

Estudio de la actividad óptica de sustancias orgánicas

E. Hernández Hernández y E. Barrios Barocio

*Laboratorio de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma México,
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, 04510 Ciudad Universitaria, Ciudad de México.
e-mail: eduardo_hernandez@ciencias.unam.mx, e.barrios@ciencias.unam.mx*

Received 9 June 2022; accepted 9 August 2022

El poder rotatorio que presentan ciertas sustancias orgánicas es un fenómeno consecuencia de la actividad óptica, es decir, de la interacción del campo electromagnético con la estructura de ciertas moléculas. Por lo que es un tema de interés tanto en física como en química, y lo cual ayudaría en la formación académica de estudiantes, ampliando su visión fuera del ámbito académico de la física. En este trabajo se detalla como realizar una actividad experimental que permite abordar de forma cuantitativa este tema mediante el cálculo del poder rotatorio de compuestos químicos básicos y fáciles de conseguir o producir en un laboratorio de enseñanza. Los resultados encontrados para la rotación óptica de las sustancias estudiadas tienen un error promedio del 10 % respecto de los valores reportados; además, también es posible deducir cuando una sustancia no es pura ya que el error respecto de valores reportados se incrementa.

Descriptor: Actividad óptica; rotación específica; compuestos orgánicos.

Optical rotatory power found in certain organic substances is a phenomenon consequence of optical activity, that is, of the interaction between an electromagnetic field and the structure of particular molecules. Consequently, it is a topic of interest from the physics and chemistry perspectives, a situation relevant for the academic formation of students, broadening their vision outside academic physics. This paper details how to carry out an experimental activity that allows a quantitative analysis for calculating the rotational power of basic chemical compounds easy to obtain or produce in a teaching laboratory. The results found for the optical rotation of the studied substances have an average error of 10 % with respect to the reported values; moreover, it is also possible to deduce when a substance is not pure since the error with respect to the reported values increases.

Keywords: Optical activity, specific rotation, organic compounds.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.20.010209>

1. Introducción

1.1. Motivación

Uno de los temas más importantes en un curso de Laboratorio de óptica es el de la polarización de la luz, y en particular la *Ley de Malus*. De igual forma existen varias demostraciones que se basan en este fenómeno fundamental, como retardadores de fase, polarización por reflexión, efecto Faraday, efecto Pockels y *Actividad Óptica*, entre otros. Este último fenómeno, por lo general, es abordado de forma cualitativa en los laboratorios de enseñanza de óptica o, a lo más, solamente llevando a cabo mediciones simples del efecto sin ir más allá. Esto es debido principalmente a la falta de sustancias de fácil acceso para analizar, la falta de información de referencias adecuadas que permitan comparar resultados de forma cuantitativa y producir u obtener sustancias básicas de estudio. No obstante, poder resolver estos puntos, no solamente permite hacer cuantitativa esta actividad experimental, también permite transformarla en una actividad de caracterización básica de sustancias con propiedades de rotación óptica y poder contextualizarla en temas de química orgánica, ingeniería de materiales, industria de alimentos o incluso medicina, dándole un panorama interdisciplinario de aplicaciones e incrementando su valor pedagógico. Tomando como punto de partida esta situación, en este trabajo presentamos como llevar a cabo

una actividad experimental completa de actividad óptica con el objetivo de caracterizar sustancias orgánicas accesibles en un laboratorio de enseñanza de óptica de nivel licenciatura.

1.2. Antecedentes

La actividad óptica es un fenómeno debido a la presencia de enantiómeros, que son conjuntos de moléculas que se diferencian en su configuración espacial como imágenes especulares de ellas [1]. Esta diferencia produce birrefringencia, haciendo que el plano de polarización de la luz que pasa por la muestra gire. Esta rotación puede ser levógira (contrario al sentido horario) o dextrógira (en sentido horario) dependiendo del enantiómero con el que se trabaje o el que predomine en una mezcla.

En 1815 el físico Jean Baptiste Biot observó que, cuando un haz de luz polarizada linealmente atraviesa una solución de ciertas moléculas orgánicas (denominadas ópticamente activas), como azúcar, el plano de polarización gira. Distinguió entre sustancias que producen rotaciones de sentido dextrógiro (rotatorias D) y sustancias que producen rotación levógiro (rotatorias L) [1, 2].

Existen sustancias ópticamente activas en solución, donde el principal contribuyente al poder rotatorio viene de las propiedades de las moléculas individuales; también existen sustancias ópticamente activas cristalizadas, donde el poder

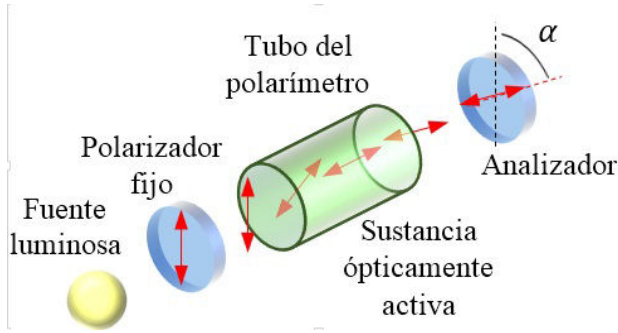


FIGURE 1. Esquema del funcionamiento de un polarímetro.

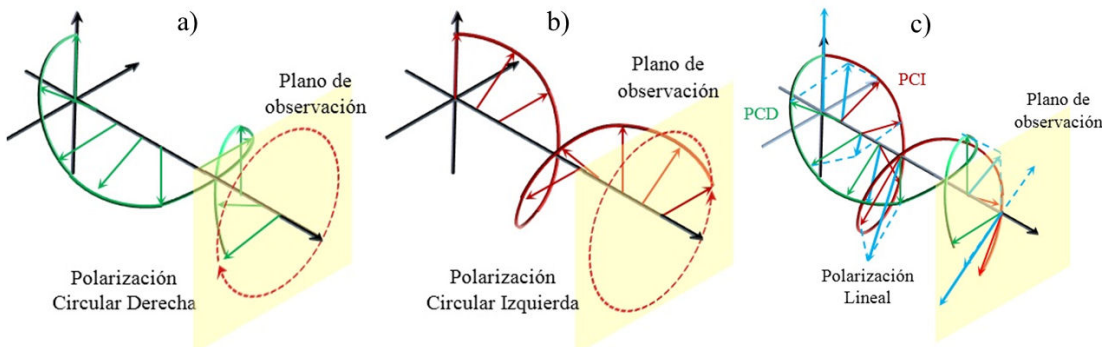
rotatorio es originado debido al arreglo de las moléculas en el cristal.

Augustin Fresnel, en 1825 propuso que estos materiales presentan una birrefringencia circular, es decir, el material posee un cierto índice de refracción ($n_{\mathcal{R}}$) para los estados con polarización circular derecha (\mathcal{R}), y otro ($n_{\mathcal{L}}$) para los estados con polarización circular izquierda (\mathcal{L}). Debido a que la luz linealmente polarizada se puede representar como una superposición de estados \mathcal{R} y \mathcal{L} ; ésta, al atravesar un medio ópticamente activo, sufre un desfase relativo entre los dos estados, lo cual provoca un cambio en el estado de polarización lineal observado al salir de la muestra [1, 2].

