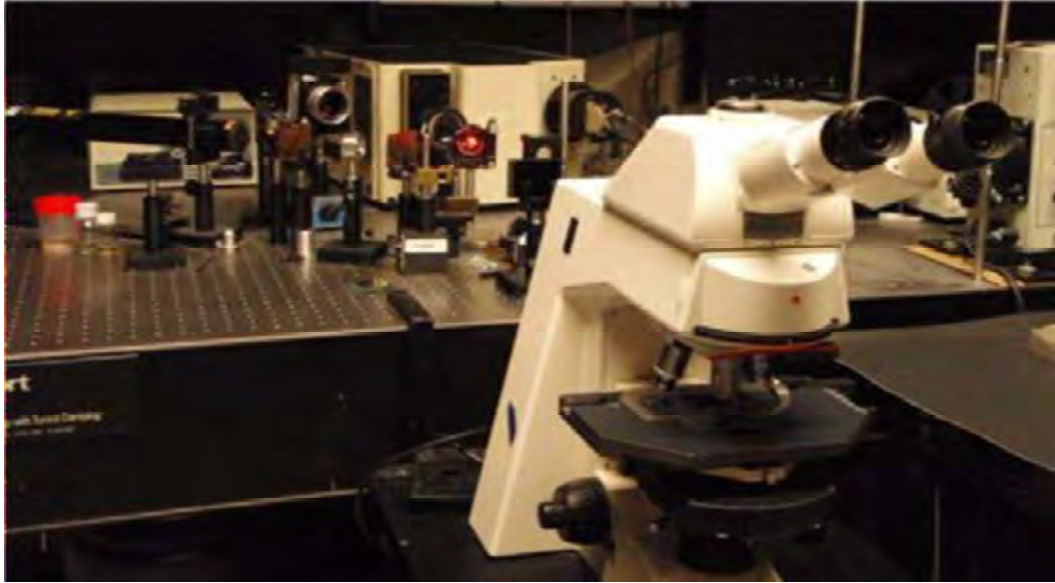


Figura 3.3. Sistema Raman convencional

3.3 Resultados Experimentales.

En esta sección se presenta los resultados obtenidos al analizar 7 tipos de mieles comerciales envasadas que se encuentran disponibles al público en los diferentes establecimientos comerciales.

3.3.1. Caracterización Polarimétrica.

Se seleccionaron mieles que se encontraban en el estudio realizado por la Procuraduría Federal del Consumidor, PROFECO [18]. Este estudio fue desarrollado con el objetivo de encontrar elevados contenidos de sacarosa ya que este puede ser un claro indicio de miel adulterada. Sin embargo, el tipo de adulteración más común se realiza por medio de jarabes de maíz químicamente similares a la miel, en estos jarabes no existe un aumento de glucosa ni sacarosa por lo que es difícil determinar si una miel ha sido adulterada. El método implementado por la PROFECO para la detección de estos azúcares fue por medio de *espectrometría de masas de isotopos estables*,

con el cual se pudo demostrar cuales azúcares son generados realmente por el proceso natural de la miel [18] y cuales corresponden a adulteraciones.



Figura 3.4. Conjunto de mieles a las cuales se realizó el estudio polarimétrico y Raman. Miel Carlota, Miel Gota del Campo, Vita Real Miel, Miel Great Value, Natura Miel, Miel Golden Hills, Miel Queen Bee, Jarabe de maíz Karo (jarabe no estudiado por la PROFECO) y concentrado de fructuosa comercial.

Las mieles seleccionadas fueron las presentadas en la figura 3.4, estas mieles son consideradas desde 100% libres de adulteraciones hasta un 87.9% de adulteración según el estudio de PROFECO [18].

En la figura 3.5 se observa el sistema óptico diseñado para el estudio polarimétrico de las mieles, cuenta como ya se ha mencionado con el PSG y PSA. En esta imagen podemos observar la fuente de alimentación para la placa retardadora de cristal líquido, así como los servomotores que hacen girar la placa para poder generar los seis estados de polarización. En la misma figura se observa el software que fue utilizado para poder ver la representación de los estados de polarización generados como los analizados en la esfera de

Poincaré, también es posible observar los parámetros del vector de Stokes del haz resultante de la interacción con la miel.



Figura 3.5. Imagen del arreglo óptico diseñado para el estudio polarimétrico de la miel. Fuente láser no polarizada de 632 nm, polarizador lineal Glan-Thomson, placa retardadora de cristal líquido variable, fuente de alimentación a la placa, cabeza de polarización o PSA con capacidad de trabajar en el rango de 400 nm a 700 nm (modelo PANVIS) y software de representación de estados de polarización.

En el estudio de las mieles con luz polarizada el problema se concentra en el obtener la matriz de Mueller para cada una de las muestras de miel. La forma de obtención de la matriz es generar los seis estados de polarización en el PSG, hacerlos incidir a la muestra de miel contenida en la celda de cuarzo y posteriormente analizar el estado de polarización resultante de la interacción de la miel con el haz en el PSA. Un esquema general del arreglo generado para este objetivo se muestra en la figura 3.6.

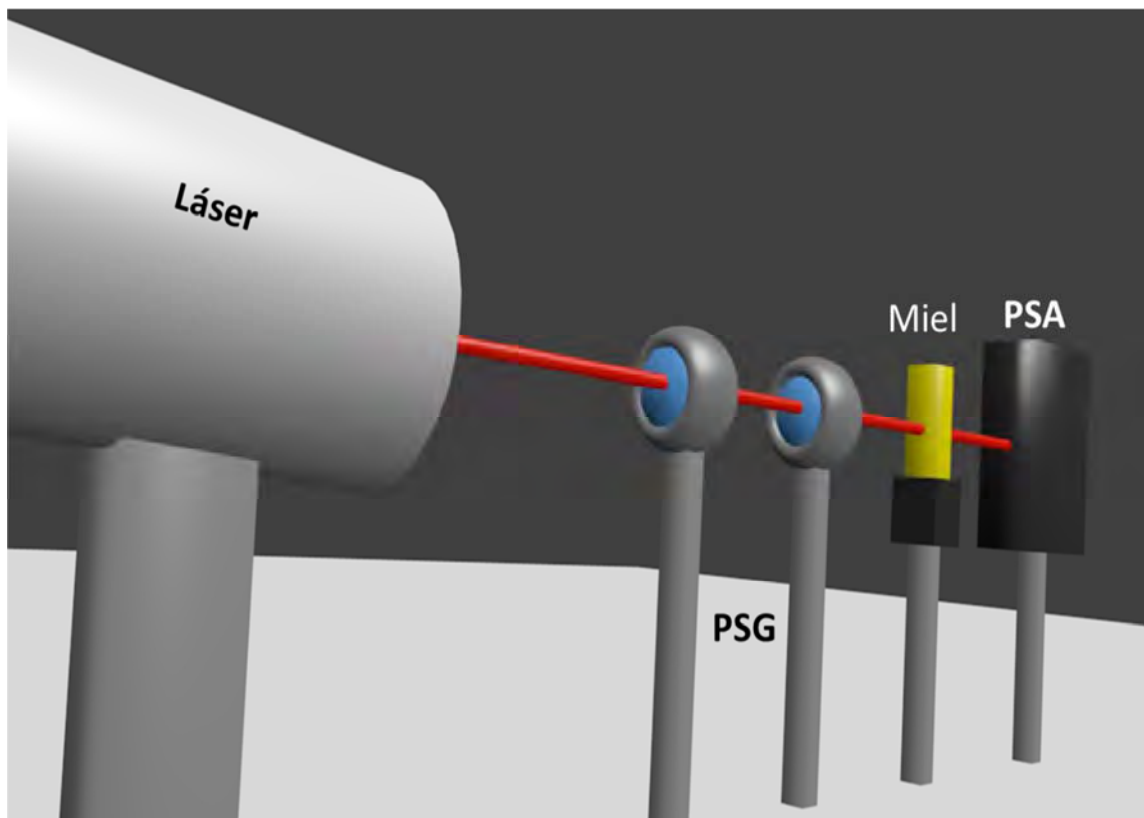


Figura 3.6. Esquema representativo al IPA (Arreglo Polarimétrico Ideal). Fuente láser de longitud de onda de 632 nm, no polarizada, generador de estados de polarización (PSG), analizador de estados de polarización (PSA), modelo PAN5710VIS ThorLabs y muestra de miel contenida en una celda de cuarzo.

La primera miel bajo estudio lleva por nombre comercial *Vita Real Miel 430g* (M_1), esta miel es considerada como una miel 100% natural según los estudios realizados por PROFECO. Las características encontradas por el método de espectrometría de masas de isotopos estables consideran que esta muestra de miel contiene un porcentaje de 19.8% de agua, 37.89% de fructuosa, 32.2% de glucosa y 0% de sacarosa. Las consideraciones anteriores validan que esta miel es libre de adulterantes por no encontrar azúcares ajenos a la miel lo que representa un porcentaje nulo en sacarosa. De igual forma cumpliendo con las normas mexicanas (NOM-051-SCFI-1994) requeridas para su autenticación y presentación del producto.

Con estas características de una miel auténtica se realiza la caracterización polarimétrica para las otras mieles, efectuando el procedimiento experimental antes mencionado. El estudio se centra en la obtención de la matriz de

Mueller de la miel *Vita Real Miel 430g* (M_1), los resultados de algunas métricas de polarización de la miel se presentan en la tabla 3.1.

M_1	
DM	0.0469
DL	0.0466
DC	0.0047
PM	0.0203
DI	0.9885
QM	2.9230
TC	0.9829
Add	0.0096

Tabla 3.1. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Vita Real Miel 430g* (M_1).

Una vez conocida la matriz de Mueller de la miel es posible dar una interpretación acerca de la interacción del haz polarizado con la muestra de miel. Para entender el fenómeno por el cual el haz polarizado cambia su estado original es necesario tener una interpretación de los cambios en el estado de polarización a la salida de la muestra como el grado de polarización emergente DOP en función de todos los estados de polarización incidentes posibles, figura 3.7. Para cada una de las muestras bajo estudio se presenta un gráfico representativo de esta métrica así como la respuesta a la salida del sistema expresado en la esfera de Poincaré, figura 3.8.

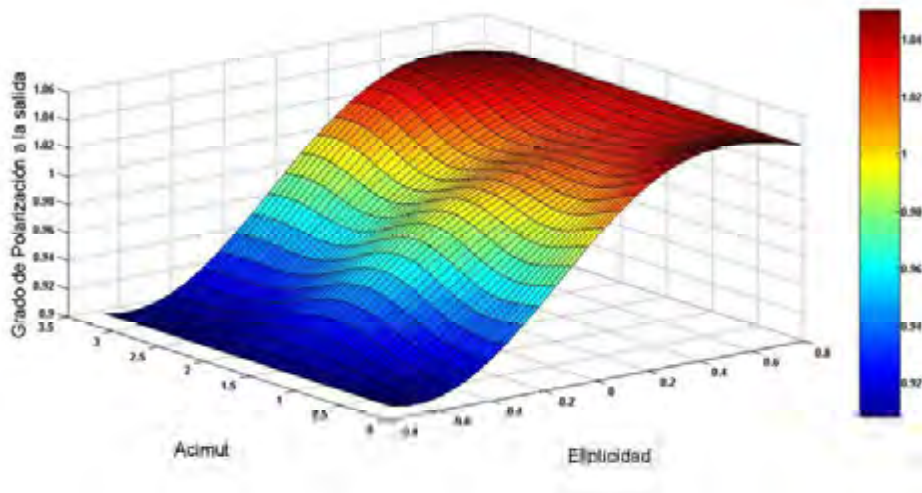


Figura 3.7. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Vita Real Miel 430g* (M_1).

