



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SÍNTESIS DE NUEVOS DISOLVENTES EUTÉCTICOS
HIDROFÓBICOS PARA LA EXTRACCIÓN DE METALES**

TESIS

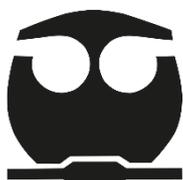
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

TELLEZ RAMIREZ CECILIA GUADALUPE

TUTOR

DR. CAMIEL HERMAN CORNELIS JANSSEN



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: I.Q. CARLOS ÁLVAREZ MACIEL
VOCAL: M. en I. ALMA DELIA ROJAS RODRÍGUEZ
SECRETARIO: Dr. CAMIEL HERMAN CORNELIS JANSSEN
1er. SUPLENTE: I.Q. AMPARO MAYA ROMERO
2do. SUPLENTE: I.Q. DAVID FRAGOSO OSORIO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, LABORATORIO 213.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. CAMIEL HERMAN CORNELIS JANSSEN

SUSTENTANTE:

CECILIA GUADALUPE TELLEZ RAMIREZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por otorgarme los medios necesarios para obtener una buena formación académica.

A mi asesor, el Dr. Camiel H.C. Janssen, por su apoyo y enseñanzas brindadas durante la elaboración de este proyecto de investigación.

A los miembros del H. Jurado conformado por el I.Q. Carlos Álvarez Maciel, la M. en I. Alma Delia Rojas Rodríguez, el Dr. Camiel Herman Cornelis Janssen, la I.Q. Amparo Maya Romero y el I.Q. David Frago Osorio por sus comentarios y observaciones en la revisión de este trabajo de tesis.

Al M. en C. Javier Tadeo León del Laboratorio de Espectroscopia Atómica LANGEM del Instituto de Geología de la UNAM, por los análisis de las muestras experimentales mediante ICP-OES.

Al programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (PAIP 5000-9175) de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo económico para la realización de este trabajo de tesis.

Al programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT IA103619, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT IA105721, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico por el apoyo financiero para la realización de este proyecto de tesis.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ABREVIATURAS Y UNIDADES	VIII
RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Minería	2
1.2. Disolventes	4
1.3. Líquidos iónicos	5
1.4. Disolventes eutécticos.....	5
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos particulares	7
2.3. Hipótesis	7
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	8
3.1. Industria minera	8
3.1.1. Tipos de minería.....	16
3.1.2. Técnicas para la extracción de minerales.....	21
3.2. Importancia de la minería	23
3.3. La minería en México	25
3.3.1. Economía de la minería mexicana	26
3.4. Necesidad de nuevos disolventes en las industrias	28
3.4.1. Tipos de disolventes orgánicos	28
3.4.2. Uso de disolventes orgánicos en los sectores industriales.....	29
3.4.3. Química Verde.....	32
3.5. Disolventes verdes	35
3.5.1. Historia de los líquidos iónicos.....	36
3.5.2. Historia de los disolventes eutécticos.....	37
CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO.....	39
4.1. Extracciones líquido-líquido.....	39
4.2. Líquidos iónicos	41

4.2.1.	IONES.....	41
4.2.2.	Síntesis de líquidos iónicos.....	43
4.2.3.	Tipos de líquidos iónicos.....	44
4.2.4.	Propiedades físicas y químicas de los LI.....	46
4.2.5.	Ventajas y desventajas de los LI.....	48
4.2.6.	Aplicaciones de los LI.....	50
4.3.	Disolventes eutécticos.....	50
4.3.1.	Punto eutéctico.....	51
4.3.2.	Formación de los disolventes eutécticos.....	52
4.3.3.	Propiedades de los disolventes eutécticos.....	57
4.3.4.	Tipos de disolventes eutécticos.....	58
4.3.5.	Ventajas y desventajas de los DES.....	59
4.3.6.	Aplicaciones de los DES.....	60
4.4.	Diferencias y similitudes entre un DES y un LI.....	62
4.5.	Materiales utilizados en este trabajo.....	63
4.5.1.	Ácido salicílico.....	63
4.5.2.	Ácido octanoico.....	64
4.5.3.	Ácido decanoico.....	65
4.5.4.	Ácido dodecanoico.....	65
4.5.5.	(-)-Mentol.....	66
4.5.6.	Trietilamina.....	67
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....		68
5.1.	Procedimiento experimental.....	68
5.2.	Reactivos.....	72
5.3.	Técnicas de análisis.....	75
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		76
6.1.	Síntesis de disolventes eutécticos.....	76
6.2.	Extracciones líquido-líquido de metales.....	79
6.3.	Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES.....	80
6.3.1.	Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES sin extractante.....	80
6.3.2.	Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES con extractante.....	81
6.4.	Eficiencias de las extracciones de metales.....	82
6.4.1.	Eficiencias de extracción de los DES sin extractante.....	82
6.4.2.	Eficiencias de extracción de los DES con extractante.....	85

6.5. Discusión de resultados de las síntesis de los DES.....	86
6.5.1. Análisis de las eficiencias de las extracciones de metales	87
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	91
REFERENCIAS CONSULTADAS.....	93
ANEXO I.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos nativos.....	9
Figura 2 Sulfuros.....	10
Figura 3 Haluros.....	10
Figura 4 Óxidos.....	11
Figura 5 Sulfatos.....	12
Figura 6 Silicatos.....	13
Figura 7 Carbonatos.....	14
Figura 8 Carbonatos - Malaquita.....	15
Figura 9 Minería superficial.....	17
Figura 10 Tipos de minería superficial.....	17
Figura 11 Minería subterránea.....	18
Figura 12 Tipos de minería subterránea.....	19
Figura 13 Minería submarina.....	20
Figura 14 Procesos de extracción por hidrometalurgia.....	22
Figura 15 Procesos de extracción por pirometalurgia.....	23
Figura 16 Provincias metalogénicas de México.....	25
Figura 17 Tipos de disolventes orgánicos.....	28
Figura 18 Los doce principios de la química verde.....	33
Figura 19 Extracción líquido-líquido.....	40
Figura 20 Cationes utilizados para la formación de líquidos iónicos.....	42
Figura 21 Aniones utilizados para la formación de líquidos iónicos.....	43
Figura 22 Ejemplos de líquidos iónicos apróticos.....	45
Figura 23 Ejemplos de líquidos iónicos próticos.....	45
Figura 24 Diagrama de fases para una mezcla eutéctica binaria.....	52
Figura 25 Estructura general para una mezcla eutéctica. ¹⁹	54
Figura 26 Aceptores de enlaces hidrogeno para síntesis de DES.....	55
Figura 27 Donadores de enlaces hidrogeno para síntesis de DES.....	56
Figura 28 Diagrama general de la metodología experimental.....	69
Figura 29 Reactivos utilizados como donadores de enlaces hidrógeno (HBD) para sintetizar disolventes eutécticos.....	73

Figura 30 Reactivo utilizado como aceptor de enlaces hidrógeno (HBA) para sintetizar disolventes eutécticos.	73
Figura 31 Reactivo utilizado como extractante.	74
Figura 32 Mezclas de mentol con ácido decanoico en diferentes relaciones molares.	77
Figura 33 Mezclas de mentol con ácido dodecanoico en diferentes relaciones molares.	77
Figura 34 Mezclas de ácido decanoico con ácido dodecanoico en diferentes relaciones molares.	78
Figura 35 Mezclas de ácido dodecanoico con ácido octanoico en diferentes relaciones molares.	78
Figura 36 Mezcla de mentol con ácido salicílico.	78
Figura 37 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc sin la presencia de un extractante.	84
Figura 38 Eficiencias de extracción del cloruro de estroncio sin la presencia de un extractante.	84
Figura 39 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aplicaciones industriales de los disolventes orgánicos.....	30
Tabla 2 Ventajas y desventajas de los líquidos iónicos.	48
Tabla 3 Ventajas y desventajas de los disolventes eutécticos.....	59
Tabla 4 Disoluciones metálicas.	71
Tabla 5 Relaciones molares para las síntesis de disolventes eutécticos.	74
Tabla 6 Datos y resultados de las síntesis de disolventes eutécticos.	76
Tabla 7 Extracciones líquido-líquido de metales.	79
Tabla 8 Resultados del análisis ICP-OES de las concentraciones de los metales en los DES sin la presencia de un extractante.	81
Tabla 9 Resultados del análisis ICP-OES de las concentraciones de los metales en los DES con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).	82
Tabla 10 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre sin la presencia de un extractante.	82
Tabla 11 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc sin la presencia de un extractante.	83
Tabla 12 Eficiencias de extracción del cloruro de estroncio sin la presencia de un extractante.	83
Tabla 13 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).	85
Tabla 14 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).	85
Tabla 15 Eficiencias de extracción de las mismas mezclas eutécticas con y sin trioctilamina como extractante.	89

ABREVIATURAS Y UNIDADES

AIL	Líquidos iónicos apróticos
°C	Grados centígrados
cP	Centipoise
COV	Compuestos orgánicos volátiles
DES	Disolventes eutécticos
HBA	Aceptores de enlaces hidrógeno
HBD	Donadores de enlaces hidrógeno
ICP-OES	Espectroscopia de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo
LI	Líquido iónico
mL	Mililitro
mM	Milimolar
NADES	Disolvente eutéctico natural profundo
PIL	Líquidos iónicos próticos
THEDES	Sistema eutéctico profundo terapéutico
TSIL / TILs	Líquidos iónicos con tarea específica
C₇H₆O₃	Ácido salicílico o ácido 2-hidroxibenzoico
C₈H₁₆O₂	Ácido octanoico o ácido caprílico
C₁₀H₂₀O₂	Ácido decanoico o ácido cáprico
C₁₂H₂₄O₂	Ácido dodecanoico o ácido láurico
C₁₀H₂₀O	Mentol
C₂₄H₅₁N	Trioctilamina
SrCl₂	Cloruro de estroncio
ZnCl₂	Cloruro de zinc
Co(NO₃)₂	Nitrato de cobalto
Cu(NO₃)₂	Nitrato de cobre

RESUMEN

Los disolventes eutécticos, de bajo punto de fusión, tienen un gran potencial para desarrollar reacciones químicas y extracciones líquido-líquido, ya que son medios de reacción baratos. Los DES son considerados como familia de los líquidos iónicos, aunque estos generalmente no existen de iones. Los DES se pueden formar a partir de fuentes naturales, resultando en un disolvente económicamente más atractivo y con un menor impacto ambiental.

En este trabajo de tesis se investigó la posibilidad de utilizar estos nuevos tipos de disolventes eutécticos hidrofóbicos para extraer metales desde fases acuosas. Se realizó la síntesis de disolventes eutécticos, en diferentes relaciones molares, a partir de mentol y ácidos orgánicos como el ácido láurico, ácido cáprico, ácido caprílico y ácido salicílico.

Los metales que se eligieron para ser extraídos desde fases acuosas fueron cobre (Cu), cobalto (Co), zinc (Zn) y estroncio (Sr). Las sales metálicas que se ocuparon para preparar las disoluciones fueron de nitrato de cobre, nitrato de cobalto, cloruro de zinc y cloruro de estroncio.

Los disolventes eutécticos sintetizados se utilizaron de dos formas diferentes para extraer metales. En el primer caso los DES se trabajaron sin extractante y en el segundo caso a los DES se les adicionó un extractante. La trioctilamina fue el extractante que se utilizó en esta investigación.

Los resultados conseguidos indicaron que las extracciones de cobre, zinc y estroncio que se realizaron, sin el uso de un extractante, tuvieron eficiencias de extracción muy bajas, siendo inferiores al 10%.

En las extracciones de cobre y zinc, en las que se utilizó trioctilamina como extractante, se obtuvieron resultados favorables dado que la presencia del extractante aumentó las eficiencias hasta un 100%.

Con base en los resultados obtenidos de este trabajo de investigación, se muestra que los disolventes eutécticos elaborados a partir de fuentes naturales, en conjunto con un extractante, son muy útiles para extraer metales desde fases acuosas.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente muchos de los disolventes orgánicos utilizados para el desarrollo de procesos químicos, como reacciones químicas y extracciones líquido-líquido, tienen un gran impacto en el medio ambiente y también presentan altos costos de producción. Una opción viable para estudiar y llevar a cabo este tipo de procesos químicos es el uso de mezclas eutécticas como disolventes, ya que muchos de ellos resultan ser más amigables con el medio ambiente, además de que son disolventes económicos y fáciles de elaborar.