La actividad óptica esta presente en la industria gracias al uso de los Polarímetros, que presentan una configuración similar al esquema de la Fig. 1, consistente en una fuente de luz, un polarizador fijo, el tubo del polarímetro (donde se vierte la muestra) y un polarizador graduado que se puede girar (conocido como analizador); de esta forma se puede medir la rotación del ángulo de polarización que sufre la luz al pasar por la muestra ópticamente activa mediante una medición experimental de polarización lineal con el método de Malus [2], permitiendo la caracterización de su poder rotatorio y en consecuencia de su composición química (determinando la pureza de la sustancia).

2. El campo electromagnético y la actividad óptica

Para comprender el papel de la teoría electromagnética en la actividad óptica, partimos de asumir que se tiene, una onda

FIGURE 2. a) Polarización circular derecha (\mathcal{R}). b) Polarización circular izquierda (\mathcal{L}). c) Superposición de ambas polarizaciones.

linealmente polarizada formada por la superposición de un estado \mathcal{R} y un estado \mathcal{L} que se propaga en la dirección del eje z dentro de un material ópticamente activo, (Fig. 2), es decir:

$$\vec{E}_{\mathcal{R}} = \frac{E_0}{2} [\cos \theta_{\mathcal{R}} \hat{i} + \sin \theta_{\mathcal{R}} \hat{j}], \quad (1)$$

$$\vec{E}_{\mathcal{L}} = \frac{E_0}{2} [\cos \theta_{\mathcal{L}} \hat{i} - \sin \theta_{\mathcal{L}} \hat{j}], \quad (2)$$

con $\theta_{\mathcal{R}} = k_{\mathcal{R}}z - \omega t$, $\theta_{\mathcal{L}} = k_{\mathcal{L}}z - \omega t$, $\omega = cte$, $k_{\mathcal{R}} = k_0 n_{\mathcal{R}}$ y $k_{\mathcal{L}} = k_0 n_{\mathcal{L}}$, (Fig. 2c)). Siendo el estado resultante:

$$\vec{E} = E_0 \cos \left[\frac{(k_{\mathcal{R}} + k_{\mathcal{L}})z}{2} - \omega t \right] (\cos \alpha \hat{i} - \sin \alpha \hat{j}), \quad (3)$$

donde $\alpha = ((k_{\mathcal{L}} - k_{\mathcal{R}})z/2) = (k_0 z (n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})/2)$. De la Fig. 3a)

$$\alpha = \frac{(k_{\mathcal{L}}z - \omega t) - (k_{\mathcal{R}}z - \omega t)}{2} = \frac{1}{2} (\theta_{\mathcal{L}} - \theta_{\mathcal{R}}). \quad (4)$$

Por otro lado, si la longitud de la muestra (o medio de propagación) es l y dado que $k_0 = 2\pi/\lambda$, se encuentra que

$$\alpha = \frac{\pi l}{\lambda} (n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}). \quad (5)$$

Es decir, el cambio del ángulo de la polarización lineal emergente de la muestra, respecto a la entrante, depende de la diferencia en los índices $n_{\mathcal{L}}$ y $n_{\mathcal{R}}$, y de la longitud de la muestra [2].

Sustituyendo (5) en (3), y tomando

$$\gamma = \frac{2\pi (n_{\mathcal{R}} + n_{\mathcal{L}})z}{\lambda} - \omega t$$

se pueden distinguir dos casos:

- 1) Si $n_{\mathcal{L}} > n_{\mathcal{R}}$ (caso dextrógiro) entonces $\alpha > 0$, por lo que \vec{E} se ve como en la Fig. 3b), siendo $\vec{E} = E_0 \cos \gamma (\cos \alpha \hat{i} - \sin \alpha \hat{j})$.
- 2) Si $n_{\mathcal{R}} > n_{\mathcal{L}}$ (caso levógiro) entonces $\alpha < 0 \implies \alpha = -|\alpha|$ por lo que \vec{E} se ve como en la Fig. 3c), con $\vec{E} = E_0 \cos \gamma (\cos |\alpha| \hat{i} + \sin |\alpha| \hat{j})$.

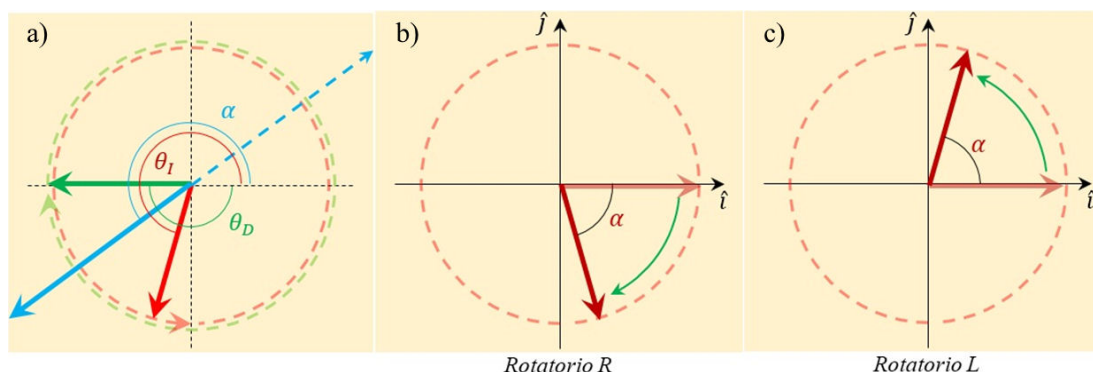


FIGURE 3. a) La superposición de polarizaciones circulares genera polarización lineal. b) Polarización dextrógira. c) Polarización levógira.

Por otro lado, se encuentra que el ángulo de rotación del plano de polarización también es dependiente de la concentración de moléculas ópticamente activas en la muestra, ya que los índices de refracción presentes en Ec. (5) son función de las moléculas solventes y de las moléculas ópticamente activas disueltas, así como de la longitud de onda empleada en el experimento [1]. Esto permite cuantificar la cantidad porcentual de una cierta molécula en una solución respecto de una referencia (la cual podría ser una solución pura de la molécula).

Existen varias convenciones para determinar y reportar la propiedad de la rotación específica de las sustancias, la más común se establece tomando una longitud de una muestra de $l = 10$ cm y la longitud de onda de 589 nm; bajo estas condiciones se cuantifica la *actividad óptica específica* ($[\alpha]_D$) respecto de la concentración de la muestra C [1]:

$$[\alpha]_D = \frac{\alpha}{Cl}. \quad (6)$$

En la bibliografía típica de química orgánica [1], se pueden encontrar tablas de valores de rotación específica (Tabla I), que ayudan a tener una referencia al momento de determinar su actividad óptica e identificar el compuesto con el que se trabaja.

Otra convención típica toma simplemente el ángulo de rotación de la polarización respecto de la longitud de la muestra (α/l). Esto es útil cuando se trabaja con sustancias puras o en situaciones donde la variación de concentración en una solución no es posible; una sustancia, sencilla de encontrar

TABLE I. Rotación específica de algunas moléculas orgánicas. Signo (+) indica rotación dextrógira y (-) levógira [1, 3, 15, 17].