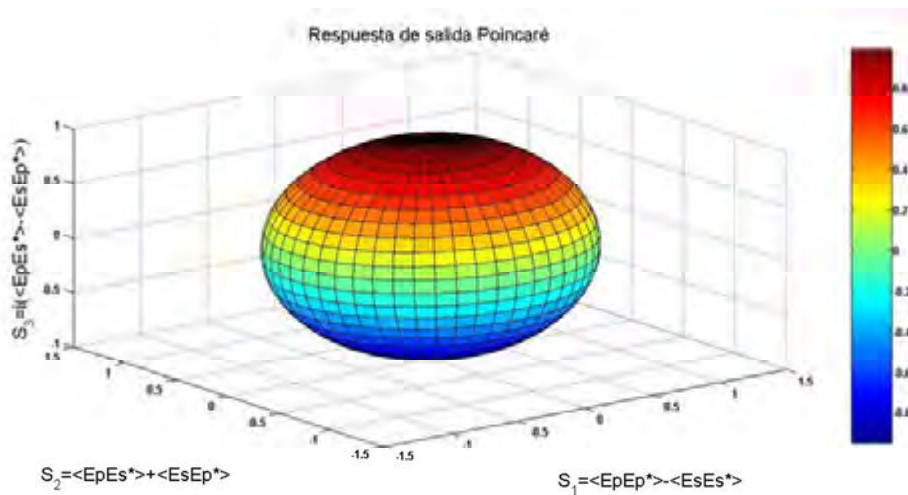


Figura 3.8. Respuesta de salida representada en la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Vita Real Miel 430g* (M_1).

La segunda miel se encuentra en el mercado con el nombre de **Golden Hills 370g** (M_2), considerando en su etiqueta como una miel 100% de origen natural; es decir, es considerada como una auténtica miel de abeja. Los estudios realizados por PROFECO [18] a esta miel sostienen que contiene 18% de agua, 37.77% de fructuosa, 35.24% de glucosa y un 0.56% de

sacarosa. A pesar de tener un cierto porcentaje de sacarosa, indicador de adulteraciones presentes en la miel, es considerada como una miel que cumple con los estándares de madurez, deterioro y limpieza.

Aplicando el mismo procedimiento que para la muestra anterior, se deducen algunas métricas de polarización para la miel bajo estudio, estas características se observan en la tabla 3.2.

M_2	
DM	0.0317
DL	0.0314
DC	0.0043
PM	0.0216
DI	0.9935
QM	2.9574
TC	0.9903
Add	0.0107

Tabla 3.2. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra de miel *Golden Hills 370g* (M_2).

Una vez conocida la matriz de Mueller de la miel es posible dar una interpretación acerca de la interacción del haz polarizado con la muestra de miel.

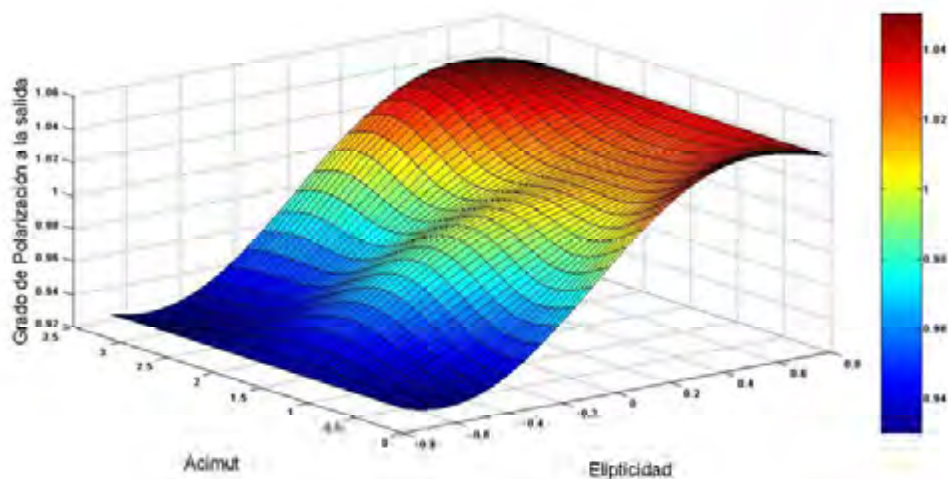


Figura 3.9. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Miel Golden Hills 370g* (M.

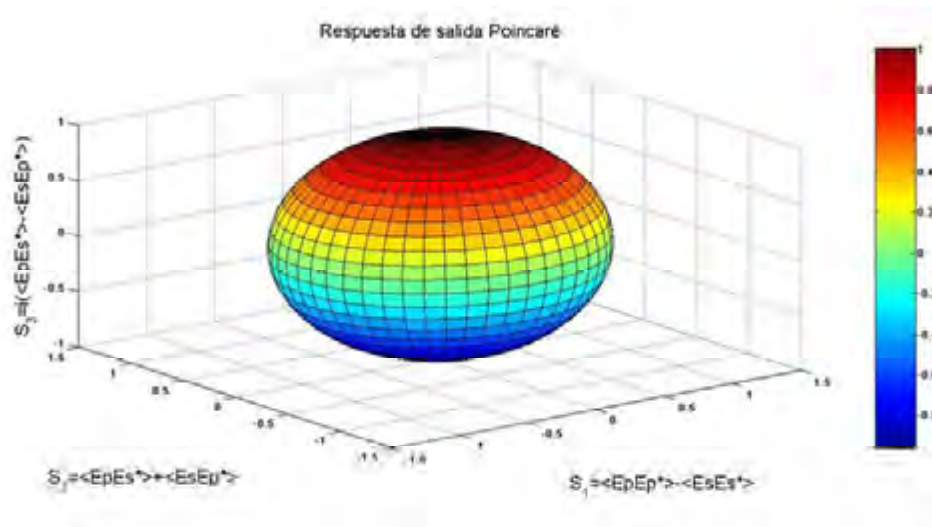


Figura 3.10. Respuesta de salida representada en la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Miel Golden Hills* (M_2).

La tercera miel en el mercado se encuentra como *Nattura Miel 500g* (M_3). En su etiqueta como una miel 100% de origen natural; es decir, es considerada como una genuina miel de abeja. Los estudios realizados por PROFECO [18] a esta miel sostienen que contiene 17.9% de agua, 37.77% de fructuosa, 38.82% de glucosa y un 0.66% de sacarosa, a pesar de tener un porcentaje de sacarosa, indicador de adulteraciones presentes en la miel. También es considerada como una miel que cumple con los estándares de madurez, deterioro y limpieza.

Para continuar con la caracterización polarimétrica de la miel se obtiene la matriz de Mueller de la muestra con el objetivo de interpretar por medio de las métricas de polarización su comportamiento ante la incidencia de estados de polarización controlados. La tabla 3.3 presenta algunas de las métricas aplicadas.

M_3	
DM	0.0505
DL	0.0499
DC	0.0072
PM	0.0270
DI	0.9960
QM	2.9662
TC	0.9941
Add	0.0348

Tabla 3.3. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra de *Natura Miel* 500g (M_3).

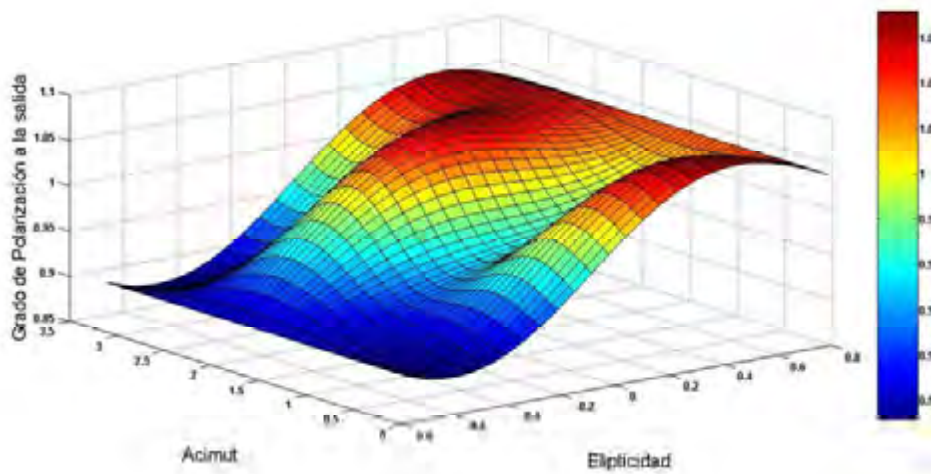


Figura 3.13. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Natura Miel* 500g (M_3).

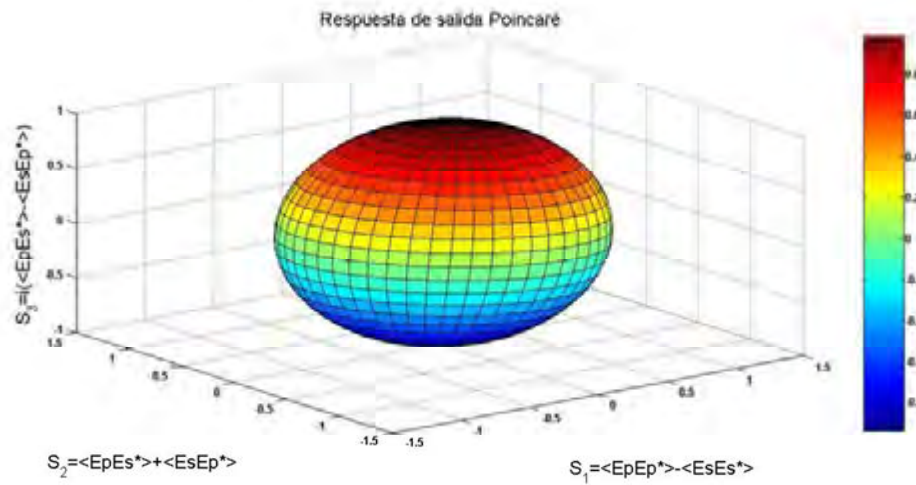


Figura 3.14. Respuesta de salida representada en la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Nattura Miel 500g* (M_3).

La cuarta miel bajo estudio tiene el nombre comercial de ***Miel Carlota 300g***, esta miel contiene los porcentajes de fructuosa (37.72%), glucosa (33.5%) y agua (18.9%) y una porcentaje de adulteración con azúcares que son ajenos a los producidos naturalmente como lo es la sacarosa (0.71%). Esta adulteración presente en la miel puede ser producida por el proceso industrial al que ha sido expuesta, al mal manejo de la miel al ser expuesta a condiciones climáticas inapropiadas para la miel como lo puede ser exposición a la luz solar directa o por haber sido extraída antes de ser una miel óptima (madura) para su extracción de la colmena.

Esta miel cumple con las normas mexicanas que rigen (norma NOM-051-SCFI-1994) el mercado nacional de mieles, así como la investigación realizada por PROFECO [18], por ello es considera como una miel 100% natural.

Para poder iniciar con el estudio a la miel es necesario obtener la matriz de Mueller de la muestra ***Miel Carlota 300g*** (M_4). Los resultados de algunas de las métricas de polarización obtenidas se presentan en la tabla 3.4.