El uso de disolventes ecológicos podría beneficiar notablemente a industrias como la minería, ya que este tipo de industria suele emplear disolventes convencionales para extraer recursos minerales y limpiar metales, lo que ocasiona grandes daños ambientales.

Por tal razón, esta tesis se enfoca en la necesidad de diseñar y preparar nuevos disolventes eutécticos hidrofóbicos para ser utilizados en procesos industriales mineros, como por ejemplo en extracciones líquido-líquido de metales.

Este trabajo de tesis está formado por siete capítulos. En el *capítulo 2* se especifican los objetivos generales y particulares de la investigación, además de la hipótesis. En el *capítulo 3* se menciona todo lo referente a la minería y la necesidad de incorporar disolventes biodegradables en sus procesos. En el *capítulo 4* se explica el proceso de extracción líquido-líquido, se habla sobre todo lo relacionado con líquidos iónicos y disolventes eutécticos, y asimismo se describen los materiales utilizados para el desarrollo de esta tesis. En el *capítulo 5* se describe el procedimiento experimental que se siguió para el desarrollo de la presente investigación. En el *capítulo 6* se muestran los resultados y la discusión de estos. Finalmente, en el *capítulo 7* se exponen las conclusiones del presente trabajo.

1.1. Minería

La minería es una de las industrias más antiguas que el hombre ha desarrollado, esta actividad inició mucho antes que la agricultura y la ganadería.¹

La minería es el conjunto de actividades que se desarrollan para obtener recursos de una mina. La obtención de recursos se da a través de la extracción de los minerales.²

A lo largo de la historia de la minería los metales más utilizados por la humanidad y, por tanto, los más extraídos, han sido: cobre, oro, plata, hierro, estaño, plomo y mercurio. Esto debido a que son elementos muy abundantes en la naturaleza.¹

El oro y la plata se empezaron a utilizar desde la prehistoria. Eran considerados como metales de gran valor, se usaban para fabricar objetos religiosos y monedas de alto valor económico.¹

El cobre fue el primer metal con el que se trabajó, con él se realizaban aleaciones como el bronce y el latón.³ Otro material frecuentemente utilizado fue el bronce, el cual es una aleación de cobre con estaño; actualmente hay varios tipos de bronce que se obtienen a partir de cobre con estaño y agregando plomo o zinc. El latón es una mezcla de cobre con zinc.⁴

El mercurio antes conocido como “azogue” o “plata líquida”, es un compuesto químico que se encuentra en forma líquida a temperatura ambiente. Este elemento tuvo pocas aplicaciones dado que es un metal muy volátil y tóxico.⁵ El uso más importante que se le dio al mercurio fue para extraer oro y plata por el método de amalgamación.⁶

Otros metales que también se conocen desde hace mucho tiempo y que han sido manipulados por el hombre, pero en menor medida, son: platino, arsénico, antimonio, níquel, cobalto, manganeso, wolframio y cromo.⁶

En 1808 se descubrió uno de los metales más abundantes en la tierra, el aluminio. Este metal se extrae a partir de la roca bauxita (formada especialmente por hidróxido de aluminio). El aluminio es un metal que en los últimos años se ha ocupado mucho para elaborar latas y papel aluminio.³

Lo mencionado anteriormente demuestra que la minería ha jugado un papel muy importante en la vida del hombre desde tiempo atrás. Actualmente, gracias a la extracción de recursos como minerales, metales y rocas, se pueden fabricar bienes y servicios que son indispensables en la vida diaria. Productos como vidrio, cerámica, joyería, papel, cosméticos, artículos de higiene personal, detergentes, pinturas y plásticos son algunos ejemplos de lo que se puede obtener con el uso de recursos minerales.⁷

La minería depende básicamente de la extracción de recursos minerales. Para llevar a cabo la explotación de los minerales existen varios métodos como el minado superficial, subterráneo y submarino.^{1,6,8} También hay métodos especiales que utilizan técnicas de disolución y que requieren del uso de ciertas sustancias químicas.⁹

Los procesos de extracción de metales regularmente se llevan a cabo mediante extracción líquido-líquido.¹⁰ Para extraer los recursos minerales de las minas se necesita del uso de algún disolvente⁹ como tolueno, ácido sulfúrico^{9,11},

queroseno¹¹ y cianuro de sodio (disolvente muy utilizado para extraer metales como oro, plata, cobre, níquel, cobalto y molibdeno)¹².

En la minería también se utilizan otros disolventes como tetracloroetileno, cloruro de metileno, tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano y acetona. La principal aplicación de estos disolventes es para limpiar metales.¹³

La mayoría de las sustancias que se utilizan en la extracción de recursos minerales son compuestos dañinos que contaminan el medio ambiente y causan problemas en la salud. Gran parte de esos compuestos son tóxicos, ya que incluyen productos químicos como el acetileno, cianuro¹⁴, ácido nítrico, nitrato de amonio, además de que contienen metales pesados como el mercurio, uranio y plomo.⁹

1.2. Disolventes

Un disolvente es una sustancia que compite con las fuerzas intermoleculares que mantienen unidas a las moléculas de un sólido.¹⁵ Dicho de otra manera, un disolvente es cualquier sustancia, normalmente líquida, que se emplea para disolver a otras sustancias tal que se dé como resultado una mezcla homogénea.^{16,17}

El agua es uno de los disolventes más comunes, por lo que se le conoce como “disolvente universal”.¹⁶ Es una sustancia de bajo costo que no presenta toxicidad y que se encuentra en abundantes cantidades. No obstante, la mayor parte de agua que hay en el planeta se encuentra en los océanos y es agua salada (97.5%). El 2.5% restante del total es agua dulce, de la cual el 2.24% se localiza en casquetes polares, glaciares y aguas subterráneas profundas, y sólo el 0.26% está disponible en lagos, embalses y canales fluviales para el consumo humano.^{16,18,19}

El agua es un disolvente que tiene un alto grado de polaridad y una constante dieléctrica alta, por lo que puede disolver especies iónicas y moléculas polares.^{15,16} Sin embargo, sus limitaciones en cuanto a la solubilidad de compuestos orgánicos y la poca disponibilidad de agua dulce en el planeta, han causado que su uso sea limitado. Asimismo, el hecho de que existen procesos químicos que requieren de un ambiente hidrofóbico, a pesar de que varios procesos se efectúan con el uso de agua, origina que se usen otro tipo de disolventes.^{19,20}

Hoy en día, además del agua, existen diferentes tipos de disolventes como los orgánicos y los de la química verde.

Los disolventes orgánicos suelen tener un uso excesivo en el desarrollo de procesos químicos, lo que ha generado grandes daños ambientales, siendo una de las principales fuentes de contaminación. El uso excesivo de estos disolventes se debe principalmente a que son económicos y en ocasiones de fácil adquisición.

Los disolventes de la química verde son sustancias que fueron creadas con el propósito de reducir o remplazar en su mayoría el uso de disolventes orgánicos en procesos químicos. Los líquidos iónicos y los disolventes eutécticos son algunos tipos de disolventes verdes. El agua también se considera un disolvente verde, por su bajo impacto en el medio ambiente.¹⁶

1.3. Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos se estudiaron por primera vez en 1914.^{21,22} Años después se comenzaron a sintetizar varios tipos de líquidos iónicos y en 1980 se reconoció que eran medios óptimos para desarrollar reacciones químicas.²¹ Con el transcurso de los años estos compuestos se fueron desarrollando más, hasta que su estudio se incorporó en áreas científicas e industriales.²³

Al presente, los líquidos iónicos son compuestos de mucho interés para la química verde por las excelentes propiedades físicas y químicas que presentan.²² Entre las más significativas se pueden señalar la baja presión de vapor en condiciones normales, ausencia de inflamabilidad, baja o nula volatilidad, bajo punto de fusión, alta estabilidad química y térmica.^{21,22,24–26}

Sin embargo, hay estudios en donde se muestra que algunos líquidos iónicos pueden llegar a ser peligrosos²⁴, poco biodegradables²⁰ y tóxicos cuando se incorporan a un medio acuoso²⁷. Además, puede haber impurezas en los líquidos debido a que las técnicas de preparación no tienen la capacidad de crear compuestos totalmente puros.^{15,21,24} Todo esto ocasiona que los líquidos iónicos sean reemplazados por disolventes más sostenibles y biodegradables, como los disolventes eutécticos.²⁸

1.4. Disolventes eutécticos

El interés por los disolventes eutécticos comenzó en torno al año 2001. En ese periodo se creó una mezcla en la que se apreciaba la formación de un líquido a temperaturas inferiores a 100°C.²⁹ En 2003 se logró sintetizar el primer disolvente eutéctico, y poco tiempo después ya había una cantidad considerable

de mezclas eutécticas sintetizadas.^{26,28} Este hecho impulso el estudio para llevar a cabo la creación de mezclas eutécticas a partir de productos naturales.^{29,30}

Hoy en día, los disolventes eutécticos se definen como una mezcla eutéctica de bajo punto de fusión³¹ que tiene grandes ventajas ante los líquidos iónicos. Algunas de esas ventajas son los bajos costos de fabricación y la fácil preparación.^{20,23,28,30}

Sin embargo, estos disolventes poseen algunas propiedades muy similares a las de los líquidos iónicos, como una baja o nula presión de vapor, poca inflamabilidad, baja volatilidad, bajos puntos de fusión, niveles pequeños o nulos de toxicidad y solubilidad en agua.^{23,28,29,31}

Los disolventes eutécticos pueden ser hidrofílicos o hidrofóbicos. Los disolventes hidrófilos, en comparación con los disolventes hidrófobos, han sido muy examinados por lo que se tiene más información al respecto.

Los disolventes eutécticos hidrófobos se obtienen únicamente a partir de compuestos hidrofóbicos.^{28,32,33} Estos disolventes son muy eficaces en procesos de extracción, debido a la capacidad que tienen para extraer formas disociadas y no disociadas de compuestos ácidos, así como de extraer analitos apolares de soluciones acuosas.^{29,33}

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Analizar la potencia y posible aplicación de los disolventes eutécticos hidrofóbicos en la extracción de metales desde fases acuosas, mediante su diseño y síntesis, para disminuir el uso de disolventes convencionales.

2.2. Objetivos particulares

- Identificar componentes aceptadores y donadores de enlaces de hidrogeno que formen un disolvente eutéctico.
- Diseñar y sintetizar diferentes tipos de disolventes eutécticos hidrofóbicos con base en ácidos carboxílicos.
- Llevar a cabo extracciones líquido-líquido para extraer metales desde fases acuosas con el uso de los disolventes eutécticos hidrofóbicos sintetizados.
- Determinar las eficiencias de extracción de diferentes metales desde las fases acuosas extraídas a los disolventes eutécticos sintetizados.

2.3. Hipótesis

Se puede sintetizar un disolvente eutéctico hidrofóbico con base en un donador y aceptador de enlace de hidrogeno. Este disolvente eutéctico, combinado con un extractante, puede ser utilizado en extracciones líquido-líquido para remover metales desde fases acuosas.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1. Industria minera

La minería es una actividad productiva mediante la cual se obtienen recursos minerales, además de que es fuente de crecimiento, desarrollo y sustento en gran parte del mundo.³⁴

La industria minera se encarga del proceso de extracción, explotación y aprovechamiento de minerales, metales y rocas que se encuentran comúnmente en menas ubicadas en yacimientos que están en la superficie terrestre o en el subsuelo.^{2,35}

Las menas son materiales de los cuales se extraen principalmente minerales y metales con valor económico. Sin embargo, de las menas también se pueden extraer minerales de ganga que son aquellos que no tienen gran valor económico.

Los yacimientos que se localizan en minas superficiales son los más comunes en la industria minera, en ellos se trabaja al aire libre realizando excavaciones en la superficie del terreno para extraer los recursos minerales. Por el contrario, en los depósitos minerales que están ubicados en minas subterráneas se elaboran galerías o túneles por debajo de la superficie del terreno para extraer los minerales deseados.