Compuesto	$[\alpha]_D^\circ$
Sacarosa	+66.47
Fructuosa	-90.72.
Alcanfor	+44.26
Colesterol	-31.5
D-Limoneno	+123.8
L-Limoneno	-122.1
Agua	0

y con gran poder rotatorio, que se coloca comúnmente en esta situación es el jarabe de maíz ($\alpha/l = +12^\circ/\text{cm}$) [2].

De las Ecs. (5) y (6) se puede inferir que la rotación óptica de cada molécula varía debido a los cambios de la concentración o de la longitud de la muestra, por lo que en un análisis experimental se puede variar una u otra, dependiendo de las limitaciones experimentales. Por ejemplo, en el caso de aceites, no es sencillo encontrar solventes apropiados o disolverlos en agua para variar su concentración, por lo que variar la longitud de la muestra es una mejor opción; por otro lado, para azúcares, es fácil disolverlos en agua, por lo que es más sencillo variar la concentración. En este trabajo se realizaron mediciones de las dos formas, con el fin de ejemplificar los dos casos experimentales.

Un análisis del cambio de polarización a través de muestras ópticamente activas, que se realiza midiendo la intensidad y variando el ángulo del analizador del montaje básico del polarímetro, origina curvas sinusoidales (de Malus) que van presentando un desplazamiento angular de acuerdo con la variación de algunos de los factores presentes en Ec. (5).

Si se varía l de las muestras analizadas, al observar el cambio en el ángulo de polarización, es posible ajustar una ecuación lineal del tipo:

$$\theta_{m,M} = ml + b, \quad (7)$$

donde el subíndice m (o M) se refiere a el mínimo de la curva (o máximo) y b se relaciona con el mínimo (o máximo) elegido de la curva de referencia (cuando no hay muestra); comparando (5) con el modelo lineal se observa que la pendiente de la recta es equivalente al factor $(\pi/\lambda)(n_L - n_R)$, de donde es posible calcular la diferencia entre los índices de refracción del material como:

$$(n_L - n_R) = \frac{m\lambda}{\pi}. \quad (8)$$

Para encontrar el poder rotatorio α/l , se deben tener las condiciones $l = 1$ dm y $\lambda_{589} = 589$ nm, cosa que no siempre es posible debido a que la mayoría de los láseres son de una longitud de onda diferente, por lo que se debe dividir (5) entre l , mientras que para corregir la variación creada al trabajar con una λ_i diferente a 589 nm se introduce un uno dado por

λ_i/λ_i , tras realizar esto es posible identificar nuevamente la pendiente experimental, en términos de λ_i , llegando a

$$\frac{\alpha}{l} = m \frac{\lambda_i}{\lambda_{589}}, \quad (9)$$

y, si lo que se quiere es saber la rotación específica solo se debe de dividir (9) entre la concentración de la muestra.

Por otro lado si lo que se varía es la concentración C , también se puede ajustar una ecuación lineal similar a (7), solo que esta vez la pendiente de la recta es equivalente al factor $(\pi l/\lambda)((n_L - n_R)/a)$ donde el factor a es igual a la densidad de la sustancia entre su peso molecular $a = \rho/PM$ dando como resultado la concentración pura de la sustancia; así cuando $C = a$ se recupera (5). De lo anterior se tiene que

$$(n_L - n_R) = \frac{ma\lambda}{\pi l}, \quad (10)$$

en este caso, para determinar el ángulo de rotación específica nuevamente tomamos $l_{10} = 1$ dm, $\lambda_{589} = 589$ nm, así como $C = a$, suponiendo que se haya realizado el experimento con un valor de longitud diferente a 10 cm y una longitud de onda distinta se multiplica por factores de la forma l_i/l_i y λ_i/λ_i , consiguiendo así poner el ángulo de rotación específica en términos de la pendiente de la recta, tal que

$$\alpha_D = ma \frac{l_{10}}{l_i} \frac{\lambda_i}{\lambda_{589}}, \quad (11)$$

cabe aclarar que si al realizar las mediciones, con el arreglo del polarímetro, el analizador se gira en sentido antihorario, mirándolo en dirección de la fuente, se debe de introducir un signo menos en las expresiones antes deducidas, si el sentido del giro del analizador es horario las ecuaciones no requieren ninguna corrección.

La descripción anterior del fenómeno de actividad óptica es sencilla y suficiente para un nivel universitario básico, sin embargo, es una aproximación a la solución del problema. Una descripción más completa requiere de una descripción cuántica basada en conceptos de quiralidad, simetría y teoría de perturbaciones [2, 7].

3. Isomería óptica

Isomería es el término utilizado para referirse a moléculas que tienen la misma fórmula pero que, al ser desarrolladas, presentan variaciones entre ellas. Existen dos tipos principales de isomería:

- 1) *Isomería estructural*, son compuestos que presentan los mismos átomos, pero difieren en su orden y unión [8].
- 2) *Isomería espacial* (estereoisomería), son compuestos con los mismos átomos y enlaces, pero cuya orientación difiere en el espacio. Ésta última se subdivide en:

- 1) *Isomería geométrica* (imposibilidad de rotación sobre el eje de doble enlace) e

- 2) *Isomería óptica*, tienen las mismas propiedades físicas y químicas, pero difieren en su interacción con luz polarizada (un isómero es *dextrógiro* (+), mientras que otro es *levógiro* (-) (Fig. 4) [8].

Este trabajo involucra el estudio de isómeros ópticos, en este tipo de moléculas no es posible pasar de un isómero a otro por medio de una simple rotación ya que estas moléculas son el reflejo especular una de otra, esta propiedad las clasifica como quirales [9], y aquellos isómeros que cumplen ser imágenes especulares no superponibles son nombrados enantiómeros [10].

A continuación se presentan las principales características de las sustancias utilizadas en este trabajo.

3.1. Azúcares

Algunos de los enantiómeros con actividad óptica de más fácil adquisición son los monosacáridos y los disacáridos, en especial la glucosa, fructosa y sacarosa, debido a esto, es que se sugiere trabajar con ellos.

Los monosacáridos son sólidos incoloros y cristalinos, solubles en agua formados por una cadena de carbonos de enlaces simples [11], por ejemplo el gliceraldehído, el cual tiene dos isómeros ópticos, *D* y *L* (Fig. 4). En estos azúcares, cuando el grupo hidroxilo del átomo de carbono de referencia

D-Gliceraldehído L-Gliceraldehído

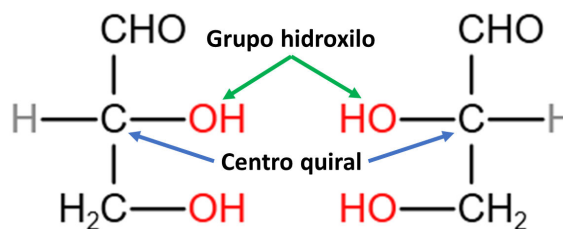


FIGURE 4. Isómeros ópticos del Gliceraldehído, se observa el carbono quiral o centro quiral y la diferencia de ubicación del grupo OH.