M ₄	
DM	0.0357
DL	0.0326
DC	0.0144
PM	0.0205
DI	0.9940
QM	2.9589
TC	0.9910
Add	0.0124

Tabla 3.4. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Miel Carlota 300g* (M₄).

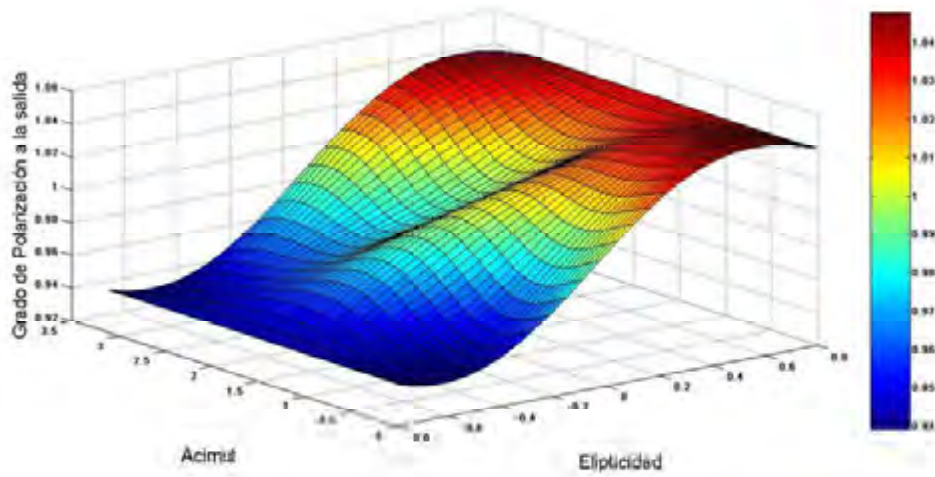


Figura 3.15. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Miel Carlota 300g* (M₄).

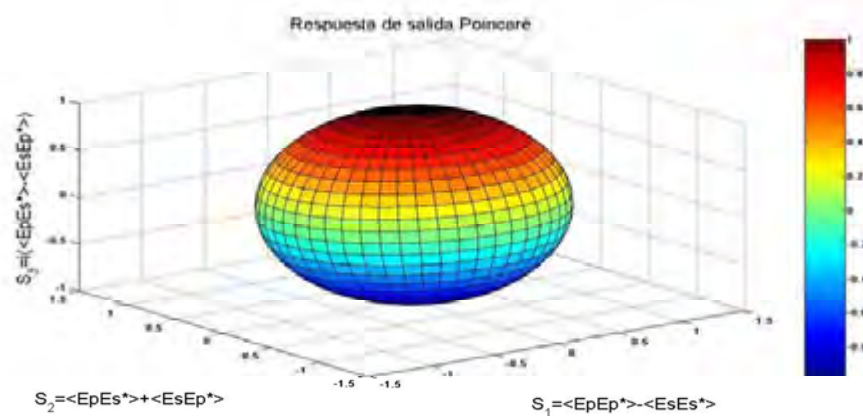


Figura 3.16. Respuesta de salida representada en la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Miel Carlota 300g* (M₃).

La quinta miel que fue estudiada lleva por nombre comercial **Great Value 730g** (M₅), esta miel contiene los porcentajes de fructuosa (38.4%), glucosa (32.36%) y agua (17.5%) y un porcentaje de adulteración con azúcares que son ajenos a los producidos naturalmente como lo es la sacarosa (0.85%). A pesar de contener un porcentaje de sacarosa es considerada como una miel 100% auténtica por el estudio realizado por PROFECO. Esta miel cumple con el grado de madurez y deterioro, características que corresponden a los estudios realizados en las normas mexicanas (NOM-051-SCFI-1994).

En el estudio de caracterización óptica se busca una métrica de polarización obtenida a partir de la matriz de Mueller de la muestra de miel, con el objetivo de encontrar una métrica que represente los cambios en las concentraciones de adulterantes presentes en la miel. La variabilidad en las formas de adulteración de las mieles, así como los diferentes tipos hace que los procedimientos químicos estén regidos bajo márgenes que correspondan a la procedencia de la miel: tipo de floración, lugar de procedencia, entre otros.

La metodología utilizada en el trabajo de tesis se basa en las teorías de Mueller-Stokes las cuales determinan la respuesta polarimétrica de algún objeto bajo estudio, para el caso de la miel, estos estudios buscan el comportamiento de la muestra ante estados de polarización incidentes que den lugar a cambios que permitan observar diferencias entre los distintos tipos de mieles sin importar el origen botánico o químico.

En la tabla 3.5, se observa métricas relacionadas al comportamiento de la miel ante los estados de polarización incidentes para su posterior análisis comparativo con mieles y jarabes de maíz ricos en fructuosa, siendo este azúcar el más común en el proceso de adulteración.

M_5	
DM	0.0257
DL	0.0224
DC	0.0125
PM	0.0200
DI	0.9936
QM	2.9590
TC	0.9904
Add	0.0136

Tabla 3.5. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Miel Great Value 730g* (M_5).

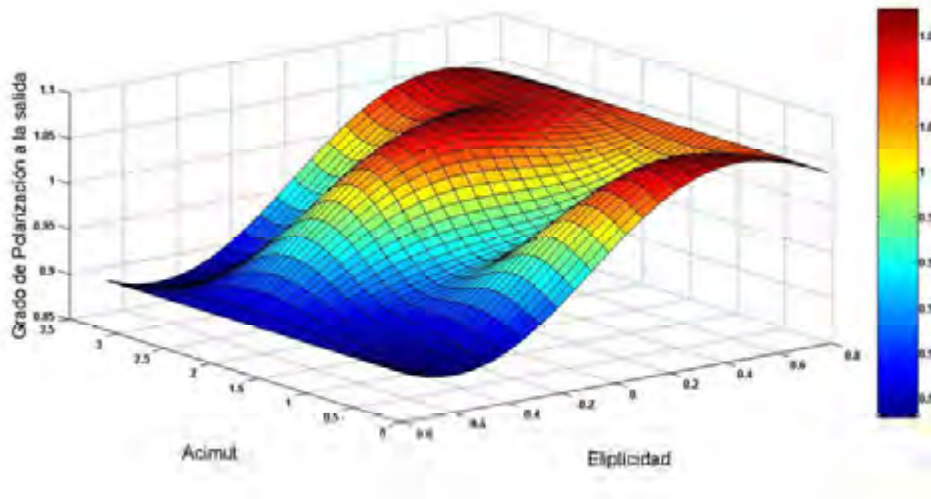


Figura 3.17. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Miel Great Value730g* (M_5).



Figura 3.18. Respuesta de salida representada en la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Miel Great Value 730g* (M_5).

La sexta muestra bajo estudio lleva por nombre comercial *Queen Bee 355g* (M_6), esta miel es considerada por el estudio de PROFECO [17] como un producto con 16.5% de adulteración en presencia de azúcares ajenos a la miel de abeja. La caracterización polarimétrica de la miel se presenta en las métricas obtenidas a partir de la matriz de Mueller.

En la tabla 3.6 se observan las diferentes métricas obtenidas de la miel *Queen Bee 355g* (M_6).

M_6	
DM	0.0377
DL	0.0377
DC	0.0016
PM	0.0238
DI	0.9908
QM	2.9395
TC	0.9863
Add	0.0126

Tabla 3.6. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Miel Queen Bee 355g* (M_6).

En las siguientes figuras se observa el grado de polarización a la salida DOP de la miel en función de los estados de polarización incidentes, figura 3.19. La respuesta polarimétrica a la salida del sistema expresado en la esfera de Poincaré, figura 3.20.

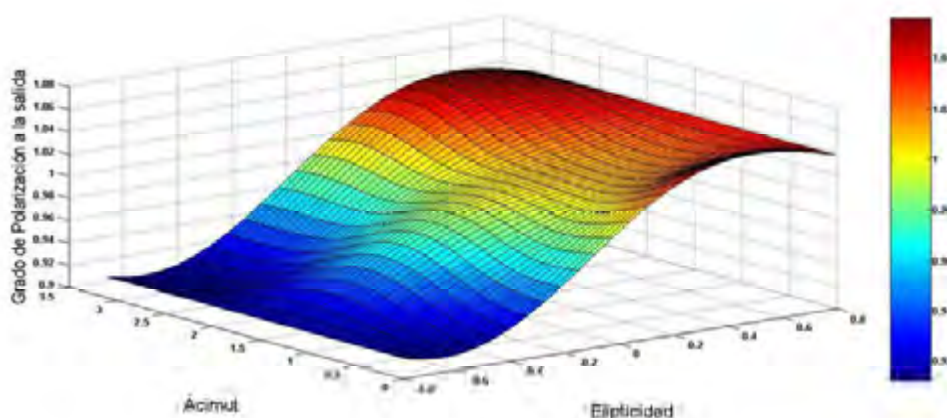


Figura 3.19. Grado de polarización a la salida de la muestra de *Miel Queen Bee 355g* (M_6).



Figura 3.20. Respuesta de salida Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de *Miel Queen Bee 355g* (M_6).

La séptima miel bajo estudio lleva por nombre comercial *Miel Gota de Campo 380g* (M_7) y es considerada como una miel conformada con un 87.9% de azúcares diferentes a la miel por el estudio realizado por la PROFECO [18]. A esta miel se le realiza el mismo estudio polarimétrico, es decir; se generaron y analizaron seis estados de polarización que interaccionaron con la miel, la respuesta a los seis estados de polarización, bajo las mismas condiciones en los que fueron generados los estados de polarización. En la tabla 3.7 se observa las métricas de polarización resultantes para la muestra *Miel Gota del Campo 380g*.

M_7	
DM	0.0403
DL	0.0382
DC	0.0127
PM	0.0169
DI	0.9874
QM	2.9186
TC	0.9813
Add	0.0163

Tabla 3.7. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Miel Gota del Campo 380g* (M_7).

En las siguientes figuras se observa el comportamiento de la muestra *Miel Gota del Campo* (M_7). La interpretación gráfica de los cambios en los estados de polarización se observa en las gráficas del grado de polarización a la salida (DOP) en función del acimut y elipticidad, figura 3.21. La representación de Poincaré de la respuesta en la polarización de salida, figura 3.22.

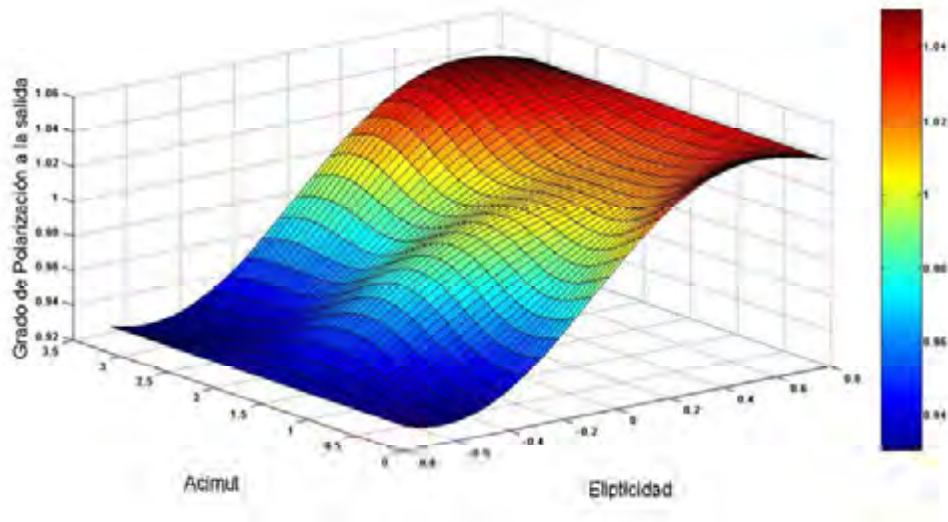


Figura 3.21. Grado de polarización a la salida de la muestra de la muestra *Miel Gota del Campo* (M_7).