Las rocas, al igual que los minerales, son recursos que suelen extraerse con frecuencia de las menas. Las rocas son materiales inorgánicos que carecen de composición química definida, se forman naturalmente mediante procesos geológicos y están compuestas por mezclas heterogéneas de materiales homogéneos, es decir, por uno o varios minerales en diferentes cantidades.^{1,36}

Los minerales comúnmente son materiales sólidos cristalinos, con estructura química definida, que se forman de manera natural en la corteza de la tierra mediante procesos inorgánicos.^{1,37} Están presentes en la naturaleza en diferentes formas, como por ejemplo, hay minerales sólidos como el oro y el níquel, quebradizos como la cal y el yeso, y líquidos como el mercurio.¹

Los tipos de minerales más comunes que hay en las menas son los elementos nativos metálicos y no metálicos (*figura 1*), sulfuros (*figura 2*), haluros (*figura 3*), óxidos e hidróxidos (*figura 4*), sulfatos (*figura 5*), silicatos (*figura 6*) y carbonatos (*figura 7 y 8*).^{1,38}

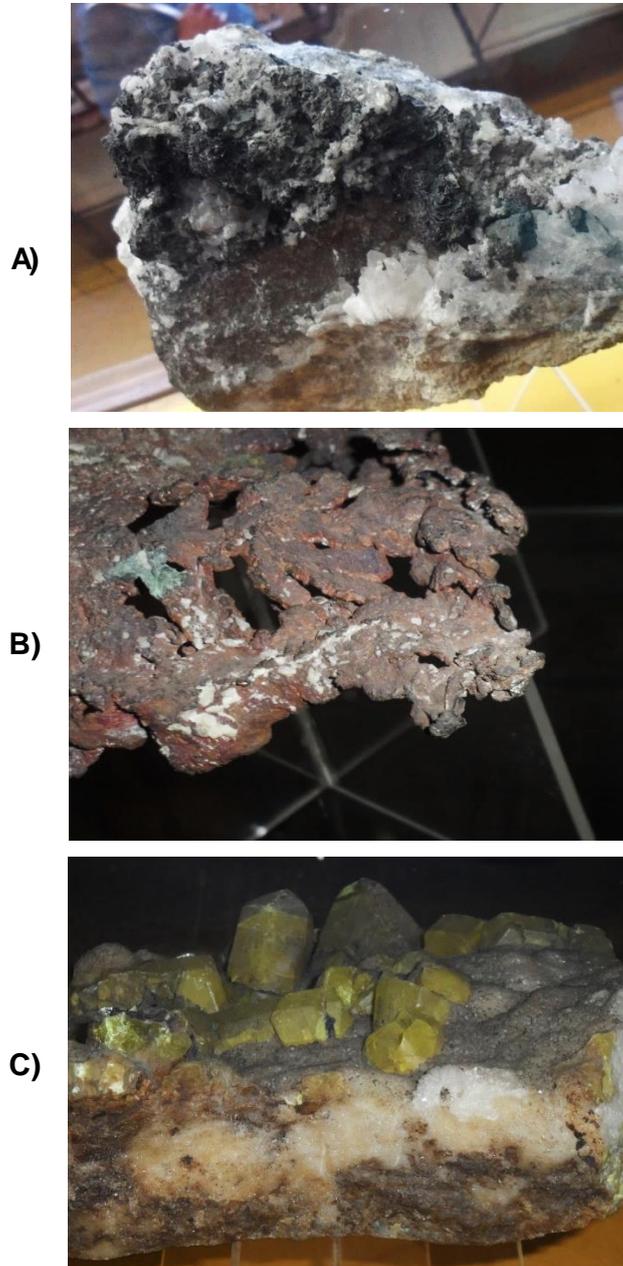


Figura 1 Elementos nativos.

A) Plata (Ag) extraída de Hidalgo, México. **B)** Cobre (Cu) extraído de Cananea, Sonora, México. **C)** Azufre (S) proveniente de Sicilia, Italia. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)



Figura 2 Sulfuros.

A) Pirita (FeS_2) extraída de Guanajuato, México (izquierda) y de Arapecua, Perú (derecha). **B)** Esfalerita o blenda, $(\text{Zn,Fe})\text{S}$, extraída de Taxco de Alarcón Guerrero, México. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

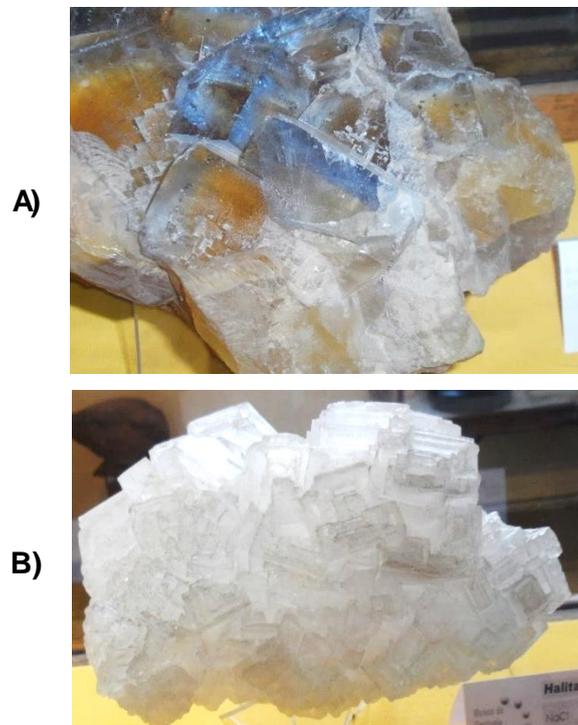


Figura 3 Haluros.

A) Fluorita o fluorina (CaF_2) de Illinois, E.U.A. **B)** Halita o sal común (NaCl) extraída de Oaxaca, México. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

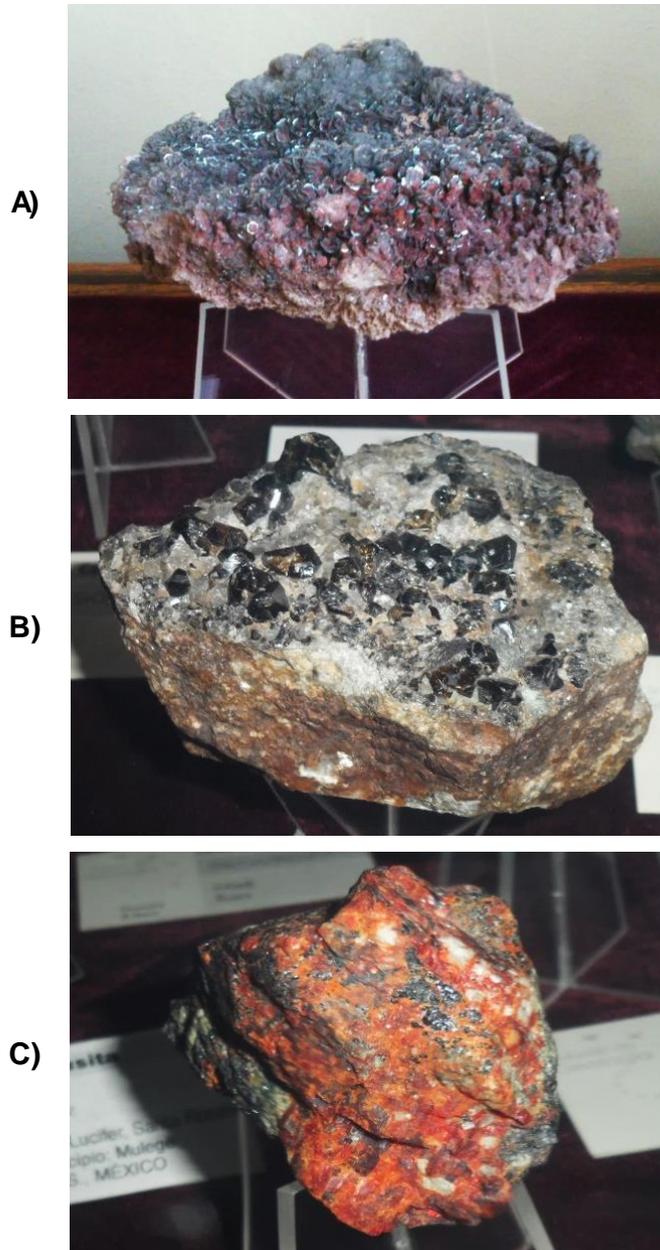


Figura 4 Óxidos.

A) Hematita o acerina ($\alpha - Fe_2O_3$). **B)** Casiterita cuarzo (SnO_2) extraída de Francia. **C)** Zincita, franklinita y willemita, $(Zn,Mn)O$. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

A)



B)



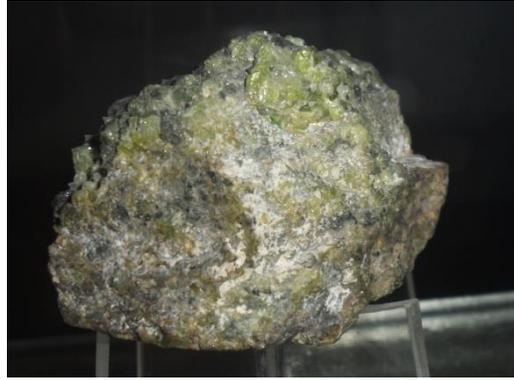
C)



Figura 5 Sulfatos.

A) Barita o baritina ($BaSO_4$) extraída de Minas Guerrero en Taxco de Alarcón Guerrero, México **B)** Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) proveniente de la Mina Naica en Saucillo Chihuahua, México. **C)** Calcantita, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

A)



B)



C)



D)



Figura 6 Silicatos.

A) Olivino, $(Mg,Fe)_2SiO_4$, extraído de Camargo Chihuahua, México. **B)** Ágata (variedad de cuarzo) proveniente de La Laguna Chihuahua, México. **C)** Cuarzo (SiO_2) pseudomorfo de danburita extraído de San Luis Potosí, México (izquierda) y cuarzo extraído de Real del Monte Pachuca Hidalgo, México (derecha). **D)** Dioptasa y wulfenita, $CuSiO_2(OH)_2$, procedente de Tsumeb, África. (Fotos tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

A)



B)



C)



D)



Figura 7 Carbonatos.

A) Magnesita (MgCO_3) procedente de Baja California Sur, México. **B)** Azurita o malaquita azul, $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, extraída de E.U.A. **C)** Azurita con malaquita extraída de Arizona, E.U.A. (izquierda) y Azurita proveniente de Durango, México (derecha). **D)** Calcita (CaCO_3) extraída de Lancashire, Inglaterra (izquierda) y de Chihuahua, México (derecha). (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

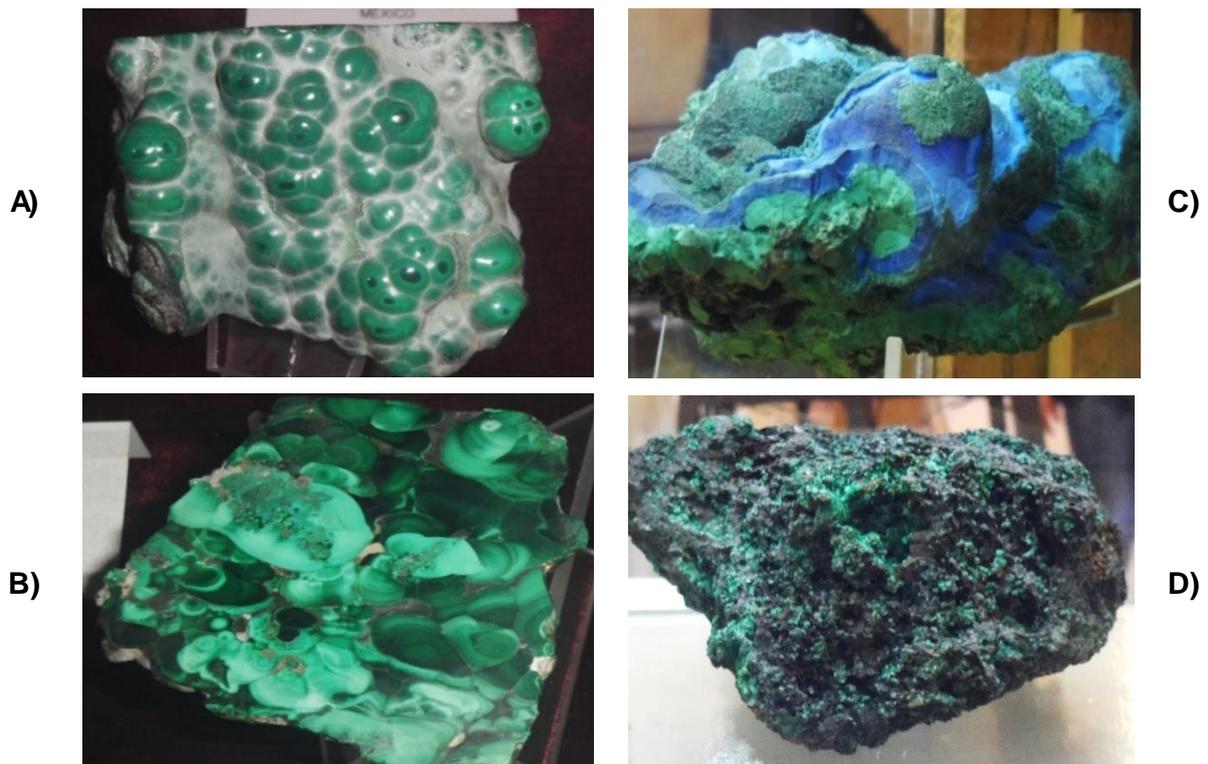


Figura 8 Carbonatos - Malaquita.