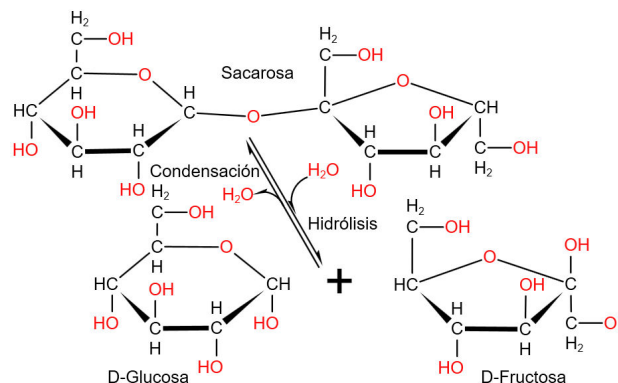


FIGURE 5. Reacción de formación y separación de la sacarosa.

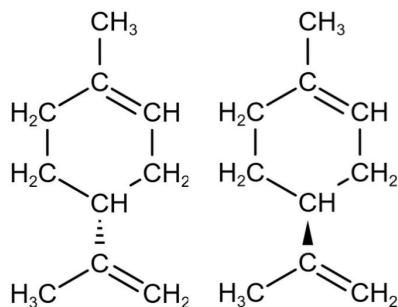


FIGURE 6. Izquierda, D-limoneno; derecha L-limoneno.

se halla en el lado derecho en la proyección de Fisher, respecto del centro quiral, se trata de un isómero *D*; cuando está a la izquierda es un isómero *L* [11]. La glucosa y la fructosa también presentan estas características [12].

Por otro lado los disacáridos están formados por dos monosacáridos unidos mediante un enlace O-glucosídico [11]. La sacarosa es uno de ellos y se puede encontrar de manera comercial, como azúcar de caña [1]. Los monosacáridos que conforman la sacarosa se puede identificar mediante hidrólisis obteniendo un equivalente de glucosa y fructosa, (Fig. 4). Esta mezcla 1 : 1 se conoce como azúcar invertida, ya que cambia el signo de la rotación óptica durante la hidrólisis de sacarosa ($[\alpha]_D = +66.5^\circ$) a una mezcla de glucosa/fructosa ($[\alpha]_D \approx -22.0^\circ$) [1].

3.2. Limoneno

El limoneno es una molécula orgánica, que se encuentra en cítricos y algunas otras plantas. Existen dos isómeros de limoneno (Fig. 6), se usa como aromatizante, disolvente y saborizante. El D-Limoneno ($C_{10}H_{16}$), se encuentra en el aceite de naranja, limón, mandarina, entre otros [13]. Puede extraerse fácilmente por destilación de las cáscaras y pulpas de los cítricos, aunque existen otros métodos más eficientes [13]. Es un líquido incoloro, con punto de ebullición de 176°C , soluble al agua [14] y con rotación específica de $+123.8^\circ$ [15].

El L-Limoneno ($C_{10}H_{16}$), se encuentra en aceites de agujas de pino, menta, hierbabuena, entre otros [13]. Se obtiene por purificación de monoterpenos, o por catálisis ácida [13]. Sin embargo también se puede obtener por medio de la destilación, aunque no es un proceso eficiente. Tiene un aspecto líquido de color amarillo claro con punto de ebullición de 175°C [16] y rotación específica de -122.1° [17].

4. Aplicaciones

Debido a que la actividad óptica es un fenómeno ligado a la configuración de las moléculas, es posible utilizarla para caracterizar diferentes sustancias que contengan dichas moléculas; por ejemplo, en la industria alimenticia, para determinar la concentración de sacarosa de muestras procesadas por inversión, se utiliza la expresión:

$$C_s [g/100 \text{ ml}] = 0.567(\alpha_v - 2\alpha_n), \quad (12)$$

donde C_s es la concentración de azúcar en unidades de gramo por cada 100 mililitros, α_v es el ángulo de rotación registrado en la disolución de sacarosa y α_n es el ángulo registrado respecto a una disolución de HCl y sacarosa (valor de referencia) [3]. Es importante remarcar la importancia conceptual de esta fórmula, ya que permite caracterizar una propiedad química de una sustancia (en este caso concentración de sacarosa en una disolución) respecto de un valor de referencia convenido (en el ejemplo, la disolución de HCl y sacarosa).

Otra industria que utiliza la actividad óptica es la tequilería, donde ayuda a controlar la calidad del proceso de fermentación [4]. En el campo de la medicina, se están desarrollando métodos de medición de glucosa en sangre basados en estos conceptos [5]. Otras referencias donde se ha utilizado este método se muestran en la Tabla II.

Como se puede observar, la actividad óptica es un concepto de importancia práctica en varios ámbitos de la ciencia e industria, por lo cual es un tema que permite tener un panorama amplio de las aplicaciones de la óptica experimental en química o ingeniería.

5. Procedimiento y mediciones

En esta sección se detallan los procedimientos seguidos para la obtención y preparación de sustancias con propiedades de rotación óptica y su caracterización. Dado el propósito de este trabajo, se presentan distintas variaciones de procedimiento y análisis para calcular el poder rotatorio de sustancias, de forma que puedan ser comparadas fácilmente con la literatura.

5.1. Jarabe de maíz

El jarabe de maíz comercial es la sustancia con actividad óptica más accesible. En este caso, se utilizó jarabe de maíz para niños de la marca Karo, común en México; sin embargo, existen muchas otras marcas que producen este jarabe con las mismas características. Para esta sustancia, se escogió dejar fija la concentración de jarabe y solamente variar la longitud de camino óptico de la muestra, para esto se utilizaron varios recipientes rectangulares de cristal de distintas longitudes (0.71 cm, 1.69 cm, 3.75 cm, 5.70 cm y 7.60 cm, con incertidumbre de 0.005 cm). Los recipientes se llenaron con jarabe de maíz evitando generar burbujas que produjeran dispersión.

El arreglo experimental emulo el funcionamiento de un polarímetro, consistiendo de un láser ($\lambda = (650 \pm 10) \text{ nm}$), dos polarizadores lineales (par polarizador-analizador) y un medidor de intensidad lumínica (ThorLabs PM-100D con cabeza detectora S120VC; $\pm 3\%$ de incertidumbre en las mediciones), dispuestos como se muestra en la Fig. 7. Las muestras se colocaron, de forma individual, entre el polarizador y el analizador, sobre una mesa elevadora que permitió ajustar la altura de la muestra de forma que el haz láser pasase por ella.

Posteriormente, se escogió una posición fija del eje de transmisión del polarizador (en nuestro caso $(90 \pm 1.8)^\circ$), y

TABLA II. Algunas aplicaciones académicas e industriales de la actividad óptica. [3–6].