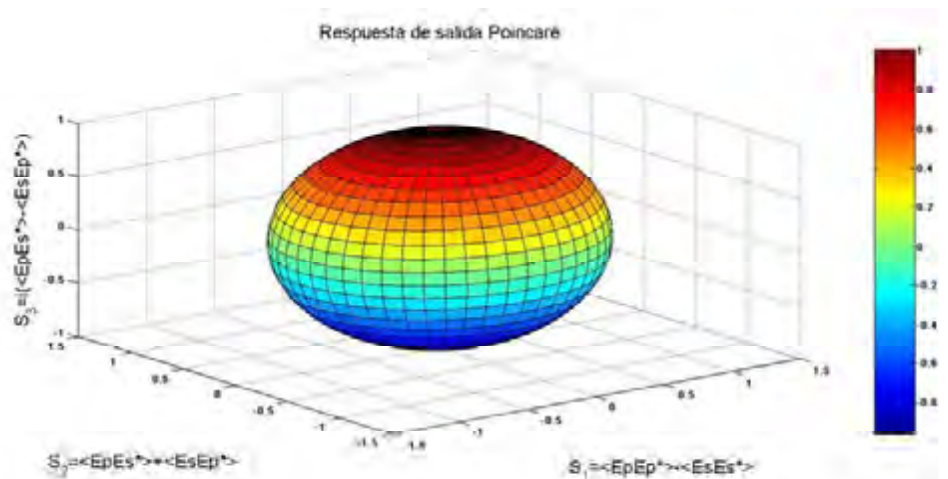


Figura 3.22. Respuesta de salida Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de la muestra *Miel Gota del Campo* (M_7).

En el estudio de la caracterización polarimétrica de las mieles se ha incluido en la lista el jarabe de maíz de alta fructuosa conocido en el mercado como jarabe de maíz Karo, señalando que es un producto dedicado al mercado infantil; es decir, es un endulzante recomendado para consumidores en los primeros años de vida.

El objetivo de incluir el jarabe de maíz en el estudio polarimétrico es con el fin de comparar el comportamiento polarimétrico entre mieles que se presentan como auténticas donde sus adulterante se presenta como jarabe de maíz de alta fructuosa.

El jarabe de alta fructuosa es un jarabe de maíz de que ha sido modificado mediante procedimientos químicos para producir que la glucosa se reduzca convirtiendo un porcentaje alto del contenido en fructuosa lo que genera un aumento de la dulzura en el jarabe, donde la dulzura requerida depende de la utilidad del jarabe.

Las métricas obtenidas a partir de la matriz de Mueller del jarabe de maíz Karo se presentan en la tabla 3.8.

M_{Karo}	
DM	0.0327
DL	0.0322
DC	0.0059
PM	0.0177
DI	0.9930
QM	2.9542
TC	0.9896
Add	0.0101

Tabla 3.8. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra *Jarabe de Maíz Karo 500ml* (M_{Karo}).

De la misma forma que fueron presentados los resultados para las mieles, para entender el fenómeno de el cambio en el estado de polarización generado de la interacción del haz con el jarabe de maíz. El grado de polarización a la salida (DOP) de la muestra en función de los estados de polarización incidentes,

figura 3.23. La representación de Poincaré de la respuesta en la polarización de salida, figura 3.24.

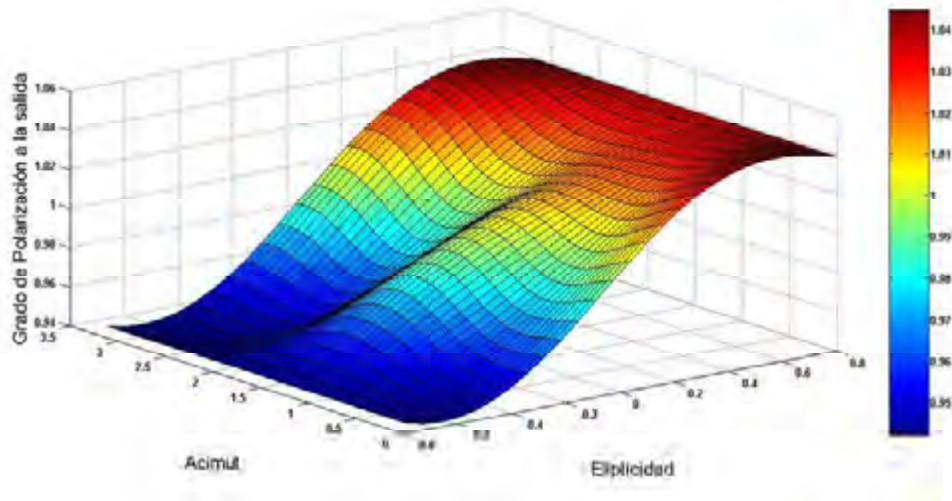


Figura 3.23. Grado de polarización a la salida de la muestra de la muestra de *Jarabe de Maíz Karo 500ml* (M_{Karo}).

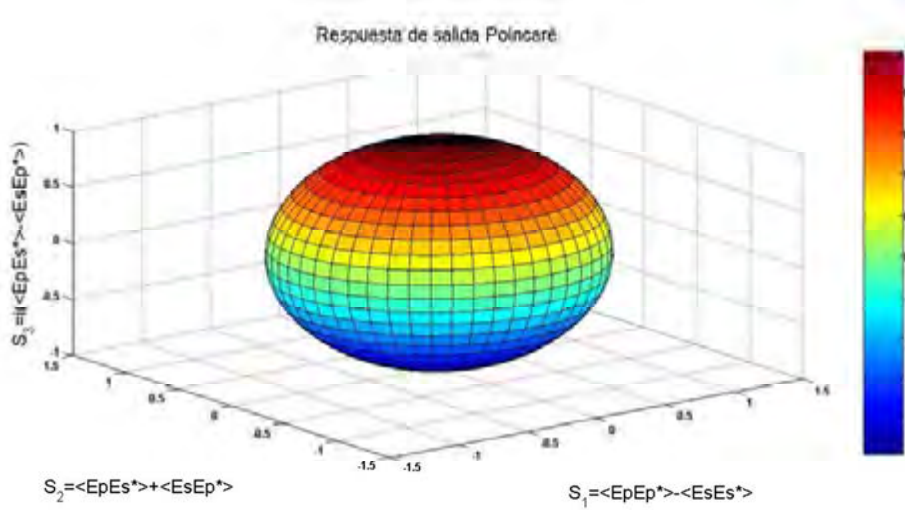


Figura 3.24. Respuesta de salida Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de la muestra *Jarabe de Maíz Karo* (M_{Karo}).

Con el objetivo de hacer que el estudio en los posibles adulterantes en las mieles se obtuvo en el mercado un concentrado de fructuosa diluida. El objetivo de hacer el estudio polarimétrico de esta muestra de jarabe es con el fin de encontrar similitudes entre las mieles que se han presentado con un grado alto de adulterantes.

Realizando el mismo estudio que a las mieles, se obtienen las métricas de polarización presentadas en la tabla 3.9.

$M_{\text{Fructuosa}}$	
DM	0.0366
DL	0.0363
DC	0.0050
PM	0.0163
DI	0.9907
QM	2.9390
TC	0.9861
Add	0.0124

Tabla 3.9. Tabla de métricas de polarización correspondiente a la muestra de *Fructuosa diluida* ($M_{\text{Fructuosa}}$).

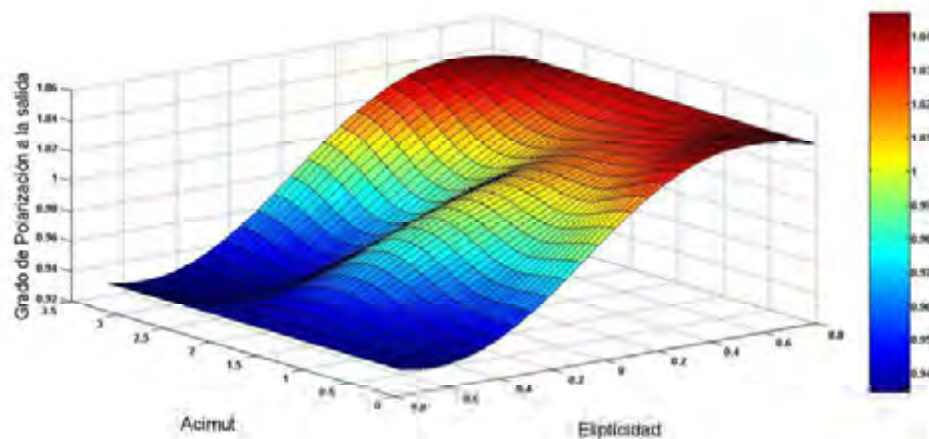


Figura 3.25. Grado de polarización a la salida de la muestra de la muestra de *Fructuosa diluida* ($M_{\text{Fructuosa}}$).

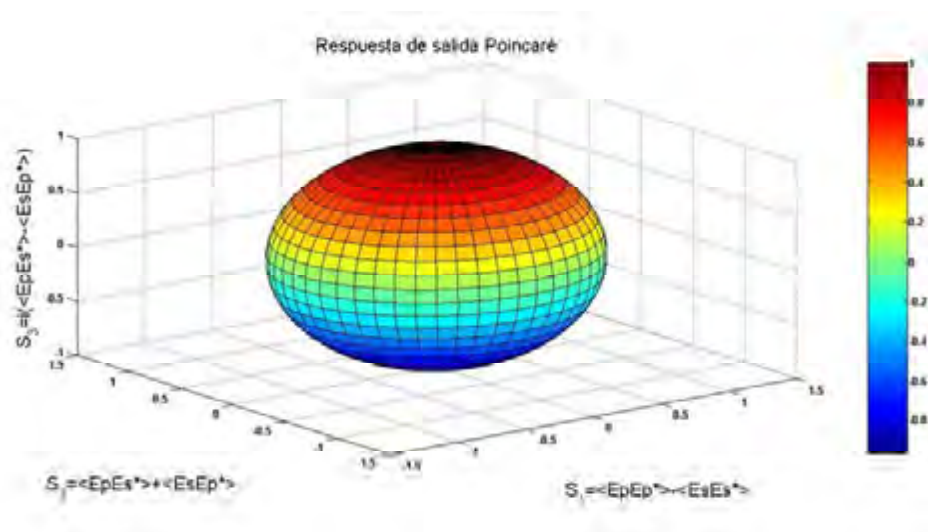


Figura 3.26. Respuesta de salida representada por la esfera de Poincaré, en función de los valores de los parámetros de Stokes de la muestra de la muestra *Fructuosa diluida* ($M_{\text{Fructuosa}}$).

3.3.2 Interpretación de resultados polarimétricos.

Una vez caracterizadas todas las muestras es posible llegar a conclusiones en el estudio polarimétrico de las mieles y sus posibles adulterantes. Uno de los objetivos generales es encontrar una métrica que genere cambios entre las diferentes mieles auténticas y adulteradas como referencia en los estudios realizados por PROFECO [18], buscando que las métricas generadas por la matriz de Mueller de la miel en respuesta de los cambios en los estados de polarización incidentes sean visibles como una técnica alternativa en la identificación de adulterantes.