Malaquita, $Cu_2CO_3(OH)_2$, perteneciente al grupo de los carbonatos. A) Procede del Congo Belga, Zaire. B) Proviene de Siberia Asiática, Rusia. C) Extraída de Arizona, E.U.A. D) Nativa de Coahuila, México. (Fotografías tomadas en el Museo de Geología IGL-UNAM)

Las actividades que se efectúan en una mina para extraer recursos minerales dependen básicamente del tipo de mineral a extraer. Generalmente las actividades se realizan acorde a la minería metalúrgica, minería no metalúrgica y minería de recursos energéticos.

En la minería metalúrgica o también minería metálica se realizan ciertas actividades para adquirir un metal, el cual puede ser apreciado como básico (cobre, estaño, plomo, zinc, etc.), ferroso (cobalto, cromo, hierro, manganeso, etc.), precioso (oro, plata, platino, etc.) o radioactivo (torio, radio, uranio, etc.).^{2,39}

En la minería no metalurgia o no metálica se llevan a cabo dos actividades esenciales, la primera es la extracción del mineral y la segunda es la transformación del mismo en un producto útil para aplicaciones industriales. Materiales como arcilla, arena, cal, caliza (carbonato de calcio), cemento, sulfato de sodio, yeso, yodo y los materiales pétreos son algunos de los tantos productos que provienen de la minería no metálica.^{2,39}

Por su parte, la minería de recursos energéticos se enfoca principalmente en desarrollar actividades que permitan generar fuentes de energía convencional a través de combustibles fósiles como el carbón, petróleo, gas natural y gas licuado del petróleo.^{2,40}

De manera general, el conjunto de todas las actividades que se realizan en la minería tiene como objetivo primordial buscar recursos minerales en la naturaleza, extraerlos y transformarlos de manera eficiente. Una vez que los minerales estén listos, son manipulados por diferentes industrias como la agropecuaria, automotriz, construcción, electrónica, farmacéutica y otras más.⁴¹ Estas manufacturas se encargan de fabricar los productos y desarrollar los servicios que el ser humano utiliza en su vida cotidiana.⁸

3.1.1. Tipos de minería

Todas las minas poseen un ciclo de vida muy largo que consta fundamentalmente de cinco etapas: prospección, exploración minera, desarrollo, explotación y reforestación.

Cada una de las etapas tiene un propósito en específico. En las primeras etapas principalmente se busca identificar y estudiar los diferentes metales o materiales a extraer de la tierra, y con base en ello se lleva a cabo el desarrollo y preparación de la mina. La explotación y beneficio de la mina es de las etapas más importantes, durante ella se aplican distintos tipos de minería para extraer los recursos minerales deseados. Finalmente, en la última etapa se desmontan las instalaciones para el cierre de la mina y se realizan los procesos necesarios para una mejora ambiental.⁴²⁻⁴⁴

En la industria minera existen generalmente dos tipos de minería: superficial y subterránea. El uso de uno u otro tipo dependerá básicamente del mineral a extraer, de las características de la mina, de los costos de extracción y de las limitaciones medioambientales.^{6,8} También existe la posibilidad de aplicar simultáneamente ambos métodos en una mina, esto dependiendo de la magnitud y de las particularidades técnicas y económicas del depósito mineral.⁴⁵

La minería por pozos de perforación es un método de minado adicional, con él se pueden extraer recursos minerales del subsuelo sin necesidad de hacer excavaciones o túneles.¹ Otro tipo de minería es la que existe por debajo de lagos y mares, conocida como minería submarina.¹ También existen métodos de extracción de minerales que emplean técnicas de disolución, conocidos como métodos especiales.⁴⁵

- Minería superficial

La minería superficial^{46,47} (figura 9) lleva a cabo la explotación de minerales (metálicos y no metálicos) en la superficie de la tierra, comúnmente a través de aluviones, canteras, cortas y descubiertas.⁶ Esta actividad minera es adecuada para yacimientos de gran tamaño⁴⁸, además de que se utiliza en depósitos minerales alojados en cualquier tipo de roca.⁴⁵



Figura 9 Minería superficial.

Minas a cielo abierto. (Izquierda) Mina en el Cerro de San Pedro en San Luis Potosí, México. (Derecha) Mina en San Francisco de Timmins Gold Corp de Santa Ana en Sonora, México. (Fuente: Archivo fotográfico de la revista Mundo Minero y por el Ing. Toribio Ruíz de la DGM del estado de Sonora)¹

Usualmente la minería superficial se emplea en la explotación de minas de carbón, minerales metálicos, materiales granulados (arena, grava, etc.), piedras naturales y minerales industriales.⁸ Dependiendo del tipo de material a extraer es como el minado superficial se va construir (figura 10).^{1,45}



Figura 10 Tipos de minería superficial.

Las minas a cielo abierto, o también minado a tajo abierto, son construcciones circulares de enormes fosas en cualquier tipo de roca que esté en la superficie del terreno. La técnica de lixiviación con cianuro para extraer oro es una práctica muy común de la minería a cielo abierto.⁴⁹

Las minas de placer son acumulaciones de minerales valiosos mezclados con sedimentos como arena, grava y arcilla. En este tipo de minas normalmente se extrae oro, plata, estaño y piedras preciosas como diamantes.

Las canteras son similares a los tajos abiertos, con la diferencia de que sólo se extraen minerales industriales y de construcción. Además, casi no hay materiales de desecho porque todo lo que se extrae se utiliza en su mayoría.

El minado Glory Hole consiste en hacer excavaciones a tajo abierto para extraer el mineral por gravedad por medio de uno o varios contrapozos.

Todos los tipos de minería superficial son métodos de uso muy frecuente debido a que son mucho más seguros para los trabajadores, requieren de menor personal, son más económicos y permiten una mayor mecanización.⁵⁰

Actualmente en México y en muchos otros países, las técnicas de minería superficial son las más utilizadas, ya que cerca del 60% de los recursos minerales requieren ser extraídos por este medio.¹

- Minería subterránea

En la minería subterránea la explotación de recursos mineros se desarrolla debajo de la superficie de la tierra; el acceso a los recursos se realiza por medio de galerías y pozos que están enlazados con la superficie de la tierra (*figura 11*).⁵¹



Figura 11 Minería subterránea.

Túnel de acceso principal en la mina subterránea de Campo Morado en el estado de Guerrero, México. (Fuente: Archivo fotográfico de la revista Mundo Minero)¹

En este tipo de minería el riesgo de trabajo es alto, ya que siempre existe la posibilidad de que ocurran graves accidentes como hundimientos y explosiones, que en ocasiones provocan pérdidas de vidas humanas.⁴⁷

Las minas subterráneas se caracterizan dependiendo de las operaciones que se realizan con base en el tipo de minerales que se extraen (*figura 12*).^{1,45} Por lo regular la minería subterránea explota metales y yacimientos de carbón.^{8,47}

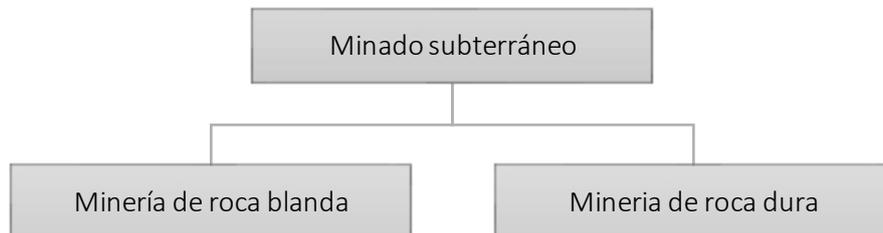


Figura 12 Tipos de minería subterránea.

La minería de roca blanda es aquella en la cual no se utilizan explosivos para extraer los minerales, sólo se usan herramientas como barrenas de diferentes tipos, martillos, picos, palas y demás. El carbón, la sal común, la potasa y la bauxita son algunos ejemplos de minerales que se explotan mediante esta técnica.

En comparación con la minería de roca blanda, en la minería de roca dura si se ocupan explosivos como parte del procedimiento de extracción de metales y minerales.

Para aplicar las técnicas de minería subterránea es necesario tener en cuenta factores como la resistencia, el tamaño y la forma del mineral, además de considerar la profundidad y posición del depósito mineral.

- Minería por pozos de perforación

Muchos recursos minerales pueden extraerse del subsuelo por medio de pozos de perforación. En este minado no es necesario realizar excavaciones y construir galerías subterráneas. Recursos como el petróleo y el agua se extraen con este tipo de minería.¹

- Minería submarina

La minería submarina, minería de aguas profundas o también minería por dragado (*figura 13*), se encarga de extraer recursos minerales del fondo de un lago o del océano. El sistema de dragado consiste básicamente en realizar excavaciones por debajo del agua a grandes materiales rocosos. Este tipo de

minería requiere de una exploración exhaustiva y de una estricta supervisión, por lo que es menos usual que la minería superficial y la subterránea.^{41,45}

En los fondos marinos profundos se pueden encontrar recursos naturales tanto energéticos como minerales. El gas natural, los hidratos de gas y el petróleo son ejemplos de recursos energéticos que se obtiene del fondo marino con mayor frecuencia. Por su parte, las costras de ferromanganeso, nódulos polimetálicos y sulfuros polimetálicos masivos son algunos de los recursos minerales que más se extraen del mar.^{41,52}

Las costras de ferromanganeso pueden estar formados por cobalto, hierro, manganeso, níquel, platino y otro tipo de metales de tierras raras como cerio, holmio, lutecio y terbio. Los nódulos polimetálicos pueden contener aluminio, bario, calcio, cobre, cobalto, hierro, litio, magnesio, manganeso, níquel, potasio, silicio, sodio y titanio. Los sulfuros polimetálicos masivos están formados por materiales como bario, cobre, oro, plata, plomo y zinc.⁴¹

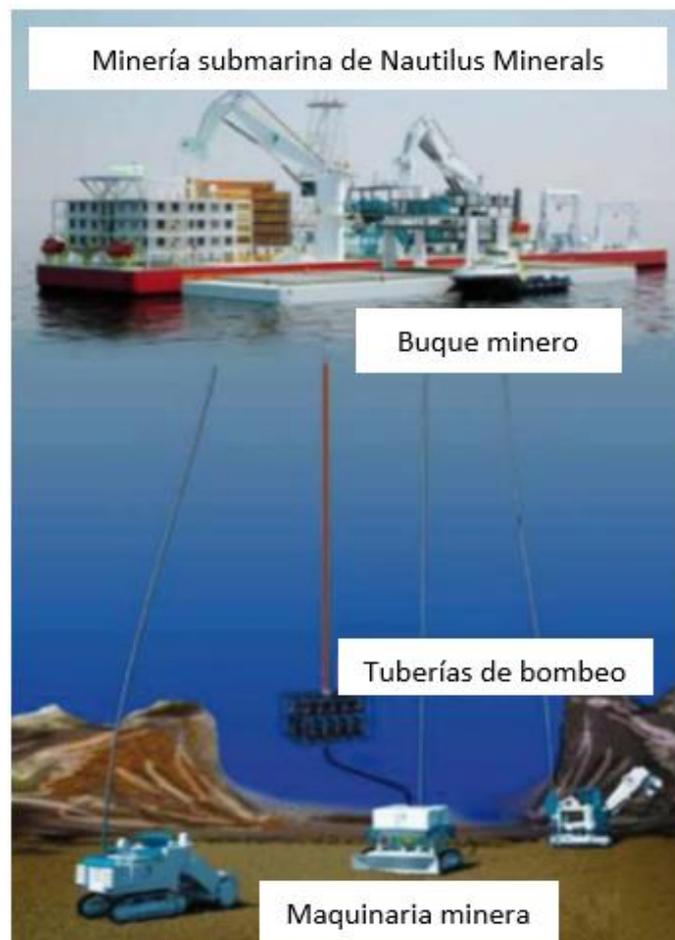


Figura 13 Minería submarina.