Institución o industria	Proceso
Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.	Aplicación de la polarimetría a la determinación de la pureza de un azúcar.
CEADEN, La Habana, Cuba; Universidad de La Habana, Cuba; CIO, Leon, México.	Aplicación de la polarimetría láser en el proceso de control de la producción de la industria tequilera.
Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México	Medición de la actividad óptica de la sacarosa para la construcción de un glucómetro.
Otras aplicaciones en investigación (Rudolph Research Analytical)	Aislamiento e identificación de incógnitas cristalizadas a partir (HPLC). Caracterización de compuestos ópticamente activos. Investigación de reacciones cinéticas midiendo la rotación óptica en función del tiempo. Monitoreo de cambios en la escisión enzimática. Análisis de la estructura molecular con trazado de curvas de dispersión rotatoria óptica. Distinción entre isómeros ópticos.
Industria Farmacéutica (Rudolph Research Analytical)	Determinación de la pureza de productos: aminoácidos, antibióticos, dextrosa, esteroides, aminoazúcares, cocaína, diuréticos, tranquilizantes, analgésicos, codeína, sueros, vitaminas
Industria alimenticia (Rudolph Research Analytical)	Para verificar la calidad de los productos al medir la concentración y la pureza de compuestos en alimentos, como: carbohidratos, lactosa, rafinosa, varios almidones, fructosa, levulosa, sacarosa, monosacáridos naturales, glucosa, maltosa, xilosa.
Industria química (Rudolph Research Analytical)	Análisis para identificar: bpolímeros, polímeros naturales, polímeros sintéticos.

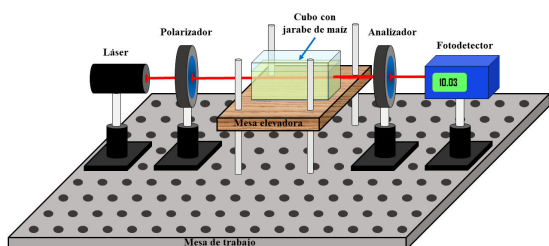


FIGURE 7. Esquema del montaje experimental para medir la actividad óptica del jarabe de maíz.

se realizó un análisis de la intensidad de salida del analizador como función de la posición angular de su eje de transmisión (en este caso se realizaron variaciones de $(5 \pm 1.8)^\circ$ desde 90° hasta 270°); es importante registrar la dirección de rotación del analizador. Una vez realizado esto, se vaciaron los contenedores, se limpiaron y se realizó el mismo procedimiento pero con los contenedores vacíos (sin jarabe de maíz) con el propósito de poder tomar en cuenta posibles efectos de rotación debidos al material de los contenedores. Lo anterior se repitió para cada muestra. Las mediciones recabadas se pueden ver en la Fig. 8, donde se grafican los datos de intensidad normalizados, y se observa que la curva de pola-

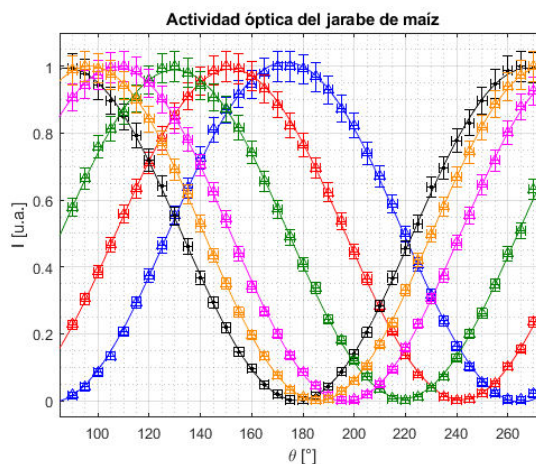


FIGURE 8. Desplazamiento de curvas de polarización al pasar por diferentes longitudes de muestra de jarabe de maíz. La intensidad se normalizó respecto la intensidad máxima obtenida en cada curva. Curva negra: recipiente vacío; naranja: 0.71 cm; morado: 1.69 cm; verde: 3.75 cm; rojo: 5.7 cm; azul: 7.6 cm. Dado que las curvas de vacío de cada recipiente fueron iguales dentro de la incertidumbre, solo se muestra una de dichas curvas.

rización se desplaza a ángulos mayores conforme la longitud de camino de la muestra de jarabe de maíz aumenta.

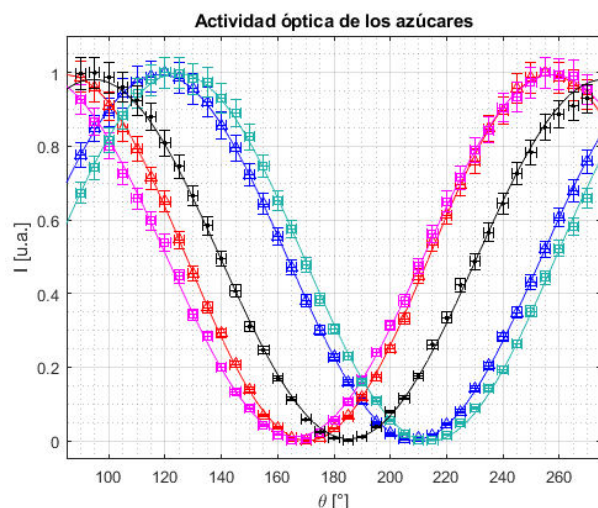


FIGURE 9. Desplazamiento de máximos y mínimos de intensidad normalizada a causa de la actividad óptica de la fructosa y sacarosa. Recipiente de 5.5 cm; curva negra: recipiente vacío; rojo: 2.2 mol/L; morado: 3.1 mol/L; azul: 4.2 mol/L; verde: 6 mol/L.

5.2. Azúcares

La sacarosa y fructosa, también se pueden encontrar en cualquier supermercado. En este trabajo se utilizó, para sacarosa, azúcar marca Savien, mientras que para la fructosa se utilizó Frusweet Fructosa de la misma marca. Sin embargo, existen varios productos de endulzantes con estos azúcares.

El montaje experimental fue el mismo que para el jarabe de maíz, con la diferencia de que las distintas muestras de sacarosa o fructosa se prepararon mediante la disolución de distintas concentraciones en agua, y colocándolas siempre en un mismo recipiente ((5.500 ± 0.01) cm). La preparación de las muestras se llevo a cabo de la siguiente manera: una muestra de (15.0 ± 0.7) g de sacarosa con (20.0 ± 0.4) ml de agua (concentración de $2.2 \pm (1 \times 10^{-4})$ mol/L); una de (21.0 ± 0.7) g de sacarosa con (19.5 ± 0.4) ml de agua (concentración de $3.1 \pm (1 \times 10^{-4})$ mol/L); una de (15.0 ± 0.7) g de fructosa con (20.0 ± 0.4) ml de agua (concentración de $4.2 \pm (2 \times 10^{-4})$ mol/L), y una de (21.0 ± 0.7) g de fructosa con (19.5 ± 0.4) ml de agua (concentración de $6 \pm (2 \times 10^{-4})$ mol/L).

El procedimiento de medición con cada muestra fue el mismo que para el jarabe de maíz, la Fig. 9 muestra los datos adquiridos. Como puede verse, las curvas se recorren a ángulos positivos para la fructosa y a ángulos negativos para la sacarosa, en comparación con lo observado para el recipiente vacío.