Las matrices de Mueller de las muestras que han sido estudiadas se presentan en el Apéndice A, en este podemos encontrar un imagen de la muestra de miel como es encontrada en el mercado, es importante señalar que las mieles a pesar de resultar ser mieles adulteradas se presentan como 100% de origen natural.

En la tabla 3.10 se presenta el conjunto de métricas de polarización de todas las muestras de mieles, incluido los estudios realizados a jarabes de maíz y la fructuosa diluida. Donde esperamos observar cambios significativos entre mieles auténticas y mieles adulteradas, identificando mieles que reaccionan

ante los estados de polarización como lo hacen los jarabes de maíz o la fructuosa diluida. Cotejando resultados con la referencia principal que es el estudio realizado por PROFECO.

	M₁	M₂	M₃	M₄	M₅	M₆	M₇	M_{Karo}	M_{Fructuosa}
DM	0.0469	0.0317	0.0505	0.0357	0.0257	0.0377	0.0403	0.0327	0.0366
DC	0.0466	0.0314	0.0499	0.0326	0.0224	0.0377	0.0382	0.0322	0.0363
DL	0.0047	0.0043	0.0072	0.0144	0.0125	0.0016	0.0127	0.0059	0.0050
PM	0.0203	0.0216	0.0270	0.0205	0.0200	0.0238	0.0169	0.0177	0.0163
DI	0.9885	0.9935	0.9960	0.9940	0.9936	0.9908	0.9874	0.9930	0.9907
QM	2.9230	2.9574	2.9662	2.9589	2.9590	2.9395	2.9186	2.9542	2.9390
TC	0.9829	0.9903	0.9941	0.9910	0.9904	0.9863	0.9813	0.9896	0.9861
Add	0.0096	0.0107	0.0348	0.0124	0.0136	0.0126	0.0163	0.0101	0.0124

Tabla 3.10. Tabla de métricas de polarización del conjunto de mieles, jarabe de maíz y fructuosa diluida.

Dónde:

M₁	<i>Vita Real Miel</i>
M₂	<i>Miel Golden Hills</i>
M₃	<i>Nattura Miel</i>
M₄	<i>Miel Carlota</i>
M₅	<i>Miel Great Value</i>
M₆	<i>Miel Queen Bee</i>
M₇	<i>Miel Gota del Campo</i>
M_{Karo}	<i>Jarabe de Maíz Karo</i>
M_{Fructuosa}	<i>Fructuosa diluida</i>

A partir de la tabla 3.10 se observa el comportamiento de las diferentes métricas de polarización para cada una de las mieles. Las primeras métricas de polarización corresponden a las variaciones en los índices de diatenuación total (DM), lineal (DL) y circular (DC) para cada una de las muestras. El índice de diatenuación fue definido en secciones anteriores como la métrica que mide la absorción de energía del haz incidente, este se definido en función de algunos de los valores de la matriz de Mueller.

Los índices DM y DC de todas las muestras de mieles así como los jarabes de maíz presentan un comportamiento similar, donde los valores de mayor magnitud corresponden a mieles con una tonalidad más oscura comparada con las demás, estas mieles son la **Vita Real Miel** (M_1) y la **Nattura Miel** (M_3), un aumento en la absorción de energía en las mieles es atribuido no solo a la coloración de la miel sino también al estado de maduración de la miel. Al observar la matriz de Mueller de cada miel observamos que las componentes de atenuaciones lineales (m_{01} y m_{02}) corresponden a valores en magnitud menor al ser comparados con la respuesta a atenuaciones circulares (m_{03}).

Los estados de polarización circulares presentan una mayor respuesta a los estados linealmente polarizados, esta diferencia en la respuesta en polarización corresponde a la interacción del haz con la estructura molecular de la miel. El fenómeno por el cual la miel tiene diferente respuesta a los estados de polarización lineales a los circulares se presenta por la propiedad de ser una molécula quiral, es decir; la quiralidad de una molécula es la propiedad de girar o rotar el campo electromagnético un cierto ángulo [21, 22]. Al hacer incidir luz polarizada a una sustancia que posea moléculas quirales desvía el haz polarizado cambiando el estado de polarización incidente.

La miel al ser una molécula quiral por contener sacarosa, fructuosa, glucosa, entre otros; presenta dicroísmo circular al comportarse de forma distinta a los seis estados de polarización, cambiando los índices de diatenuación para los diferentes estados incidentes [21, 22].

El índice de diatenuación lineal presenta valores similares en diferentes grupos de mieles, las mieles **Vita Real Miel** (M_1) y **Miel Golden Hills** (M_2) comparten el mismo comportamiento ante este tipo de polarizaciones incidentes, estas muestras se consideran con un porcentaje nulo o bajo de adulteraciones ante los estudios de PROFECO. El otro conjunto son las mieles **Great Value** (M_5) y **Miel Gota del Campo** (M_7), estas comparten valores cercanos para la diatenuación lineal, es decir; ante la exposición a polarizaciones lineales tienden a interactuar de forma similar con el haz. Cabe señalar que los estudios por PROFECO estas muestras presentan

adulteraciones al contener porcentajes de sacarosa y azúcares ajenos a la miel de abeja, en la figura 3.27 se presenta un gráfico de los resultados obtenidos por la PROFECO a las muestras que se han estudiado en este trabajo de tesis.

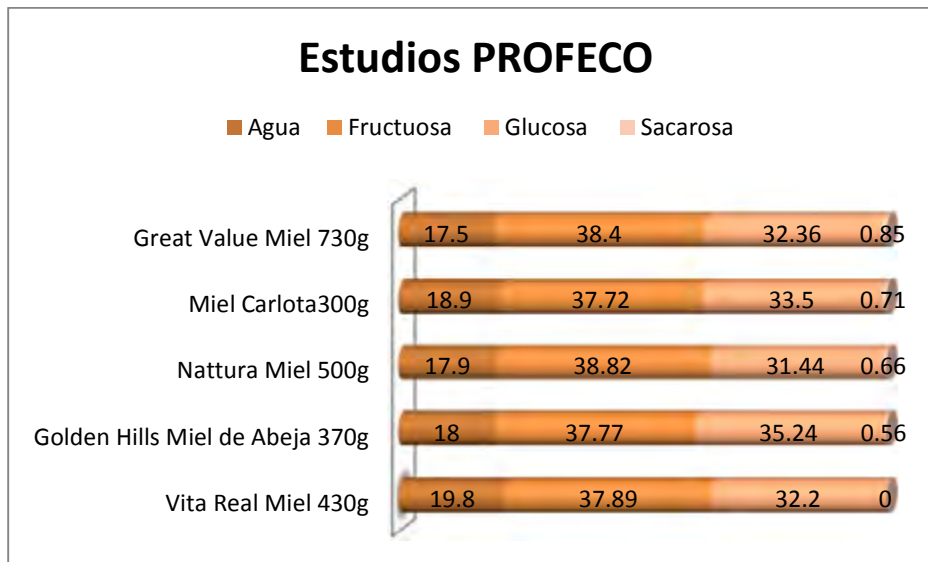


Figura 3.27. Estudio realizado por PROFECO, contenidos en porcentajes de fructuosa, sacarosa, agua y glucosa en las muestras que se han estudiado luz polarizada y Raman.

Otro conjunto de mieles presentan comportamientos similares ante polarizaciones lineales, estas muestras son el Jarabe de Maíz Karo (M_{Karo}) y la fructuosa diluida ($M_{\text{Fructuosa}}$). Los jarabes al ser altos en fructuosa reaccionan de la misma forma ante estados de polarización lineales incidentes.

El coeficiente de polarizancia (PM), ecuación (48), es una de las métricas que presenta una mayor relevancia en este estudio entre la diferencia de mieles consideradas auténticas y con adulteraciones presentes según el estudio de PROFECO [18]. La métrica PM arroja resultados sobre la capacidad de la muestra de polarizar la luz, no polarizar o polarizar parcialmente el haz incidente. En las primeras seis muestras el coeficiente de polarizancia permanece entre un rango de 0.0200 a 0.0300, las mieles **Vita Real Miel** (M_1), **Miel Carlota** (M_4) y **Miel Great Value** (M_5) tienden comportarse de la misma forma ante el coeficiente de polarizancia, este conjunto de mieles son

consideradas como libres de adulterantes por el estudio realizado por PROFECO.

En los valores para el coeficiente de polarizancia para las muestras: Miel Gota del Campo (M_7), Jarabe de Maíz Karo (M_{Karo}) y la Fructuosa diluida ($M_{\text{Fructuosa}}$) se observa que en esta métrica tienen valores cercanos entre ellas, para esta métrica está en función de los valores de la matriz de Mueller correspondientes a atenuaciones lineales y circulares (m_{10} , m_{20} , m_{30}). Las matrices de cada muestra presentan similitud entre estos parámetros lo que da lugar a que la métrica de polarizancia tenga esos resultados.

En presencia de grados de adulteración en fructuosa el comportamiento polarimétrico se ve reflejado en cambios en la métrica de polarizancia lo que genera que la muestra se comporte como un sistema que no polariza, conforme encontramos menor grado de adulteración tiende a polarizar el haz.

La métrica del índice de despolarización DI, ecuación (47), mide la capacidad del sistema de despolarizar la luz incidente en términos de elementos de la matriz de Mueller de cada muestra. Para todas las mieles, incluyendo el jarabe de maíz y la fructuosa, se comportan como un sistema no despolarizante por tener valores de DI cercanos a la unidad. Se observa que de esta métrica de polarización no es posible distinguir adulteraciones presentes en las muestras de miel solo llegar a la conclusión de que todas las mieles sin importar origen, calidad y madurez no despolarizan el haz incidente. Solo persiste la capacidad de polarizar en un porcentaje muy bajo la el haz por los resultados obtenidos en la métrica anterior de polarizancia.

La variable $Q(M)$, ecuación (52), es una métrica escalar de despolarización de la luz, descrita mediante la matriz de Mueller de la muestra bajo estudio. Esta métrica en función de los parámetros de polarizancia y diatenuación presenta la posibilidad de interpretar los resultados como sistemas que no polariza, despolarizan total y parcialmente. En los resultados obtenidos a partir de las matrices de Mueller de cada muestra de miel concluimos que despolarizan levemente, dentro del rango de resolución del equipo utilizado.

El teorema de Gil-Bernabeu [9,14], ecuación (52), es la condición necesaria para que una matriz de Mueller pueda ser una matriz de Mueller-Jones, lo que significa cuando la $TC=1$ el sistema no despolariza. Al igual que métricas de polarización concluimos que las muestras bajo estudio si despolarizan ligeramente el haz incidente.

El grado de anisotropía de despolarización genera información acerca de la capacidad del sistema bajo estudio de despolarizar el haz al interactuar con un medio isotrópico o anisotrópico. Los resultados de las muestras presentan variaciones significativas, entre ellas es importante destacar al maduración de la miel, la muestra **Nattura Miel** (M_3) en el momento del análisis polarimétrico presentó señales claras del proceso de cristalización, quedando plasmado en los resultados obtenidos en esta métrica en especial que habla sobre medios de propagación del haz polarizado al dejar de ser una sistema isotrópico pasando a ser un medio parcialmente anisotrópico.

Las muestras de **Miel Carlota** (M_4), **Miel Queen Bee** (M_6) y la **Fructuosa diluida** ($M_{Fructuosa}$) presentan valores cercanos entre ellos indicando que las adulteraciones presentes en la muestras no se altera significativamente el grado de anisotropía de despolarización.