Esquema de un sistema robotizado para ejecutar la extracción de sulfuros masivos a 1600 m de profundidad en la primera mina submarina (Solwara 1) ubicada bajo las aguas del mar de Bismarck en Papúa Nueva Guinea. (Fuente: Nautilus Minerals)⁵²

- Métodos especiales

Los métodos especiales, también conocidos como métodos indirectos de minado, son sistemas que requieren del uso de técnicas de disolución sin necesidad de adentrar físicamente al yacimiento para realizar la extracción de minerales. El proceso Frasch y la técnica de extracción por disolución son algunos métodos especiales de minado.^{1,45}

El proceso Frasch se usa para el minado de domos de azufre. En este proceso es necesario que haya bastante agua para el tratamiento, la cual debe estar sobrecalentada a una temperatura mayor a 100°C. En México, el proceso Frasch se utiliza para explotar yacimientos de azufre que están en los estados de Oaxaca y Veracruz.

La técnica de extracción por disolución se utiliza en la explotación de domos salinos (como la halita y la sal común) y de depósitos de potasa. Este minado consiste en hacer pasar agua a través de los pozos de perforación para disolver los minerales solubles en agua dentro del mismo depósito.

3.1.2. Técnicas para la extracción de minerales

Al definir el tipo de minería a emplear para extraer los recursos minerales deseados, también se deben establecer los procesos metalúrgicos con los cuales se llevará a cabo la separación de la mena con la ganga.

Para obtener los minerales de valor y eliminar la ganga se utilizan procesos como la hidrometalurgia y la pirometalurgia.⁵³ Estos procesos tienen como objetivo purificar los minerales obtenidos, que principalmente son materiales metálicos.

Dependiendo del nivel de pureza que se pretenda obtener, estos procesos se pueden emplear de forma individual o combinadas. La selección del proceso dependerá principalmente de las propiedades físicas y químicas del mineral a extraer.

Para ser sometidos a los procesos metalúrgicos los minerales deben prepararse, tratando de eliminar la ganga lo más posible. Para ello es necesario aplicar algunas operaciones físicas como trituración, molienda, clasificación y concentración (flotación, separación magnética, etc.).

La trituración y molienda son las primeras operaciones que se aplican, ya que el objetivo de ellas es disminuir el tamaño de los minerales. Una vez que se reduce el tamaño de los minerales, estos se clasifican con base en ello. Por último, con el proceso de concentración se separa la mayor cantidad de ganga de un mineral para que éste quede enriquecido o concentrado.

- Hidrometalurgia

La hidrometalurgia es un proceso que se realiza mediante operaciones por vía húmeda que se efectúan a través de reacciones en fase acuosa y a temperaturas bajas. Las operaciones con las que se extraen metales por hidrometalurgia se exponen en la *figura 14*.⁵⁴

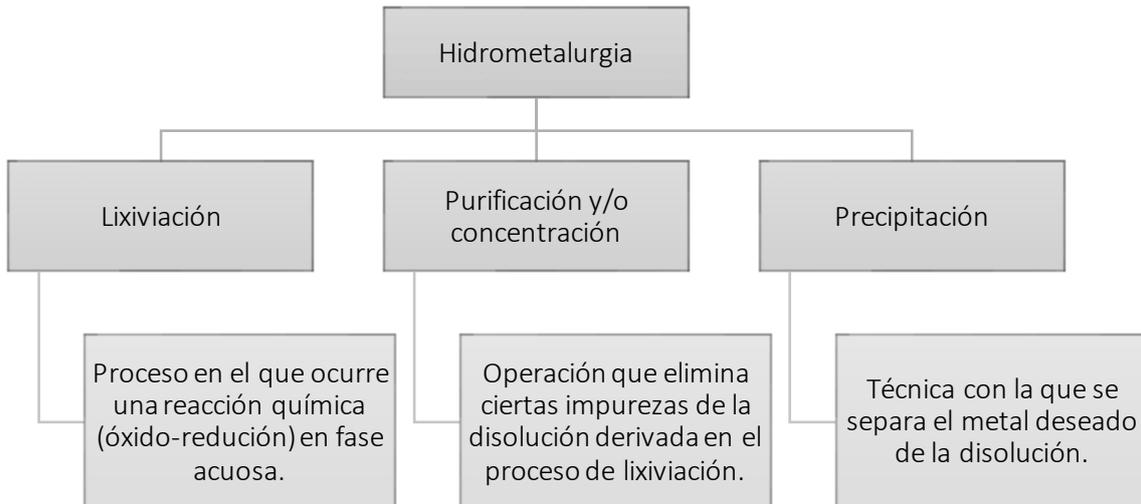


Figura 14 Procesos de extracción por hidrometalurgia.

En el proceso de lixiviación se pone en contacto directo al mineral con un disolvente para que se genere una disolución del material deseado. Esta técnica requiere forzosamente del uso de disolventes, conocidos como lixiviantes. Las disoluciones salinas (carbonato de sodio, cloruro de sodio, sulfato de sodio, etc.), los ácidos y bases fuertes son algunos de los lixiviantes más utilizados. La extracción de oro y plata por lixiviación con cianuro es una de las aplicaciones más comunes de este método.⁴⁹

Una vez que se obtiene la disolución del proceso de lixiviación, se eliminan determinadas impurezas. Algunos de los métodos que se ocupan para quitar las impurezas suelen ser métodos químicos de precipitación y extracción con disolventes (cuando las disoluciones están muy diluidas).

Finalmente, para separar el metal de la disolución se aplica la técnica de precipitación que suele realizarse mediante electrolisis o métodos convencionales como la precipitación de metales con hidrógeno gaseoso a presión y elevadas temperaturas.

- Pirometalurgia

La pirometalurgia es un proceso que se lleva a cabo mediante operaciones por vía seca que se efectúan a temperaturas altas entre productos que están en estado sólido, líquido o gaseoso. Algunas de las principales operaciones con las que se extraen metales por pirometalurgia se muestran en la *figura 15*.⁵⁵

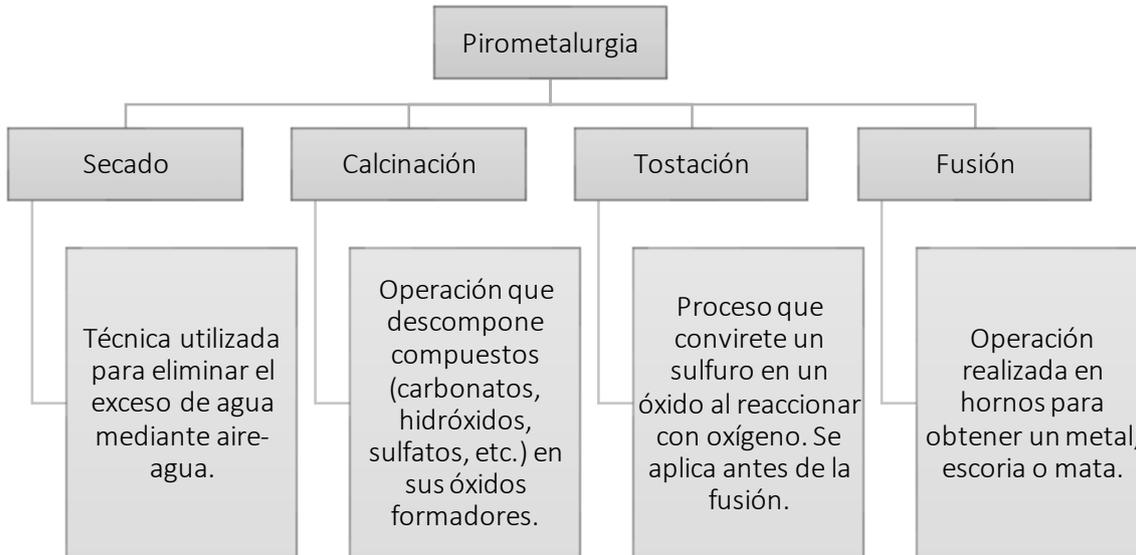


Figura 15 Procesos de extracción por pirometalurgia.

3.2. Importancia de la minería

La industria minera es la actividad que le ofrece al mundo los recursos mineros con los cuales se pueden manufacturar productos y servicios necesarios para tener una buena calidad de vida.¹ Por esta razón, la minería juega un papel muy importante, no sólo en la vida diaria del hombre, sino también en la economía de un país.

Desde tiempo atrás los recursos minerales se han utilizado para fabricar diversos productos como herramientas de caza, artefactos de cocina, joyería y artículos de limpieza como detergentes y pasta dental. El hombre también ha trabajado con estos recursos para desarrollar nuevas tecnologías y para realizar cimentaciones, lo que ha originado que la minería tenga mayor relevancia en la vida del ser humano.^{1,7}

Con el paso del tiempo, la minería se ha convertido en una de las actividades industriales más importantes en el mundo. Esto como resultado de que prácticamente la mayoría de los productos de uso común proceden de materiales que contienen minerales industriales (arenas silíceas, arcillas rojas, caolín,

caliza, fosfatos, etc.), minerales metálicos, rocas ornamentales y materiales granulados.⁵⁶

Actualmente, la minería es una actividad que está muy presente en numerosas investigaciones científicas, en mejoras tecnológicas y medicinales, y en construcción e infraestructura. La minería es también muy utilizada en la producción de vidrios, cerámicas y porcelanas, plásticos, pinturas, papeles, detergentes y jabones, fármacos, cosméticos, joyería, ropa y calzado, aparatos electrodomésticos, dispositivos electrónicos, partes de automóviles, alimentos, fertilizantes y de muchos otros objetos y productos. Además, la minería es parte fundamental en el desarrollo de algunos servicios como la electricidad, comunicación y transporte.^{1,7,8}

Los cristales son uno de los productos más utilizados en el mundo, ya que están presentes en gran parte de los artículos que usamos. Los vidrios son materiales que se elaboran a partir de materias primas como arena de sílice, sosa y feldespato. Comúnmente, los cristales se utilizan para fabricar materiales de laboratorio, diferentes tipos de envases, vajillas, cristales para anteojos, ventanas y vidrios para parabrisas. También son parte fundamental en la producción de aparatos electrónicos y electrodomésticos como celulares, computadoras, cámaras fotográficas, televisores, cafeteras, estufas y refrigeradores.^{7,56}

Los plásticos, las pinturas, el papel y los detergentes son productos que también se utilizan mucho. La fabricación de plásticos requiere del uso de derivados del petróleo y, además, de minerales como el caolín, wollastonita, mica, talco, arcillas, sílice y carbonato cálcico. Las pinturas se producen a partir de minerales como yeso, talco, mica y barita. En la producción de papel se requiere de materiales como la celulosa y minerales como el talco, caolín y carbonato cálcico. El sulfato sódico es una sustancia muy utilizada en la producción de detergentes.^{7,56}

Para la elaboración de medicamentos la industria farmacéutica utiliza comúnmente minerales como carbonatos, caolín, talco y óxido de titanio. Por su parte, para la fabricación de cosméticos como esmaltes para uñas, labiales y maquillaje para ojos y rostro se ocupan minerales como talco, caolín y mica.⁵⁶

Los minerales también están presentes en los alimentos, por ejemplo, los cereales contienen carbonato cálcico y el pan incluye yeso.⁷ Así mismo, la industria de alimentos y bebidas utiliza minerales como la sal para hacer conservas y la cal para conseguir azúcar a partir de remolacha.⁵⁶

En el cultivo de alimentos, los minerales también son indispensables, ya que están presentes en forma de fertilizantes y correctores de suelos. Los fertilizantes

se producen con azufre, carbonato cálcico, fosfatos, potasa y nitratos. Los correctores de suelo se componen de yeso y caliza.^{7,56}

3.3. La minería en México

México es uno de los países más destacados en cuanto a riqueza de minerales. A nivel mundial se sitúa entre los 10 principales productores de recursos minerales como plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro, cobre, manganeso y hierro.^{57,58}

La industria minera tiene lugar en gran parte de los estados de la República Mexicana. Sonora, Chihuahua, Zacatecas, Durango, Guerrero, Coahuila y Guanajuato son las entidades que cuentan con los principales yacimientos minerales.^{2,57} En estas entidades regularmente se extrae plata, oro, cobre, zinc y plomo. (figura 16)^{59,60}



Figura 16 Provincias metalogénicas de México.