5.3. Destilación de limoneno

Una tercer sustancia relativamente sencilla de obtener es el aceite de limoneno (D-Limoneno), el cual se encuentra en la cascará de naranja o (L-Limoneno) en agujas de pino. Su proceso de obtención requiere de materiales típicos de un laboratorio de enseñanza de química, ya que el aceite debe ser

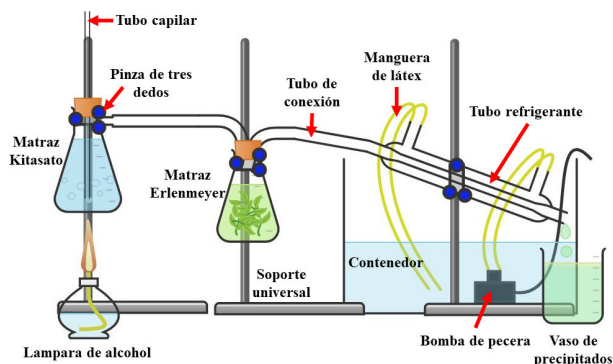


FIGURE 10. Diagrama del montaje experimental para la destilación por arrastre de vapor del limoneno.

separado de otros componentes por medio de un sistema de destilación por arrastre de vapor (Fig. 10). Dicho sistema se realizó con un matraz Kitasato en un soporte universal a una altura de 20 cm, al cual se le vertió agua pura, llevándola a ebullición con ayuda de una lámpara de alcohol; el matraz contó con un tapón horadado y un tubo de cristal el cual funcionó como válvula de liberación de presión de seguridad. A su derecha, en otro soporte universal se colocó un matraz Erlenmeyer a una altura de 10 cm, en el cual se colocaron los trozos de la cáscara de naranja (o agujas pino) hasta un nivel de 3/4, dejando un espacio donde los vapores de la muestra circularán antes de salir del matraz, este matraz incluía un tapón horadado de dos entradas con tubos de plástico para conexión. La conexión del matraz Kitasato al Erlenmeyer se hizo con tubo del mismo material. A la derecha del matraz Erlenmeyer se colocó y conectó un tubo de refrigeración por agua, el cual contaba con un sistema de circulación de agua de pecera, éste tubo se colocó a un ángulo de aproximadamente 30° , y cuya salida llegaba a un vaso de precipitados de 50 ml, donde se recolectó el producto de la destilación.

5.4. Actividad óptica del limoneno

Dado que el aceite de limoneno extraído tiene una concentración fija, el proceso experimental para analizar su actividad óptica se realizó de la misma manera y con la misma configuración que el caso del jarabe de maíz. Sin embargo, en esta ocasión se utilizaron recipientes de vidrio con longitudes de 2.0 cm, 4.0 cm y 4.5 cm, todos con incertidumbres de 0.005 cm. Los datos experimentales recopilados se muestran en la Fig. 11.

TABLA III. Parámetros de ajuste para la curva correspondiente a la muestra de 7.6 cm de longitud.

l [cm]	Parámetro	Promedio	Δ
7.600	a_0	0.504	0.008
± 0.005	a_1	0.480	0.013
muestra	b_1	-0.168	0.043
	ω	0.034	0.0005

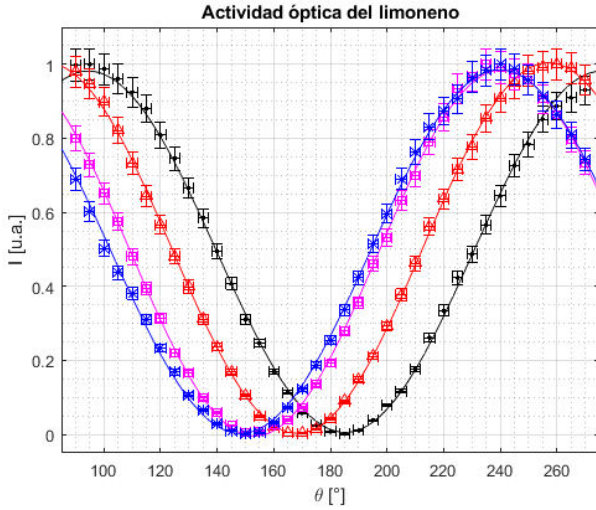


FIGURE 11. Desplazamiento de los máximos y mínimos de intensidad normalizada a causa de la actividad óptica de las muestras del limoneno. Curva negra: recipiente vacío; roja: 2.0 cm; morada: 4.0 cm; azul: 4.5 cm.

6. Análisis y resultados

A continuación se muestra la forma en que se analizaron los datos experimentales para deducir los valores de rotación óptica de cada sustancia.

6.1. Actividad óptica del jarabe de maíz

De los datos mostrados en la Fig. 8, cada curva se ajustó mediante un modelo de la forma:

$$I = a_0 + a_1 \cos(\omega\theta) + b_1 \sin(\omega\theta), \quad (13)$$

obteniendo los parámetros a_0 , a_1 , b_1 y ω para cada una de las curvas. Por ejemplo, para la muestra de 7.6 cm de longitud se obtuvieron parámetros como los mostrados en la Tabla III. La posición angular de los puntos de inflexión se obtiene calculando su derivada e igualando a cero, encontrando que los máximos (M) o mínimo (m) se encuentran en

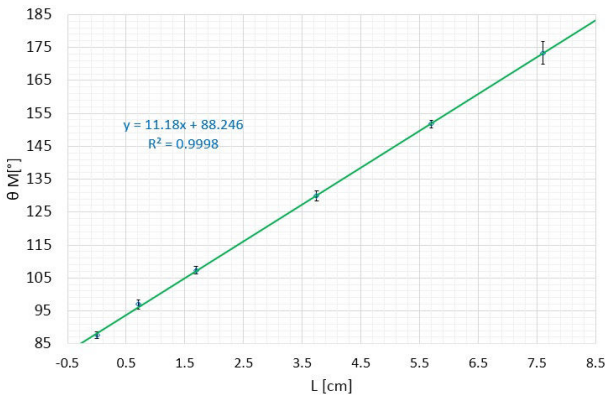


FIGURE 12. El ángulo de de polarización como función de la longitud.

TABLA IV. Máximos de Intensidad normalizada observados para el jarabe de maíz, correspondientes a las gráficas de la Fig. 8.

$(l \pm 0.005)$ [cm]	θ_M [°]	$\Delta\theta_M$ [°]
0.000	87.545	1.014
0.710	96.926	1.402
1.690	107.354	1.188
3.745	129.946	1.546
5.700	151.750	1.075
7.600	173.340	3.428

$$\theta_{m,M} = \frac{1}{\omega} \left[\arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) + n\pi \right] \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (14)$$

Como se puede ver la Fig. 11 tanto máximos como mínimos se desplazan la misma cantidad al cambiar las condiciones de la muestra, por lo que es indistinto realizar el análisis del cambio del ángulo de polarización usando máximos o mínimos, en nuestro caso optamos por usar máximos.

Los valores máximos encontrados para cada curva se muestran en la Tabla IV. Una gráfica de la posición de los máximos como función de la longitud de la muestra se puede ver en la Fig. 12.

Un ajuste lineal de estos datos proporcionó la relación entre la posición del máximo en función de la longitud de la muestra:

$$\theta_M = (11.180 \pm 0.081) \left[\frac{^\circ}{\text{cm}} \right] l + (88.246 \pm 0.345) [^\circ], \quad (15)$$

con m la pendiente de (15). Al comparar con (5), y teniendo en cuenta que durante las mediciones el analizador fue girado en sentido horario, tenemos que

$$(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}) = \frac{m\lambda}{180} \left(\frac{10^{-7} \text{ cm}}{\text{nm}} \right) \quad (16)$$

En este caso $\lambda = (650 \pm 10)$ nm, por lo que $(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}) = (4.037 \pm 0.361) \times 10^{-6}$, así $n_{\mathcal{L}} > n_{\mathcal{R}}$, es decir, el jarabe de maíz es una sustancia dextrógira.