El estudio en base a los parámetros de la matriz de Mueller de cada miel brinda una caracterización polarimétrica de la miel ante la interacción con un haz polarizado. La matriz de Mueller contiene la información necesaria para determinar las métricas antes señaladas y otras que no fueron incluidas en este trabajo de tesis, por no encontrar evidencia de aportación de información a nuestro estudio. El estudio de algunas métricas puede estar en función no solo de la matriz de Mueller sino también en los vectores de Stokes resultantes de cada estudio; es decir, la teoría de Stokes se encarga de caracterizar la polarización la luz generada en el PSG y analizada en el PSA.

En base a los estados de polarización cercanos a los ideales generados en el PSG son presentados como un vector de Stokes. En la búsqueda de cambios en los estados de polarización incidentes al interactuar con la miel y ver si existen cambios para los seis estados de polarización incidentes.

El siguiente estudio de resultados se retoma la teoría de Stokes para observar cambios entre los estados de polarización generados en el PSG, posteriormente los estados al interactuar con las muestras de miel y jarabes son afectados de alguna forma. Se presenta el vector de Stokes como resultante de la interacción luz-miel de los seis estados de polarización generados y analizados en el PSA.

Teóricamente la representación de un estado de polarización en el formulismo de Stokes se ha descrito en la sección 2.2. Los estados de polarización obtenidos como referencia para el estudio de la miel son medidos en presencia de una celda de cuarzo, se obtienen seis vectores correspondientes a cada estado de polarización. Una vez conocido el vector de Stokes incidente es comparado con los vectores con la misma polarización para cada muestra de miel.

En las siguientes tablas se presenta la respuesta en función de los vectores de Stokes a la salida de la muestra para los seis estados de polarización y cada una de las muestras bajo estudio.

Polarización p										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	1.0000	0.9981	0.9980	0.9905	0.9982	0.9983	0.9980	0.9856	0.9210	0.9992
S ₂	-0.0085	0.0576	0.0559	0.0700	0.0580	0.0541	0.0634	-0.1690	-0.3895	0.0387
S ₃	-0.0029	0.0202	0.0293	-0.1180	0.0127	0.0232	0.0047	0.0051	0.0026	0.0039

Tabla 3.11. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización lineal horizontal, p.

Polarización s										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	-0.9999	-0.9984	-0.9984	-0.9866	-0.9978	-0.9982	-0.9983	-0.9839	-0.9165	-0.9995
S ₂	0.0005	-0.0540	-0.0521	-0.1072	-0.0629	-0.0543	-0.0583	0.1782	0.3999	-0.0285
S ₃	-0.0130	-0.0180	-0.0239	0.1228	-0.0199	-0.0239	-0.0097	-0.0111	-0.0097	-0.0112

Tabla 3.12. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización lineal vertical, s.

Polarización x										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	-0.0026	-0.0595	-0.0633	-0.0306	-0.0605	-0.0615	-0.0680	0.1701	0.3910	-0.0424
S ₂	0.9992	0.9974	0.9976	0.9951	0.9950	0.9968	0.9960	0.9847	0.9194	0.9985
S ₃	-0.0389	-0.0400	-0.0296	-0.0937	-0.0792	-0.0513	-0.0583	-0.0363	-0.0430	-0.0350

Tabla 3.13. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización lineal a +45 grados, x.

Polarización y										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	-0.0155	0.0492	0.0442	0.0336	0.0596	0.0462	0.0470	-0.1881	-0.4086	0.0124
S ₂	-0.9998	-0.9988	-0.9989	-0.9978	-0.9975	-0.9989	-0.9989	-0.9821	-0.9127	-0.9999
S ₃	-0.0089	-0.0027	-0.0141	0.0571	0.0371	0.0065	0.0034	-0.0064	-0.0027	-0.0094

Tabla 3.14. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización lineal a -45 grados, y.

Polarización r										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	0.0407	0.0230	0.0149	0.1942	0.0341	0.0182	0.0541	0.0290	0.0326	0.0249
S ₂	0.0078	0.0053	-0.0107	0.0547	0.0548	0.0151	0.0139	-0.0012	-0.0056	0.0023
S ₃	0.9991	0.9997	0.9998	0.9794	0.9979	0.9997	0.9984	0.9996	0.9994	0.9997

Tabla 3.15. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización circular derecha, r.

Polarización l										
	M _R	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M _{Karo}	M _{Fructuosa}
S ₀	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
S ₁	-0.0199	-0.0094	-0.0183	-0.1676	0.0000	-0.0090	-0.0263	-0.0319	-0.0357	-0.0366
S ₂	-0.0277	-0.0168	-0.0044	-0.1314	-0.0787	-0.0310	-0.0419	-0.0226	-0.0174	-0.0292
S ₃	-0.9994	-0.9998	-0.9998	-0.9770	-0.9969	-0.9995	-0.9988	-0.9992	-0.9992	-0.9989

Tabla 3.16. Vectores de Stokes salientes cuando incide polarización circular izquierda, l.

La interpretación de los resultados anteriores se facilita si se realiza de acuerdo al siguiente análisis para una de las polarizaciones incidentes. Por ejemplo, la polarización lineal incidente p tiene asociado un vector de Stokes normalizado, de la forma $(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, donde T indica la operación de transpuesta conjugada, la componente S₀ está normalizada respecto a la unidad.

Del conjunto de tablas representativas a los cambios en los vectores de Stokes en su respuesta al interaccionar el haz parcialmente polarizado con las muestras de miel es claro observar que para el jarabe de maíz y la fructuosa diluida existen cambios significativos para cada estado de polarización, en especial en el jarabe de maíz.

Para los estados lineales horizontal y vertical (p, s), se produjeron cambios en el coeficiente del vector de Stokes S_2 correspondiente a estados lineales a $\pm 45^\circ$, lo que indica una tendencia a desviar el campo hacia una dirección.

Por otro lado, cuando son generados estados de polarizaciones lineales a $\pm 45^\circ$ la respuesta se hace visible en el coeficiente del vector de Stokes correspondiente a polarizaciones lineales horizontal y vertical (s y p), con lo que se concluye que en el estudio de la luz emergente de las muestras de miel y jarabes de maíz la muestra que da rastros significativos en cambios en el estado de polarización incidente es el **Jarabe de Maíz Karo** (M_{Karo}). Siguiendo este comportamiento en diferente proporción la fructuosa diluida.

Es importante señalar que el trabajar con vectores de Stokes se enfoca en los cambios en el haz de luz, es decir; se caracteriza el haz, no en las muestras de miel. Sin embargo las mieles y los jarabes inducen cambios en la polarización de los haces permitiendo un estudio comparativo sobre el haz sin tener en cuenta como tiene que ser la miel para dar lugar a los cambios en la polarización.

El resto de las mieles generan cambios en diferentes magnitudes al haz polarizado incidente, estos resultados no siguen alguna secuencia que permita concluir que en base al vector de Stokes se tengan cambios significativos que permitan detectar adulteraciones presentes en la miel. Esto nos lleva a la necesidad de conocer la matriz de Mueller de cada una de las mieles y jarabes para conocer ópticamente por completo las muestras, obtenido un comportamiento característico entre mieles que presentan algún tipo de adulteración.

La interpretación de los resultados anteriores se facilita si se realiza de acuerdo al siguiente análisis para una de las polarizaciones incidentes. P

Por ejemplo, la polarización lineal incidente p tiene asociado un vector de Stokes normalizado, de la forma $(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, donde T indica la operación de transpuesta conjugada. Observe que, excepto para las muestras de *Miel Gota del Campo* (M_7) y *Jarabe de Maíz Karo* (M_{Karo}), básicamente mantiene su estado de polarización al transmitirse a través de ellas, con valores que oscilan alrededor de 0.99 para el parámetro S_1 . El estado de polarización incidente cambia los valores unitarios de S_1 a 0.9856 y 0.9210, así como los de S_2 a -0.1690 y -0.3895, respectivamente. Esto significa que la polarización lineal horizontal es rotada en el sentido de las manecillas del reloj, lo que se conoce como sentido dextrógiro para un observador que registra valores teniendo la fuente como referencia. Específicamente, la *Miel Gota del Campo* gira 9.72^0 grados en campo lineal incidente, mientras que el *Jarabe de Maíz Karo*, lo gira a 22.92^0 grados.

3.3.3. Estudio Raman de la Miel.

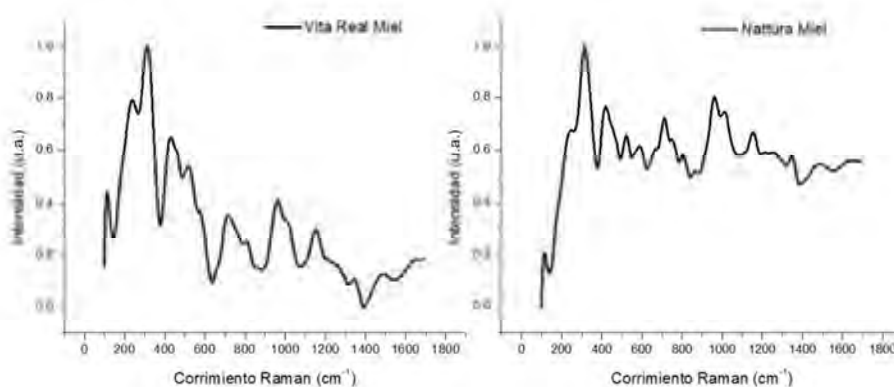
El estudio Raman es aplicado a la miel con el fin de contrastar el estudio polarimétrico anteriormente discutido. Los resultados que se presentan son la determinación de picos característicos en un espectro Raman para las componentes características de la miel de abeja (fructuosa, glucosa, sacarosa, agua). Es importante señalar que en presencia de diferentes compuestos naturales ajenos a este estudio (cera, cenizas, tierra, entre otras), los espectros no son idénticos a los que expone las referencias que se presentan como espectros obtenidos de las moléculas de fructuosa y glucosa. Sin embargo contienen características fundamentales de la fructuosa, entre otras moléculas relacionadas [23].

Se estudiaron cinco diferentes tipos de mieles, se utiliza una base de datos ya existente [23] con la cual es posible determinar las componentes principales encontradas en cada una de ellas. En este trabajo la materia que estamos estudiando es la miel de abeja la cual está constituida por una gran variedad de moléculas [23], las más significativas que son objetivo de estudio en el proceso de autenticación de la miel son la fructuosa, glucosa, sacarosa y agua por tener los mayores porcentajes en una muestra.

La primera miel bajo estudio Vita Real Miel (M_1), esta miel es considerada como una miel libre de adulterantes, la muestra Nattura Miel (M_3), Miel Carlota (M_4), Miel Queen Bee (M_6), Miel Gota del Campo (M_7) y el Jarabe de Maíz Karo (M_{Karo}). Existieron muestras no incluidas antes en el estudio Raman al no ser encontradas en lotes de caducidad similares a las demás mieles. En la figura 3.34 se muestran seis diferentes tipos de graficas correspondientes a las muestras estudiadas bajo esta metodología.

Las siguientes graficas corresponden a los espectros Raman con rango de 200 a 1800 cm^{-1} . La intensidad o potencia de un pico Raman normal depende de la forma compleja de la polarizabilidad de la molécula, de la intensidad de la fuente láser y de la concentración del grupo activo, además de otros factores [15].