Potencial Geológico de México. Provincias metalogénicas: regiones en las que una serie de depósitos minerales tienen características similares o comunes. (Fuente: Servicio Geológico Mexicano, SE.)

Los yacimientos más importantes en México son: Cananea, Charcas, Fresnillo, La Caridad, Las Cuevas, Las Encinas, La Herradura, Limón Guajes, Molango, Peñasquito, Sauzal y Tayoltita.^{60,61}

A nivel mundial los yacimientos mexicanos más importantes son Cananea (yacimiento de cobre más grande de México, localizado en Sonora), Fresnillo (mina más rica de plata en el mundo, ubicada en Zacatecas) y Las Cuevas (deposito mineral de fluorita situado en San Luis Potosí).⁶⁰

3.3.1.Economía de la minería mexicana

A partir de que se comenzó a trabajar la minería para elaborar herramientas y objetos que permitieran su subsistencia y mejoraran su calidad de vida, la industria minera se convirtió en una actividad fundamental en el desarrollo de la economía.

La minería es una de las actividades económicas más importantes en México, se ha practicado desde la época prehispánica y fue una de las principales actividades productivas durante el Virreinato en México, el Porfiriato y la Revolución Mexicana.⁶²

La minería mexicana, desde principios del año 2000, ha tenido un desarrollo económico favorable como consecuencia de la gran demanda mundial de minerales.

Durante el periodo del año 2000 al año 2016, la minera presentó en su mayoría resultados favorables, por ejemplo⁶³:

- La producción minero-metalúrgica aumentó su valor de 3,298 a 25,375 millones de dólares.
- Las exportaciones de metales incrementaron de 865 a 14,613 millones de dólares.
- La producción de oro creció significativamente, pasó de 26.3 a 132.4 toneladas.

No obstante, en los años 2008 y 2009, la minería tuvo ciertas dificultades que estancaron su crecimiento económico, algunas de ellas fueron⁶⁴:

- Demoras en las exploraciones.
- Incremento del costo de servicios energéticos.
- Huelgas y paros por parte de los trabajadores.

- La reducción de bienes y servicios en los mercados.
- La inestabilidad en el precio de minerales y metales.

Para el año 2010 la situación económica de la minería mexicana cambio drásticamente, esto debido a que a nivel mundial México fue uno de los países más dominantes en los procesos de extracción de metales preciosos e industriales y minerales no metálicos.

El 2010 fue un año clave para la industria minera, en ese año la producción de caolín, fluorita, fosforita, hierro, manganeso, molibdeno, oro, plata, plomo, sulfato de sodio y zinc fue de las más importantes en el mundo. A finales del mismo año, México se consideró como el primer país de América Latina y el cuarto a nivel mundial para realizar inversiones mineras.⁶⁴

En 2017 la economía mexicana tuvo una gran expansión impulsada especialmente por la industria minera.⁵⁹ La economía minera creció mucho, hubo un alza en los precios de minerales y metales, originando que la producción minero-metalúrgica tuviera un valor mayor al 50% con relación al registrado en 2010.⁶⁴ En ese año las principales zonas mineras fueron las de Sonora, Zacatecas y Durango.⁶⁵

En 2019 la industria minera alcanzó un valor de 228 mil 296 millones de pesos. La extracción de plata, cobre y oro representó el 68.4% del valor de la producción total; la manufactura de plata figuró el 16.1%, cobre el 24.6% y oro el 27.7%. En ese año Sonora, Chihuahua y Zacatecas fueron los estados con mayor producción de minerales, aportando cerca del 70% del valor de la producción minera nacional.⁵⁷

En los últimos años los estados de Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí y Chihuahua, se han convertido en parte fundamental para el crecimiento de la economía de México, gracias a su gran actividad minera.⁶¹ El hecho de que la minería brinda una enorme variedad de insumos a gran parte de los sectores industriales, es otro aspecto que también ha intervenido en el desarrollo de la economía mexicana.

Debido a que la minería ha contribuido mucho en la economía de México, esto ha originado que esta industria se considere como una de las actividades productivas más importantes para el país. Asimismo, el hecho de que México se posiciona como el principal país productor de plata en el mundo y que persiste dentro de los mejores países para realizar inversiones en explotación minera, también influye de manera positiva en el desarrollo económico de la minería mexicana.⁵⁷⁻⁵⁹

3.4. Necesidad de nuevos disolventes en las industrias

Gran parte de los procesos industriales existentes en la actualidad requieren del uso de disolventes orgánicos para alcanzar su cometido. Los disolventes orgánicos, que en su mayoría son compuestos orgánicos volátiles (COV)^{66,67}, son los disolventes más utilizados a nivel laboratorio e industrial.

Sin embargo, también existen otros tipos de disolventes, conocidos como “disolventes verdes”, que prometen ser una excelente alternativa para el desarrollo de procesos industriales.

3.4.1. Tipos de disolventes orgánicos

Los disolventes orgánicos son una buena opción para efectuar reacciones químicas que son necesarias en diversos procesos industriales. Actualmente existen varios tipos de disolventes con diferentes propiedades, lo que los convierte en un medio óptimo para desarrollar procesos químicos.³¹

La clasificación química de los disolventes orgánicos es con base en su estructura química, normalmente se distinguen dos tipos, disolventes oxigenados y disolventes de hidrocarburos (*figura 17*).^{68,69}

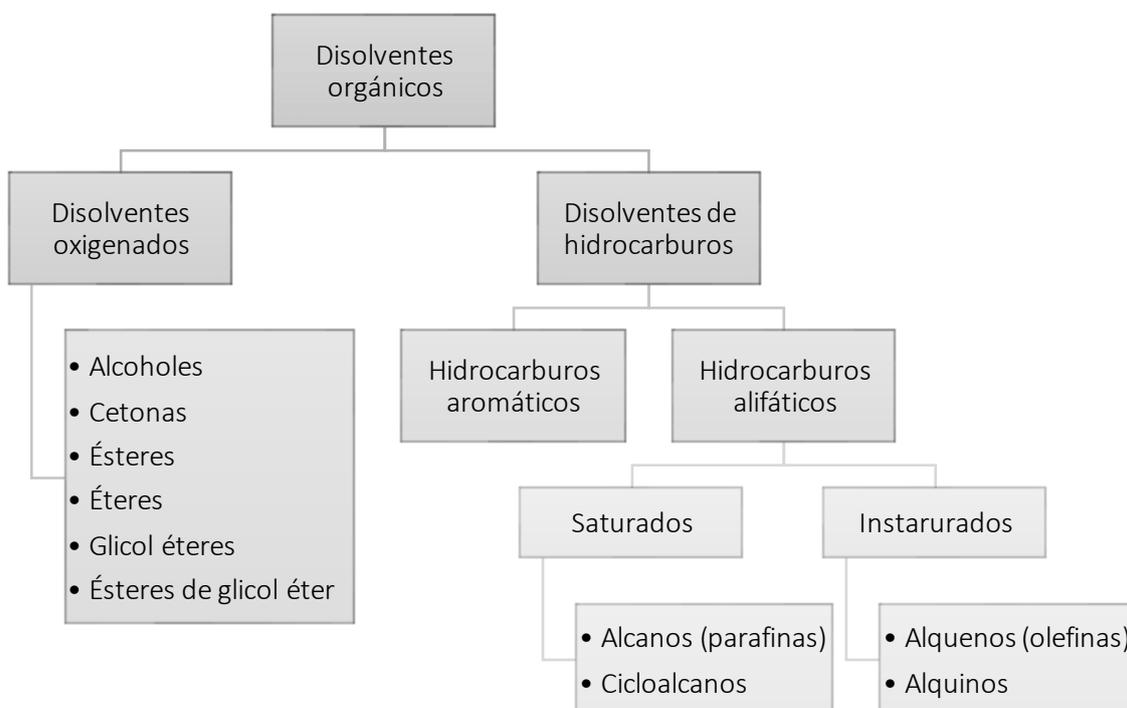


Figura 17 Tipos de disolventes orgánicos.

Los disolventes oxigenados son aquellos que contienen en su estructura química átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno. Por lo regular se obtienen mediante reacciones químicas a partir de olefinas. Son compuestos con un alto poder disolvente, además de que tienen un olor agradable.^{68,70,71}

Los disolventes de hidrocarburos contienen únicamente átomos de hidrógeno y carbono en su estructura química. Muchos de estos disolventes se obtienen mediante la separación por destilación en refinerías y una posterior purificación. No obstante, la minoría de ellos se producen mediante reacciones químicas a partir de olefinas.^{68,69}

Otro tipo de disolventes orgánicos son los disolventes halogenados, que son aquellos que contienen en su estructura química un halógeno tal como el flúor, cloro, bromo y yodo. Este tipo de disolventes, especialmente el percloroetileno, es muy eficiente en la limpieza en seco utilizada comúnmente en tintorerías y lavanderías.⁶⁹ Otro ejemplo es el cloroformo, éste se utiliza como disolvente en la fabricación de resinas, plásticos y refrigerantes.

Los aldehídos y los alcoholes dihidricos son también otros tipos de disolventes orgánicos. Los aldehídos, al igual que las cetonas, son de los compuestos que más se encuentran en estado natural, estos se producen en grandes cantidades para usarse como disolventes. Los alcoholes dihidricos, mejor conocidos como glicoles, son buenos disolventes dado que son miscibles con muchos líquidos⁶⁹; el etilenglicol, propilenglicol y dietilenglicol son algunos de los glicoles más utilizados en las industrias.¹⁷ Es importante mencionar que la mayoría de los glicoles son nocivos para el medio ambiente, ya que son compuestos tóxicos y volátiles (COV).

3.4.2. Uso de disolventes orgánicos en los sectores industriales

Los disolventes orgánicos juegan un papel muy importante en la actividad industrial, tienen varias aplicaciones en todo tipo de sectores como el de minería, pinturas y barnices, plásticos, agricultura, alimentación, textil, químico y farmacéutico.