El poder rotatorio por centímetro se obtiene mediante el análisis dimensional de (5) y (16)

$$\frac{\alpha}{l} = m \left(\frac{650 \text{ nm}}{589 \text{ nm}} \right) \quad (17)$$

por lo que se encuentra un valor de $\alpha/l = (12.337 \pm 0.210) ^\circ/\text{nm}$.

TABLA V. Máximos de I observados para la fructosa, en la gráfica de la Fig. 9.

$(C \pm 0.0002)$ [mol/L]	θ_M [°]	$\Delta\theta_M$ [°]
0.0	94.537	5.086
4.2	118.141	0.754
6.0	124.524	1.675

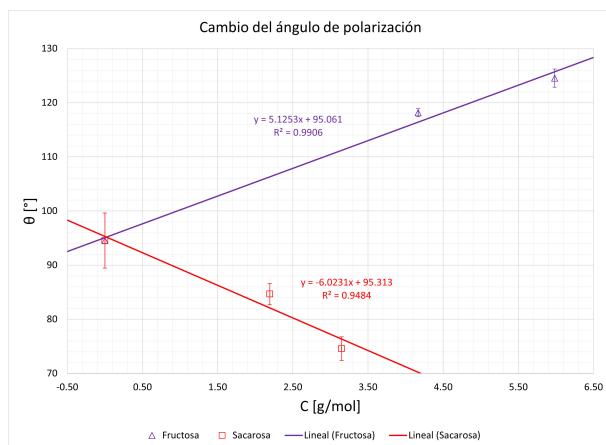


FIGURE 13. El ángulo de máxima intensidad cabía de acuerdo con la concentración de fructosa o sacarosa.

TABLA VI. Máximos de I observados para la sacarosa, en la gráfica de la Fig. 9.

$(C \pm 0.0001)$ [mol/L]	θ_M [°]	$\Delta\theta_M$ [°]
0.0	94.537	5.086
2.2	84.659	1.978
3.1	74.567	2.178

6.2. Actividad óptica de azúcares

De forma similar al análisis anterior, pero ahora tomando en cuenta la concentración, se trabajaron los datos de la Fig. 9 para los azúcares (fructosa y sacarosa). Los máximos de cada curva se encuentran en las Tablas V y VI, y dichos datos se muestran en la gráfica de la Fig. 13.

La gráfica de la Fig. 13, muestra la relación lineal que hay entre el cambio del máximo de intensidad respecto de la concentración de fructosa o sacarosa.

Las estimaciones lineales de estos datos como función de la concentración C arrojan las siguientes pendientes (m): Para la Fructosa (5.125 ± 0.499) [°L/mol]; Para la Sacarosa: (-6.023 ± 1.405) [°L/mol]. Teniendo en cuenta que durante la medición de la intensidad en función del ángulo del analizador, éste fue girado en sentido antihorario,

$$(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}) = -\frac{am\lambda}{180l} \left(\frac{10^{-7} \text{ cm}}{\text{nm}} \right), \quad (18)$$

donde a es la concentración en Moles/Litro de una muestra pura de cada compuesto utilizado. En nuestro caso, tomando en cuenta la composición de la sacarosa y la fructosa, se encontraron los valores de $a_{\text{sacarosa}} = 4.6$ mol/L y $a_{\text{fructosa}} = 8.8$ mol/L. Así, $(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})$ se puede interpretar como el valor para la sustancia en su estado puro y no diluida.

Al sustituir los valores numéricos correspondientes a cada sustancia se llegó a $(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})_{\text{fructosa}} = (-3.0 \pm 0.3) \times 10^{-6}$ y $(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})_{\text{sacarosa}} = (1.8 \pm 0.4) \times 10^{-6}$, de donde se

tiene que la fructosa es una sustancia levógira y la sacarosa dextrógira. En cuanto al ángulo de rotación específica:

$$\alpha_D = -ma \left(\frac{10 \text{ cm}}{5.5 \text{ cm}} \right) \left(\frac{650 \text{ nm}}{589 \text{ nm}} \right). \quad (19)$$

Con lo que se obtuvo que $\alpha_{D,\text{fructosa}} = (-90.7 \pm 8.9)^\circ$ y $\alpha_{D,\text{sacarosa}} = (56.1 \pm 13.1)^\circ$.

6.3. Actividad óptica del limoneno

Observando nuevamente las posiciones de los máximos como función de la longitud de las muestras, se obtubieron los datos de la Tabla VII, y su correspondiente gráfica en la Fig. 14.

Del ajuste lineal correspondiente se obtiene la pendiente (-7.937 ± 0.734) [°/cm]. Teniendo en cuenta que el ángulo del analizador fue girado en sentido antihorario, tenemos que

$$(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}) = \frac{-m\lambda}{180} \left(\frac{10^{-7} \text{ cm}}{\text{nm}} \right), \quad (20)$$

con lo que se obtiene que $(n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}}) = (2.866 \pm 0.269) \times 10^{-6}$, por lo que el limoneno producto de la naranja es una sustancia dextrógira. La rotación específica del limoneno obtenida es

$$\alpha_D = -m \left(\frac{10 \text{ cm}}{\text{dm}} \right) \left(\frac{650 \text{ nm}}{589 \text{ nm}} \right), \quad (21)$$

TABLA VII. Máximos de I observados, para el limoneno, en la gráfica de la Fig. 11.

l [cm]	Δl [cm]	θ_m [°]	$\Delta\theta_m$ [°]
0.000	0.005	94.537	5.086
2.000	0.005	79.539	1.744
4.000	0.007	65.931	1.181
4.500	0.009	56.807	1.681

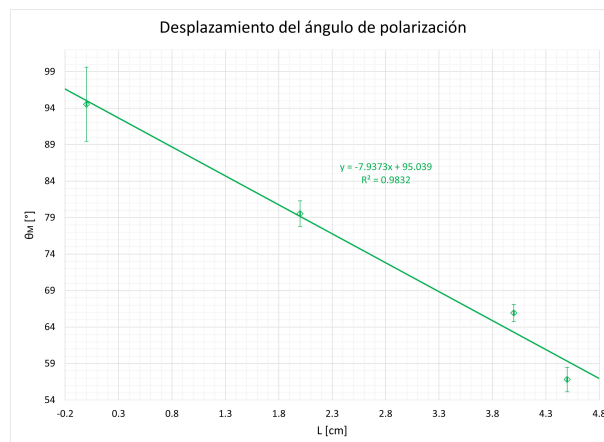


FIGURE 14. Cambio del ángulo de máxima intensidad correspondiente al cambio de longitud de muestra de limoneno.

por lo que al sustituir los valores numéricos se llega a un valor de $\alpha_D = (87.593 \pm 8.218)^\circ$.