Los espectros Raman de la fructuosa y glucosa que se encuentran en la bibliografía presentan tres picos de emisión característicos entre las frecuencias de 600 cm^{-1} y los siguientes dos picos entre 800 y 1000 cm^{-1} . En nuestro estudio esperamos encontrar picos alrededor de los ya señalados con el objetivo de corroborar que la muestra contiene las moléculas esenciales de la miel de abeja.



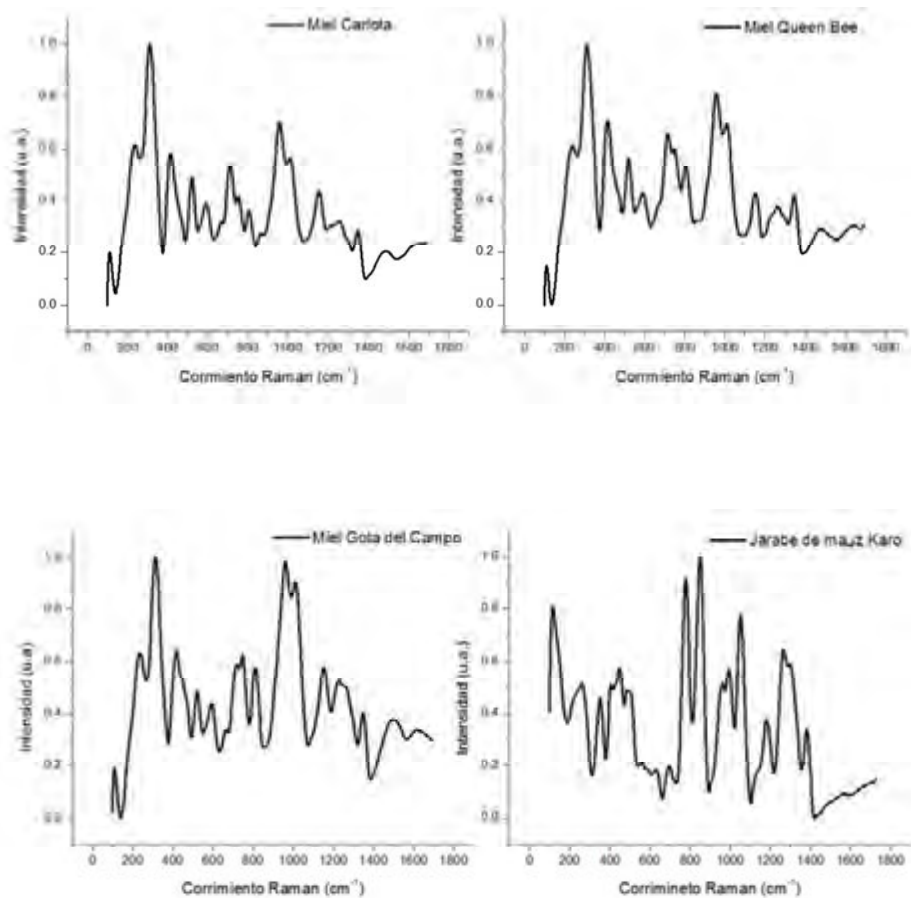


Figura 3.34. Espectros Raman de las cinco muestras de miel y jarabe de maíz.

Es del todo cierto que no es posible determinar con exactitud por medio de los espectros Raman descritos en la figura 3.34 las componentes esenciales, al no tener el mismo espectro que la molécula pura. El estudio Raman fue realizado con el objetivo de contrastar el método con luz polarizada y esperar que los grados de concentración de adulterantes (fructuosa) siguieran una secuencia en el grado de adulteración. Al reunir en un solo gráfico, figura 3,35, las seis muestras se observa la presencia de diferentes picos Raman que representan moléculas contenidas en las mieles y jarabes, como lo son: la manosa, dextrosa (α -D-glucosa), D-fructuosa y moléculas relacionadas con azúcares de la miel.

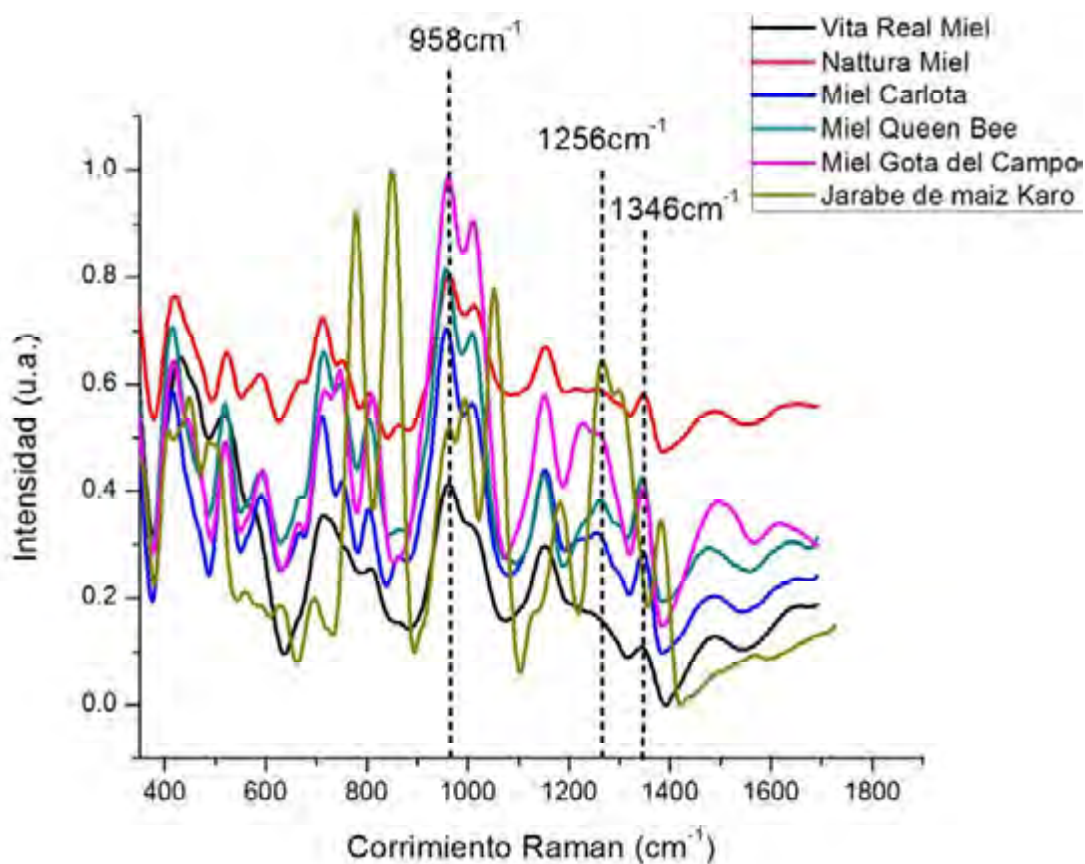


Figura 3.35. Espectros Raman de las muestras bajo estudio.

Los picos correspondientes a cada una de las moléculas, manosa (958 cm^{-1}) pico de intensidad media, la manosa es un simple azúcar que forma parte de algunos polisacáridos de las plantas. Dextrosa (α -D-glucosa), glycina (1346 cm^{-1}) pico de intensidad media baja y fructuosa (1256 cm^{-1}) pico de intensidad baja.

Los picos de emisión Raman correspondientes a la fructuosa no son de todo visibles como los encontramos en la teoría [23], las bandas de emisión de la fructuosa y glucosa no son del todo visibles por la fluorescencia presente en

cada una de las muestras, esto debido a la coloración de las mieles, ocultando el espectro Raman.

Capítulo 4.

Conclusiones.

4.1 Caracterización polarimétrica de la miel.

El objetivo general de este trabajo de tesis es la aplicación de técnicas ópticas en la autenticación de la miel de abeja, en especial, basadas en las teorías de Mueller- Stokes que son propias del manejo de la luz polarizada. El objetivo se centra en la determinación de la presencia de adulterantes en mieles nacionales comerciales que permitieran posicionar esta metodología como una alternativa en el estudio de calidad de la miel. En el desarrollo del trabajo de tesis se presenta la metodología basada en el control de la luz polarizada como principal herramienta para lograr el objetivo.

Se tomó como referencia el estudio realizado en el año 2011, en la Revista del Consumidor, la PROFECO donde se reportó un estudio mediante la aplicación de la técnica de *spectrometría de masas* para la identificación de diferentes elementos químicos que forman las mieles de abeja. En el estudio realizado por PROFECO se revisaron 29 muestras comerciales en un lapso de tres meses, sin mención alguna del costo necesario para realizar dicho proyecto ni del uso de técnicas ópticas basadas en cambios de la luz polarizada.

En el presente trabajo de tesis, se realizaron estudios a siete mieles comerciales, un jarabe de maíz y un concentrado de fructuosa. Todas las muestras estudiadas presentaron diferentes comportamientos ante los seis estados de polarización incidentes que se utilizaron para iluminarlas. Los resultados presentan una secuencia concluyente entre mieles y jarabes de maíz, este cambio significativo se presentó en el índice de polarizancia $P(M)$, con esta métrica de polarización es posible comparar los valores para el **Jarabe de maíz Karo**, la **Fructuosa diluida** y la **Miel Gota del Campo**, esta última miel cuenta con un 87.9% de adulteración, es decir; está compuesta con azúcares diferentes a la miel de abeja o en proporciones fuera de los rangos, según se aprecia en la tabla 1.1.

Concluimos aseverando que el comportamiento polarimétrico de mieles con adulteraciones en fructuosa puede ser descrito mediante esta metodología y la

aplicación concreta del cálculo de la polarizancia. Los estudios realizados en las mieles y jarabes de maíz siguen una tendencia a comportarse de una manera en particular ante un estado de polarización, esto porque las principales componentes de la miel (fructuosa, glucosa y sacarosa) están estructuradas como moléculas quirales cuya propiedad es girar el campo eléctrico incidentes a ellas.

De los resultado en los vectores de Stokes modificados por las muestras estudiadas, es evidente que ante los jarabes de maíz (Fructuosa diluida, jarabe de maíz Karo) el fenómeno de rotación (giro) en el campo eléctrico ante polarizaciones lineales, está presente al aumentar las componentes del vector de Stokes correspondientes a polarizaciones lineales (s, p, $\pm 45^0$). Al incidir polarizaciones (s, p) el vector de Stokes resultante presenta un aumento en el término correspondiente a polarizaciones de $\pm 45^0$ (S_2), lo que indica que existe alguna propiedad de la miel o de las componentes de la miel que causan este tipo de giros en el campo incidente, que se atribuye a las propiedades quirales antes mencionadas.

Con este resultado es posible determinar que si una miel presenta un comportamiento similar ante polarizaciones lineales como lo hace el jarabe de maíz o la fructuosa diluida tendremos la posibilidad de dudar de su procedencia y calidad de la miel. Es importante destacar que ninguna de las mieles que han sido consideradas como libres de adulteraciones o por mantenerse en los márgenes permitidos, tabla 17, sigue un comportamiento polarimétrico distinto a los jarabes de maíz altos en fructuosa.

Con estos resultados es posible diferenciar entre una miel auténtica o adulterada por altos contenidos de fructuosa, con esto llegamos al objetivo general de este trabajo, demostrando en forma teórica y experimental la capacidad de realizar estudios con luz polarizada, sin dejar a un lado la importancia y precisión de los estudios físico químicos.