La elección de un disolvente orgánico depende de varios factores, entre los que destacan la solubilidad, el punto de ebullición, la velocidad de evaporación, la viscosidad y la tensión superficial.⁶⁸

Algunos de los tipos de disolventes orgánicos más utilizados en el sector industrial son los alcoholes (metanol y etanol), cetonas (acetona y butanona-2), éteres (2-metoxietanol y etoxietanol), ésteres (acetato de metilo y acetato de

etilo), hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, xileno y etilbenceno) e hidrocarburos alifáticos (hexano).^{15,19,69}

Los disolventes orgánicos sirven para producir y formar una gran variedad de productos. Regularmente se utilizan para disolver, diluir y extraer sustancias como aceites y grasas, colas y pegamentos, materias primas, lacas y barnices, y sustancias orgánicas.^{16,17,72}

Dentro de los usos más comunes que tienen los disolventes orgánicos está su aplicación como medios de reacción en síntesis química, limpieza de metales, diluyentes de pintura y quitamanchas, pesticidas, reactivos químicos y agentes deshidratantes, y líquidos para extracción.^{69,72}

Los disolventes orgánicos también se emplean como productos químicos intermedios para fabricar productos farmacéuticos, cosméticos, químicos, colorantes y tintas, plásticos, pinturas, barnices, adhesivos y revestimientos. Además de que pueden ser utilizados como agentes desengrasantes o limpiadores.^{19,69,72,73}

A continuación, en la *tabla 1*, se describen algunas de las aplicaciones más comunes que tienen los diferentes tipos de disolventes orgánicos en los sectores industriales.^{68,69,73–75}

Disolvente	Aplicaciones industriales
Alcoholes	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se utilizan como disolventes principalmente en industrias como la farmacéutica, alimentos y bebidas, colorantes, cosméticos, perfumes, detergentes, textiles, productos químicos, pinturas y barnices. ○ El etanol y metanol son de los alcoholes más importantes en la industria. El etanol disuelve una enorme variedad de sustancias, por lo que se ocupa para fabricar cosméticos, perfumes, barnices, fármacos, plásticos y lacas. El metanol se usa para disolver tintas, colorantes, resinas y adhesivos.
Aldehídos y cetonas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sirven como disolventes y materias primas para fabricar otros compuestos químicos. También se utilizan para elaborar plásticos técnicos debido a que muestran altas resistencias. ○ Los aldehídos se ocupan en industrias de alimentos y productos químicos. El formaldehído es uno de los aldehídos que más usos tiene gracias a sus propiedades disolventes. ○ Las cetonas también se utilizan en la industria alimentaria, además de que se usan en la preparación de perfumes. En general, las cetonas son buenos disolventes para ésteres.

Tabla 1 Aplicaciones industriales de los disolventes orgánicos.

Disolvente	Aplicaciones industriales
Ésteres	<ul style="list-style-type: none"> ○ Son buenos disolventes para revestimientos superficiales. ○ El acetato de etilo es utilizado como disolvente de esmaltes de uñas y quitaesmaltes, esto gracias a sus propiedades de secado rápido.
Éteres	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se ocupan para disolver sustancias orgánicas como aceites, grasas, resinas y perfumes.
Glicoles	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se utilizan como disolventes en tintas de impresión. ○ En cosmética suelen usarse como disolventes en cremas y perfumes. ○ El etilenglicol se usa mucho en la producción de anticongelantes para autos. ○ El dietilenglicol es buen disolvente para resinas, tintes, aceites y demás compuestos orgánicos.
Éteres glicólicos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Son muy útiles como componentes activos de productos de limpieza, ya que son disolventes muy solubles en grasas y aceites, muy compatibles en agua y además son biodegradables.
Hidrocarburos alifáticos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Se ocupan como disolventes de aceites, grasa y resinas. ○ También se emplean para extraer metales (como cobre, cobalto y zinc) de minerales. Son disolventes que tienen una buena solubilidad y permiten una rápida reacción del metal para su extracción del mineral, así como una rápida separación de la mezcla del disolvente y el metal.
Parafinas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Las isoparafinas son parafinas que se ocupan mucho como disolventes en la industria cosmética. ○ También se usan como disolventes en la limpieza en seco de prendas de vestir.
Hidrocarburos aromáticos	<ul style="list-style-type: none"> ○ Principalmente se utilizan como diluyentes de lacas y barnices junto a otros disolventes. ○ El isopropilbenceno es un buen disolvente de pinturas, lacas de celulosa, grasas y resinas. Además, está presente en muchos disolventes comerciales derivados del petróleo. ○ El tolueno es muy útil en las industrias, se usa como disolvente de tintas de impresión, aceites, resinas y caucho natural y sintético. También se maneja como disolvente y diluyente de pinturas y barnices de celulosa. ○ El xileno también suele usarse como diluyente de pinturas y barnices. Además, es un buen disolvente de parafinas.

Tabla 1 (Continuación) Aplicaciones industriales de los disolventes orgánicos.

El hecho de que los disolventes orgánicos representen una buena alternativa para llevar a cabo reacciones químicas, y que por tanto su uso sea muy común, se debe principalmente a que los costos de producción son bajos.^{16,69}

No obstante, a pesar de que los disolventes orgánicos se usan en grandes cantidades, estos presentan grandes desventajas. Al ser compuestos orgánicos volátiles se evaporan con facilidad y son inflamables, lo que produce un gran riesgo durante su manipulación.^{32,72} Los altos niveles de volatilidad que presentan este tipo de compuestos ocasionan que estos se acumulen en la atmósfera. También son compuestos tóxicos, aunque el nivel de toxicidad varía de unos productos a otros. Además, son considerados en su mayoría como disolventes no biodegradables, lo que contribuye a que sean fuentes importantes de contaminación ambiental.^{15,19,24,25,69,72}

Los disolventes de uso común además de ser muy dañinos para el ambiente, también generan un impacto negativo en la salud del hombre, perjudicando principalmente a las personas que están en contacto directo con ellos.^{21,67,72} Se ha comprobado que algunos de los efectos directos que los compuestos orgánicos volátiles pueden causar en el ser humano son acciones cancerígenas, irritaciones cutáneas y problemas cardíacos, digestivos y respiratorios.^{67,69} Compuestos como el formaldehído y el 1,3-butadieno son considerados con un alto riesgo carcinogénico, mientras que el benceno y diclorometano representan un riesgo menor.⁶⁶

Asimismo, se ha encontrado que en algunos procesos químicos en los que se han utilizado disolventes convencionales, los resultados no han sido favorables. Tal es el caso del uso de disolventes orgánicos en la extracción de recursos minerales, en donde las eficiencias de extracción han sido muy bajas, lo que ha generado un incremento en los volúmenes manejados y en la energía aplicada durante la extracción para obtener mejores resultados.¹⁵

El diseño de nuevos disolventes, que sean amigables con el medio ambiente, es una opción factible para desarrollar procesos químicos que no tengan gran impacto ambiental. Para ello la química verde e ingeniería verde se han enfocado en el diseño y desarrollo de disolventes que sean ecológicamente sostenibles.^{15,22} Esta innovación representa una excelente alternativa para ser aplicada en procesos industriales, tal como en los procesos de extracción de metales.

3.4.3. Química Verde

De manera general, la química verde se define como la aplicación de la ciencia a procesos químicos e industriales de forma sostenible, segura y ecológica.

Tiene como objetivo principal investigar, diseñar y crear productos y procesos químicos para reducir el uso o la generación de sustancias peligrosas.^{16,76,77} Este concepto se originó entre 1990 y 1993 con la finalidad de hacer un uso más responsable de la química.^{15,16,31}

La química verde se fundamenta en la lógica desde el punto de vista científico, en la seguridad de los procesos convencionales, en la disminución de costos y en la compatibilidad con desarrollos sostenibles.^{16,77}

En la *figura 18* se muestran los doce principios^{16,31,77,78} con los que la química verde cuenta para dar solución a los problemas que se han generado en el medio ambiente.

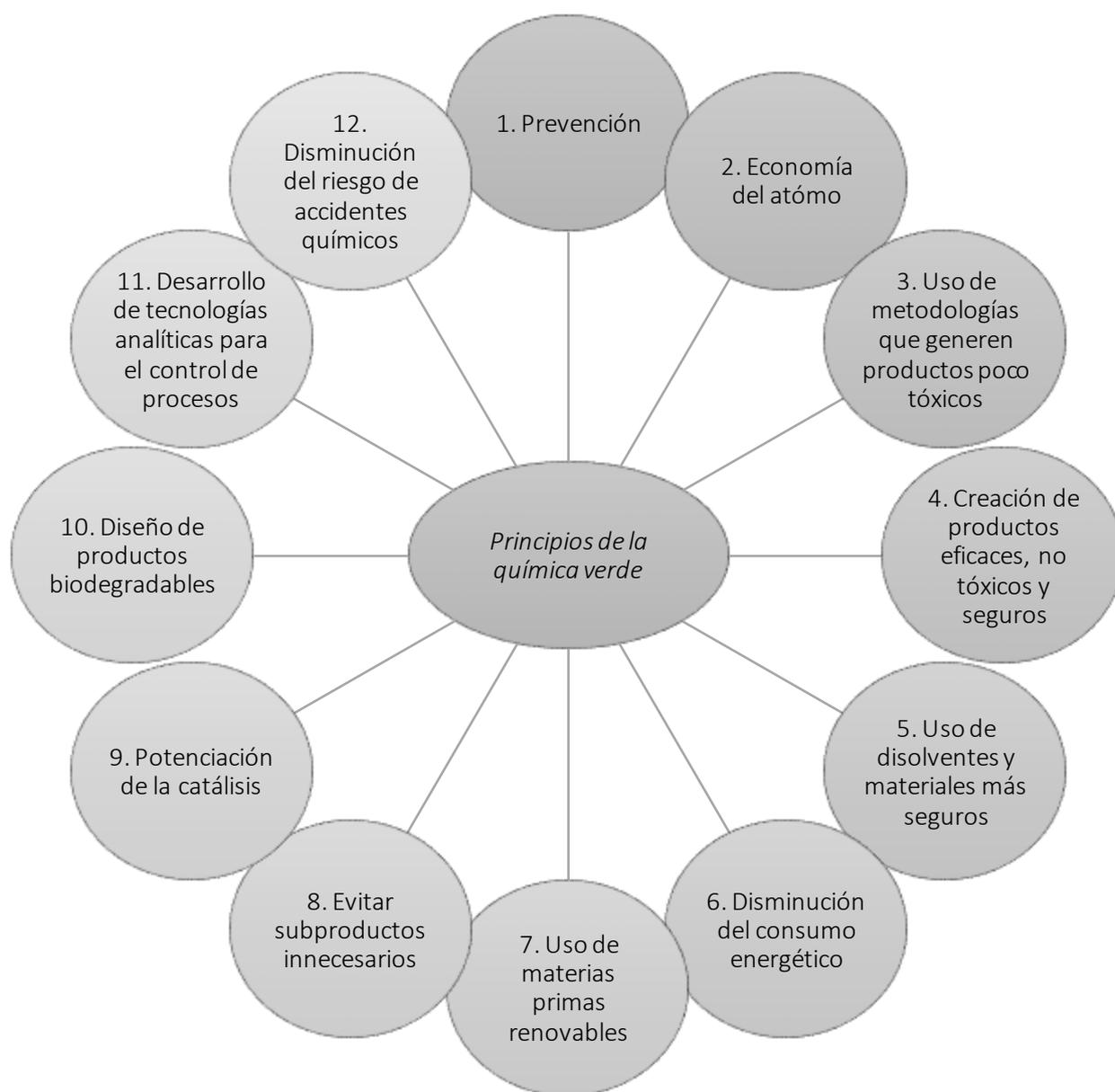


Figura 18 Los doce principios de la química verde.

1. *Prevención*: es preferible evitar la formación de un residuo que eliminarlo una vez que esté formado.
2. *Economía del átomo*: las síntesis se deben diseñar de manera que todos los reactivos se incorporen al máximo en el producto final.
3. *Uso de metodologías que generen productos con una mínima toxicidad*: los métodos de síntesis deben producir sustancias con poca o nula toxicidad.
4. *Generación de productos eficaces, no tóxicos y seguros*: diseñar los productos químicos de forma que mantengan su eficacia y reduzcan su toxicidad.
5. *Manejo de disolventes y materiales auxiliares más seguros*: evitar el uso de sustancias no necesarias.
6. *Disminución del consumo energético*: reducir todo lo posible el gasto de energía, los requerimientos serán descritos por su impacto económico y medioambiental.
7. *Empleo de materias primas renovables*: es deseable trabajar con materias primas renovables que sean viables económica y técnicamente.
8. *Evitar subproductos innecesarios*: impedir la formación de productos que no tienen un propósito concreto.
9. *Potenciación de la catálisis*: manejar catalizadores reutilizables.
10. *Diseño de productos biodegradables*: los productos químicos generados deben diseñarse de modo que se transformen en productos inocuos de degradación y no persistan en el medio ambiente.
11. *Desarrollo de tecnologías analíticas para la monitorización de los procesos*: diseñar tecnologías de tal forma que permitan el monitoreo y control en tiempo real.
12. *Minimizar el riesgo potencial de accidentes químicos*: utilizar sustancias que minimicen el riesgo de explosiones e incendios.