Para calcular la concentración C de limoneno presente en la muestra analizada, se recurrió al modelo planteado de (7) y (10), por lo que se determinó el valor de la constante $a_{\text{limoneno}} = 6.2$ mol/L para una muestra de limoneno puro, utilizando los datos de peso molecular $PM_{\text{limoneno}} = 136.23$ g/mol y la densidad relativa respecto del agua $\rho_{\text{relativa}} = 0.84$. Así, al plantear el modelo para el ángulo experimental y el teórico tenemos:

$$\alpha_{D,\text{exp}} = \frac{\pi l (n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})}{\lambda a} C, \quad (22)$$

$$\alpha_{D,\text{teo}} = \frac{\pi l (n_{\mathcal{L}} - n_{\mathcal{R}})}{\lambda a} a, \quad (23)$$

y realizando el cociente entre estos valores se tiene que la concentración esta dada por

$$C = \frac{\alpha_{D,\text{exp}}}{\alpha_{D,\text{teo}}} a, \quad (24)$$

como el valor aceptado en la literatura para α_D del D-limoneno es de $+123.8^\circ$, se llega a $C = (4.4 \pm 0.4)$ mol/L para la muestra obtenida por destilación.

7. Conclusiones

Del trabajo realizado con las diferentes muestras se encontró que: el jarabe de maíz es una sustancia dextrógira con poder rotatorio de $\alpha/l = (12.337 \pm 0.210)^\circ/\text{cm}$ el cual tiene un error de 2.8 % respecto del valor reportado en la literatura [2], que es de $+12^\circ/\text{cm}$; la sacarosa también es una sustancia dextrógira con una rotación específica de $\alpha_D = (56.1 \pm 13.1)^\circ$ el cual tiene un error de 15.6 % respecto del valor dado en la literatura [1], que es de $+66.47^\circ$, esta diferencia se atribuye

a que la marca comercial utilizada es una azúcar de stevia, por lo cual el polisacárido difiere en su composición con la sacarosa al ser sometido a procesos de refinamiento particulares; para la fructosa se encontró que es una sustancia levógira con rotación específica de $\alpha_D = (-90.7 \pm 8.9)^\circ$, la cual tiene un error de 0.02 % respecto del valor reportado en la literatura [3], que es de -90.72° ; para el limoneno se encontró que es una sustancia dextrógira con rotación específica de $\alpha_D = (87.593 \pm 8.218)^\circ$, el cual tiene un error de 29.2 % respecto del valor encontrado en la literatura [15], que es de $+123.8^\circ$, esta diferencia se atribuye al proceso de obtención del limoneno que se empleó, ya que al utilizar una destilación por arrastre de vapor, la pureza del aceite esencial de la naranja no es 100 % limoneno, ya que está combinado con otras moléculas (principalmente agua), en este caso la concentración obtenida fue de (4.4 ± 0.4) mol/L, siendo el valor de la concentración pura 6.2 mol/L. Una destilación más cuidadosa puede mejorar el valor.

Estos resultados muestran que, con los materiales propios de un laboratorio de enseñanza de química u óptica, es posible cuantificar el poder rotatorio de sustancias comunes, con una calidad suficiente para dichos laboratorios de enseñanza. De igual forma, este procedimiento y análisis también permite conocer, respecto de referencias, si la sustancia bajo estudio es pura o una mezcla, permitiendo una caracterización general. Finalmente, se puede afirmar que las técnicas de producción y medición empleadas son adecuadas para ser realizadas por estudiantes de nivel licenciatura (o bachillerato) sin necesidad de contar con conocimientos técnicos especializados, propiciando que enfoquen su atención mayormente en los conceptos físicos y posibles aplicaciones.

Agradecemos al Laboratorio de Óptica Avanzada de la Facultad de Ciencias UNAM por facilitarnos el espacio de trabajo necesario para el desarrollo de este trabajo.

1. J. McMurry, *Química Orgánica*, 5ª ed., (Ediciones Paraninfo, México, 2000), págs. 312-315, 1057.
2. E. Hecht, *Óptica*, 5ª ed., (Pearson Educación, Madrid, 2017), págs. 367-372.
3. E. M. García M., *Aplicación de la polarimetría a la determinación de la pureza de un azúcar*, Universidad Politécnica de Valencia, (2017), <https://hdl.handle.net/10251/83332>
4. V. Fajer *et al.*, *Aplicación de la polarimetría láser en el proceso de control de la producción de la industria tequilera*, Rev. Cub. Fis., **18** (2001) 107, ISSN: 0253-9268. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-cubana-de-fisica/articulo/aplicacion-de-la-polarimetria-laser-en-el-proceso-de-control-de-la-produccion-de-la-industria-tequilera>.
5. L. Cortez-González *et al.*, *Medición de la actividad óptica de la sacarosa para la construcción de un glucómetro*, Act. Univ., **26** (2016) 17, <https://doi.org/10.15174/au.2016.856>.
6. Rudolph Research Analytical, *Polarimetry Definitions*, (2022), recuperado el 21/08/2022 de: <https://rudolphresearch.com/products/polarimeters/polarimetry-definitions/>
7. L. G. Barron, *Molecular Light Scattering and Optical Activity*, 2ª ed., (Cambridge, Cambridge, 2004), págs. 1-52.
8. J. Morcillo O., *Isomería: Concepto de Isomería. Principales tipos de isomería: Estructural y espacial o estereoisomería*, 1ª ed, (UNED, 2008), págs. 1-4, recuperado el 24/08/21 de: <http://ocw.innova.uned.es/quimicas/pdf/qo/qo05.pdf>.
9. E. Juaristi, *Izquierda y derecha en química: la quiralidad*, Ciencia - Acad. Mex. Cs., **56** (2005) 43, ISSN: 1405-6550 <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/>

- articulo/izquierda-y-derecha-en-quimica-la-quiralidad.
10. A. G. Corzo, *Estereoquímica básica*, 1^a ed., (Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, 2009), págs. 26-35. % ISBN 978-987-1676-42-2 <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-32-Estereoquimica-basica-CORZO.pdf>.
 11. D. L. Nelson y M. M. Cox, *Principios de bioquímica*, 4^a ed., (Omega, Barcelona, 2005), págs. 238-246.
 12. Universidad Autonoma de Madrid, *Hidratos de carbono*, U.A. Mad., (2019), recuperado de formacion.uam.es, el 07/09/2021 de: <https://formacion.uam.es/mod/resource/view.php?id=75777&forceview=1>
 13. D. Opdyke, *Monographs on Fragrance Raw Materials*, (Research Institute for Fragrance Materials, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1979), págs. 809, 825.
 14. Sigma-Aldrich, *Ficha de datos de seguridad: R-(+)-Limonene*, Sigma-Aldrich, Merck KGaA, (2021), recuperado el 13/09/2021 de: https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/sigma/183164?cm_sp=Insite--caContent_prodMerch_gruModel--prodMerch10-1
 15. D.R Lide, G.W.A. Milne. *Handbook of Data on Organic Compounds*. Volume I., 3^a ed, (CRC Press, Inc. Boca Raton ,FL., 1994), págs. V3: 2307.
 16. Sigma-Aldrich, *Ficha de datos de seguridad: S-(-)-Limonene*, Sigma-Aldrich, Merck KGaA, (2021), recuperado el 13/09/2021 de: <https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/aldrich/218367?context=product>
 17. D.R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 73^a ed., (CRC Press Inc., Boca Raton, FL., 1992-1993), págs. 3-308.