4.2 Estudio Raman de la miel.

El estudio Raman en la detección de adulterantes aplicado a las mieles comerciales presenta un gran reto mediante esta metodología, el efecto de

fluorescencia esconde bandas de emisión importantes como lo es la fructuosa y glucosa, sin embargo, es posible obtener resultados que se acerquen a lo esperado. Quedando claro que esta técnica puede ser una alternativa confiable en la determinación de elementos ajenos a las mieles como lo pueden ser bacterias, pesticidas, entre otros, dañinos a la salud del ser humano.

Es posible conocer las proporciones generando una escala de intensidades a partir de los picos Raman obtenidos, uno de los objetivos fue encontrar una escala de adulteración con agua presentes en la miel, estos resultados no son reportados en esta ocasión. Las muestras presentaban diferentes estados de maduración (cristalización). Para realizar una mezcla óptima era necesario elevar la temperatura, lo que induce (al no poderse controlar) una forma de adulteración en la miel.

4.3 Trabajo a futuro.

El estudio con la polarizada enfocado en la caracterización óptica de los materiales presenta una oportunidad en el ámbito de la investigación. El estudio a la respuesta de estados de polarización controlados incidentes, medidos en respuesta por la matriz de Mueller, representa un estudio completo de las propiedades polarimétricas del sistema bajo estudio. El estudio a muestras translucidas como lo puede ser sanguíneas, orina, aceites, gasolinas, por mencionar algunos.

En muestras biológicas es importante la respuesta ante la variación de la longitud de onda incidente, esto genera nuevos resultados al tener un estudio espectro-polarimétrico, es decir; la respuesta de la muestra ante los estados de polarización incidentes a diferente longitud de onda. Por medio de la quiralidad de las moléculas es interesante el cambio en la polarización incidente generado por la estructura molecular de la misma, donde se encuentra un amplio campo de estudio como lo hemos presentado en este trabajo al observar la respuesta en cambios en polarización aplicado a las mieles.

Bibliografía.

- [1] <http://html.rincondelvago.com/calidad-de-la-miel-de-las-abejas.html>
- [2] <http://guidewhois.com/2011/02/cinco-cosas-sobre-el-jarabe-de-maiz-de-alta-fructosa/>
- [3] Stefan Bogdanov, Tomislav Jurendic, Robert Sieber, Peter Gallmann, *Honey for Nutrition and Health*. American Journal of the College of Nutrition. Vol. 27, 677-689. 2008.
- [4] José Armando Ulloa, Pedro M. Mondragón Cortez, Rogelio Rodríguez Rodríguez, Juan Alberto Reséndiz Vázquez, Petra Rosas Ulloa, *La miel de abeja y su importancia*. Revista Fuente. No.4, 2010.
- [5] Kaspar Rouff. *Authentication of Botanical origin of Honey*. University of Helsinki. 1974.
- [6] Max Born, Emil Wolf, *Principle of optics*. Seven Edition, Cambridge University. 1999.
- [7] Dennis Goldstein, *Polarized Ligth*. Second Edition, CRC Press, Florida, U.S.A. 22-105. 2003.
- [8] Michael Blas, Eric W. Van Stryland, David R. Williams, William L. Wolfe. *Handbook of Optics*. Second Edition. Vol II. 1995.
- [9] J.J. Gil E. Bernabeu, *A depolarization criterion in Mueller matrices*, Optica. Acta Vol. 32, 259-261. 1985.
- [10] Shih-Yau Lu and Russell A. Chipman. *Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition*. Optical Society of America. Vol.13, No.5, 1106-1110. 1996.
- [11] Rafael Espinosa Luna, Eusebio Bernabeu, Gelacio Atondo Rubio. *Q(M) and the depolarization index scalar metrics*. Applied Optics. Vol. 47, No. 10, 1575-1578 . 2008.
- [12] Edward Collett. *Field Guide to Polarization*. SPIE, Bellingham, Washington USA. 2009.

- [13] Rafael Espinosa Luna, S. Hinojosa Ruíz, Gelacio Atondo Rubio. *Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller*. Revista Mexicana de Física. 55 (3) 201-210, 2009.
- [14] Karla M. Salas Alcántara, Rafael Espinosa Luna, Ismael Torres Gómez. *Polarimetric Mueller-Stokes analysis of photonic cristal fibers whit mechanically induced long-period gratings*. Optical Engineering. Vol 51. 2011.
- [15] J. Ferraro y K. Nakamoto, *Introductory Raman Spectroscopy*, Academic Press, San Diego, California. 1994.
- [16] Schrader Bernhard, *Infrared and Raman Spectroscopy*, D-69451 Weinheim (Federal Republic of Germany). 1995.
- [17] Lakowicz J. R., Kluwer, *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Academic Plenum Publishers. Second edition. 1999.
- [18] Laboratorio PROFECO, Estudio de calidad: miel de abeja, Revista del Consumidor, Junio 2011. <http://revistadelconsumidor.gob.mx/?p=19045>
- [19] Gelacio Atondo Rubio, Rafael Espinosa Luna, Alberto Mendoza Suárez. *Mueller matrix determination for one dimensional rough surfaces with a reduced number of measurements*. Optics Communications. Vol. 244(2005) 7-13. 2004.
- [20] R. Espinosa Luna, G. Atondo Rubio, E. Bernabeu, S. Hinojosa Ruiz. *Dealing depolarization of light in Mueller matrices with scalar metrics*. Optik. Vol. 121 1058-1068. 2010.
- [21] [http://es.wikipedia.org/wiki/Quiralidad_\(qu%C3%ADmica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Quiralidad_(qu%C3%ADmica))
- [22] Eusebio Juaristi. Quiralidad: Izquierda y Derecha en la Química. Ciencia. Vol. 56 43-56. 2005.

- [23] Joke De Gelder, Kris De Gussem, Peter Vandenabeele and Moens. *Reference database of Raman spectra of biological molecules*. Journal of Raman Spectroscopy. 38 1133-1147. 2007.

Apéndice A.

Matrices de Mueller de las muestras de miel e imágenes de las presentaciones en el mercado.

Es importante destacar que todas las muestras que fueron estudiadas presentan fechas de caducidad entre los meses de Junio y Agosto del año 2014.

M₁. Vita Real Miel.

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.9991 & 0.0047 & 0.0003 & -0.0466 \\ 0.0048 & 0.9977 & -0.0739 & -0.0049 \\ 0.0030 & 0.0638 & 0.9873 & 0.0293 \\ 0.0194 & 0.0275 & -0.0365 & 0.9703 \end{bmatrix}$$



M₂. Miel Golden Hills.

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0023 & 0.0035 & -0.0314 \\ 0.0021 & 0.9975 & -0.0753 & -0.0100 \\ 0.0027 & 0.0620 & 0.9907 & 0.0138 \\ 0.0213 & 0.0351 & -0.0279 & 0.9839 \end{bmatrix}$$



M₃. Nattura Miel.

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0.9991 & 0.0039 & 0.0061 & 0.0499 \\ 0.0092 & 0.9897 & -0.0458 & -0.1607 \\ -0.0160 & 0.0974 & 1.0109 & 0.0979 \\ 0.0197 & -0.1127 & -0.0897 & 0.9478 \end{bmatrix}$$



M₄. Miel Carlota.

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0134 & -0.0053 & -0.0326 \\ 0.0138 & 0.9974 & -0.0834 & -0.0029 \\ 0.0003 & 0.0689 & 0.9831 & 0.0818 \\ 0.0152 & 0.0244 & -0.0704 & 0.9866 \end{bmatrix}$$



M₅. Miel Great Value.

$$M_5 = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.0072 & -0.0102 & -0.0224 \\ 0.0072 & 0.9976 & -0.0777 & -0.0118 \\ 0.0014 & 0.0623 & 0.9779 & 0.0408 \\ 0.0186 & 0.0321 & -0.0458 & 0.9958 \end{bmatrix}$$



M_6 . Miel Queen Bee.

$$M_6 = \begin{bmatrix} 0.9993 & -0.0013 & 0.0010 & -0.0376 \\ -0.0009 & 0.9978 & -0.0711 & 0.0048 \\ 0.0000 & 0.0633 & 0.9902 & 0.0324 \\ 0.0238 & 0.0249 & -0.0537 & 0.9743 \end{bmatrix}$$



M_7 . Miel Gota del Campo.

$$M_7 = \begin{bmatrix} 0.9993 & 0.0031 & -0.0123 & -0.0382 \\ 0.0046 & 0.9861 & 0.1526 & 0.0084 \\ 0.0048 & -0.1658 & 0.9627 & 0.0250 \\ 0.0156 & 0.0166 & -0.0282 & 0.9835 \end{bmatrix}$$



M_{Karo} . Jarabe de Maíz Karo.

$$M_{Karo} = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0059 & 0.0002 & -0.0321 \\ 0.0084 & 0.9219 & 0.3710 & 0.0158 \\ 0.0035 & -0.3873 & 0.9135 & 0.0250 \\ 0.0151 & 0.0146 & -0.0347 & 0.9896 \end{bmatrix}$$



$M_{\text{Fructuosa}}$ *Fructuosa diluida.*

$$M_{\text{Fructuosa}} = \begin{bmatrix} 0.9993 & -0.0030 & -0.0041 & -0.0362 \\ -0.0027 & 0.9991 & -0.0491 & 0.0058 \\ 0.0059 & 0.0415 & 0.9811 & 0.0237 \\ 0.0149 & 0.0162 & -0.0264 & 0.9860 \end{bmatrix}$$



Apéndice B.

Presentación de resultados en congresos.

Participación y exposición con el póster “Aplicaciones Polarimétricas para Identificar Miel de Abeja”, de Rafael Espinosa-Luna, Izcoatl Saucedo-Orozco, Cynthia Viridiana Santiago-Lona, Juan Manuel Franco-Sánchez, Alejandro Magallanes-Luján. VIII Simposio de la Óptica en la Industria, llevado a cabo en la ciudad de Toluca de Lerdo, Estado de México (8-10 de Septiembre 2011).

Memoria en extenso, “Polarimetric applications to identify bee honey”, Rafael Espinosa-Luna, Izcoatl Saucedo-Orozco, Cynthia Viridiana Santiago-Lona, Juan Manuel Franco-Sánchez, Alejandro Magallanes-Luján, PROC. SPIE Vol. 8287, pp 82870F-1-82870F-6 (2011), doi: 10.1117/12.911903.

Participación y exposición de póster “Comparación del método de cuatro y seis mediciones aplicado para la autenticación de miel de abeja”, de Izcoatl Saucedo Orozco y Rafael Espinosa Luna. IX Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, llevado a cabo en la ciudad de León, Guanajuato, México (16-18 de Mayo de 2012).

“Optical Characterization of Pure Bismuth thin Films”, R. Espinosa-Luna, Enrique Camps, Dagoberto Cardona, G. López-Morales, I. Saucedo-Orozco, E. de la Rosa, E. Castro-Camus, R. Carriles, B. S. Mendoza. XXI International Materials Research Congress, realizado en Cancún, Mexico (12 - 17 de agosto de 2012).

Participación con el póster “Aplicaciones polarimétricas para la autenticación de la miel de abeja”, de Izcoatl Saucedo Orozco y Rafael Espinosa Luna. LV Congreso Nacional de Física, llevado a cabo en la ciudad de Morelia, Michoacán, del 8 al 12 de Octubre de 2012.

Participación en el artículo de divulgación científica “Si Superman se untara miel de abeja, anularía el efecto nocivo de la kryptonita”, de Rafael Espinosa Luna e Izcoatl Saucedo Orozco. La Cronica.com.mx.
http://www.cronica.com.mx/notaOpinion.php?id_nota=703580