La química sostenible contribuye principalmente a minimizar los riesgos en la salud y en el medioambiente.⁷⁷ Para cuidar el ambiente, la química verde controla la dispersión de contaminantes en la atmósfera, disminuye el uso de

agua y energía, y también ayuda a reducir el impacto que los productos químicos ya utilizados tienen en el medio. Asimismo se encarga de aminorar los peligros que pueden existir durante la ejecución de procesos químicos.¹⁶

La ingeniería verde surge cuando la química verde y la ingeniería química diseñan o rediseñan un producto o un proceso químico con el propósito de minimizar residuos y reducir el uso o la generación de materiales altamente peligrosos.⁷⁶

Para que un producto o proceso sea calificado como ecológico, debe cumplir con varios criterios como la biodegradabilidad, reciclabilidad, no toxicidad, disponibilidad y no inflamabilidad, entre otros. Es importante que el enfoque principal sea el cuidado del medio ambiente, pero también es fundamental que el desarrollo de nuevas tecnologías sea económico, rentable y muy seguro.⁷⁶

Los llamados “disolventes verdes” son productos creados por la química e ingeniería verde. Son un nuevo medio líquido para analizar y desarrollar reacciones químicas.²⁵ Como ejemplo de ellos están los disolventes poliméricos líquidos, fluidos supercríticos (como el dióxido de carbono supercrítico¹⁶), líquidos iónicos y disolventes eutécticos.^{15,19,20,22}

El uso de disolventes verdes, en comparación con el uso de disolventes orgánicos, evita la contaminación atmosférica debido a la gran diferencia que existe entre las volatilidades de los mismos.^{20,24}

Para asegurar los avances en la química verde, se requiere del desarrollo de nuevos tipos de disolventes. Dentro de este ramo se encuentran los llamados disolventes de diseño. Estos disolventes son diseñados de acuerdo con las necesidades de un proceso químico. Dependiendo del diseño y de la estructura del disolvente, éste será o no considerado como disolvente verde.

Los líquidos iónicos (LI) y los disolventes eutécticos (DES) son considerados como disolventes de diseño.^{15,24,28} Estos son los disolventes ecológicos más estudiados y utilizados actualmente en diversas actividades científicas y tecnológicas. Como ejemplo de una de sus aplicaciones está el proceso de extracción líquido-líquido de metales.^{26,29,32,43}

3.5. Disolventes verdes

Las extracciones de minerales, en especial de metales, son algunos de los procesos industriales que utilizan disolventes orgánicos con frecuencia. Los líquidos iónicos y los disolventes eutécticos pueden ser una excelente opción para disminuir el uso de disolventes orgánicos en este tipo de procesos, y así contribuir a desarrollar procesos químicos sostenibles.

3.5.1. Historia de los líquidos iónicos

La historia de los líquidos iónicos se remonta en el año 1914, cuando el químico ruso Paul Walden desarrolló el primer líquido iónico. El primer compuesto de este tipo se sintetizó a partir de etilamina y ácido nítrico concentrado, dando como resultado nitrato de etilamonio ($[\text{EtNH}_3][\text{NO}_3]$).^{21,22}

El desarrollo de estos compuestos en su momento no generó ningún tipo de interés en el área científica. Sin embargo, con el paso del tiempo estas mezclas comenzaron a atraer la atención de algunos científicos, lo que estimuló el desarrollo de nuevos líquidos iónicos.

En 1948, Hurley y Wier, sintetizaron el segundo líquido iónico a partir del catión de alquilpiridinio y el anión tetracloroaluminato(III).²⁴ Y, conforme pasaban los años se iban creando más líquidos iónicos pero la mayoría de ellos eran muy difíciles de estudiar ya que tenían alta sensibilidad a la humedad.

A finales de 1970 el estudio de los líquidos iónicos se retomó nuevamente, en esa ocasión el éxito que tuvieron fue mayor debido a que lograron ser conocidos en más áreas de investigación. Durante ese periodo un grupo de científicos generó la síntesis de sales líquidas a temperatura ambiente. En ese mismo año surgió una de las tantas aplicaciones que tienen los líquidos iónicos, su uso en la electroquímica como electrolitos en baterías¹⁵.

La primera publicación que se realizó sobre líquidos iónicos fue en 1980, en donde se mencionó que eran medios de reacción y catalizadores efectivos en reacciones de química orgánica. Hussey y Seddon hicieron un estudio sobre la aplicación de los líquidos iónicos cloroaluminatos como disolventes polares y no acuosos en la formación y estabilidad de complejos de metales de transición.²¹ Desde esa fecha los líquidos iónicos se consideraron como disolventes, ya que anteriormente sólo eran apreciados como una clase de fluidos conformados por iones y que a temperaturas menores de 100°C eran líquidos.²³

En 1990 se estudió el uso de líquidos iónicos como disolventes en catálisis homogénea de metales de transición en reacciones bifásicas. Con el estudio se concluyó que una de las grandes problemáticas de los líquidos iónicos, basados en aniones cloroaluminatos, era su sensibilidad ante el agua y el oxígeno.²¹

El estudio de los líquidos iónicos tuvo gran impulso en 1992, cuando John S. Wilkes y su grupo de trabajo descubrieron la síntesis de sistemas muy estables a partir del uso de aniones inorgánicos poliatómicos como el tetrafluoroborato ($[\text{BF}_4]$) y el hexafluorofosfato ($[\text{PF}_6]$). Estos sistemas altamente estables generaron una gran variedad de aplicaciones para los líquidos iónicos en catálisis de metales de transición. Por esa razón, los líquidos iónicos con iones tetrafluoroborato se han utilizado con éxito hasta la fecha.

Con el paso de los años el uso de los líquidos iónicos comenzó a tomar relevancia en diferentes áreas tanto científicas como industriales, ya que eran considerados compuestos con gran potencial para utilizarse como catalizadores, electrolitos y disolventes.

Hoy en día la posibilidad de diseñar nuevos líquidos iónicos es mucho mayor que antes. Actualmente existe una gran variedad de cationes y aniones con los cuales se puede sintetizar un gran número de estos compuestos con diferentes propiedades que pueden ajustarse para una tarea específica.²⁴ Además, hay muchas publicaciones que permiten conocer información que antes no se sabía con certeza.

3.5.2. Historia de los disolventes eutécticos

Los disolventes eutécticos son familia de los líquidos iónicos, pero estos surgieron después. No se conoce con exactitud la fecha del hallazgo, pero fue hasta principios de siglo XXI cuando comenzaron a estudiarse más para ser utilizados como medios de reacción.¹⁹

El término disolvente eutéctico se empleaba para hacer referencia a mezclas que se formaban a partir de compuestos aceptores y donadores de enlaces hidrogeno. No obstante, con el paso de los años este término se ha utilizado para describir todos los tipos de disolventes eutécticos existentes.²³

Abbot et al., en el 2001, realizaron una mezcla de cloruro de colina y una sal metálica (cloruro de zinc) con la cual observaron que se podía formar un líquido a temperaturas por debajo de los 100°C.²⁹ La intención de las investigaciones realizadas era proponer un disolvente alternativo a los líquidos iónicos.⁷⁹

En 2003, Abbot et al. sintetizaron el primer disolvente eutéctico²⁶ a partir de cloruro de colina con urea en una relación molar 2:1. La síntesis se desarrolló con agitación constante a una temperatura de 80°C hasta que se obtuvo un líquido homogéneo. La mezcla resultante era líquida a temperatura ambiente y tenía un punto de fusión de 12°C (punto de fusión menor al del cloruro de colina de 302°C y al de la urea de 133°C). En ese mismo año se publicó el primer artículo sobre disolventes eutécticos, se definió lo que era un disolvente eutéctico y se dio a conocer la forma en cómo se preparaban este tipo de disolventes de la química verde.^{20,28,29,32,80} También se habló de la biodegradabilidad del primer disolvente eutéctico.²⁶

En 2009, con el método de liofilización, surgió otra forma de preparar disolventes eutécticos. Nuevamente se ocupó cloruro de colina (ChCl) con urea en relación molar 2:1, pero esta vez con un contenido del 5% de soluto en peso mezclando con soluciones acuosas separadas de cada uno de los componentes.

Posteriormente, las soluciones mezcladas se congelaron y después se liofilizaron para producir un disolvente viscoso transparente.²⁸

Para el año 2011 ya se habían reportado treinta combinaciones de disolventes eutécticos a base de cloruro de colina con ácidos carboxílicos naturales, diferentes azúcares e incluso agua. Los líquidos viscosos que se obtuvieron recibieron el nombre de “*disolventes eutécticos naturales profundos (NADES)*”, dado que son biodegradables o formados de compuestos naturales.^{28,29}

En 2015 se comenzaron a analizar diferentes mezclas para preparar disolventes eutécticos. Una de las preparaciones fue a base de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) con urea. Otras mezclas eutécticas se elaboraron con tricloruro de hierro ($FeCl_3$); estas mezclas se utilizaron en la desulfuración extractiva de combustible líquido.²⁸

Lo más reciente que se ha hecho sobre los disolventes eutécticos es el estudio que se realizó sobre la posibilidad de crear mezclas eutécticas a partir de productos naturales. Choi y su equipo exploraron fuentes naturales como el agua y metabolitos primarios comunes en células vivas (azúcares, alcoholes de azúcar, ácidos orgánicos, aminoácidos, aminas).²⁹ También se han estudiado y desarrollado disolventes eutécticos hidrofóbicos, ya que la mayoría de los ya desarrollados eran hidrofílicos.³⁰

CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO

Este capítulo consta de cinco secciones. En la *sección 4.1* se habla sobre qué es una extracción líquido-líquido y cómo se lleva a cabo. En la *sección 4.2* se especifica qué es un líquido iónico, así como su síntesis, los tipos que hay, propiedades, ventajas y desventajas, y sus aplicaciones. En la *sección 4.3* se menciona que es un disolvente eutéctico, cómo se forma, cuáles son sus propiedades, los tipos existentes, sus ventajas y desventajas, y por último se mencionan sus aplicaciones. En la *sección 4.4* se señalan las diferencias y similitudes que hay entre un líquido iónico y un disolvente eutéctico, así como las ventajas y desventajas de estos. Finalmente, en la *sección 4.5* se muestra información sobre los reactivos que se utilizaron en la experimentación, se indican las fuentes naturales de donde provienen, así como algunas de sus características y usos.

4.1. Extracciones líquido-líquido

La extracción líquido-líquido o extracción con disolvente^{81,82} es una técnica instrumental de uso analítico que se puede definir como la separación de un componente de una mezcla por medio de un disolvente.⁸³ Dicho de otra manera, es una operación unitaria⁸⁴ que permite la recuperación de un soluto de una solución a través de su mezcla con un disolvente.^{85,86}

La técnica de extracción con disolventes tiene varios usos, por ejemplo, se utiliza para eliminar impurezas formadas durante una reacción química, quitando excesos de reactivos o incluso para extraer compuestos orgánicos que se encuentran en fuentes naturales. Generalmente es un procedimiento muy utilizado para separar compuestos disueltos en fases acuosas⁸³, aunque también se usa en otros procesos como la desulfuración de productos petrolíferos.

El procedimiento de extracción se realiza de forma mecánica y consiste básicamente en tres pasos, en la *figura 19* se esquematiza el proceso. En el *Paso 1* se mezcla el disolvente con la solución a procesar. En el *Paso 2* se agita la mezcla obtenida y se deja en reposo hasta que las dos fases líquidas inmiscibles se separen espontáneamente por decantación, debido a la diferencia de densidades y a las fuerzas de gravedad.^{83,84,86} Por último, en el *Paso 3* se recupera el disolvente que se utilizó durante el proceso.⁸⁴

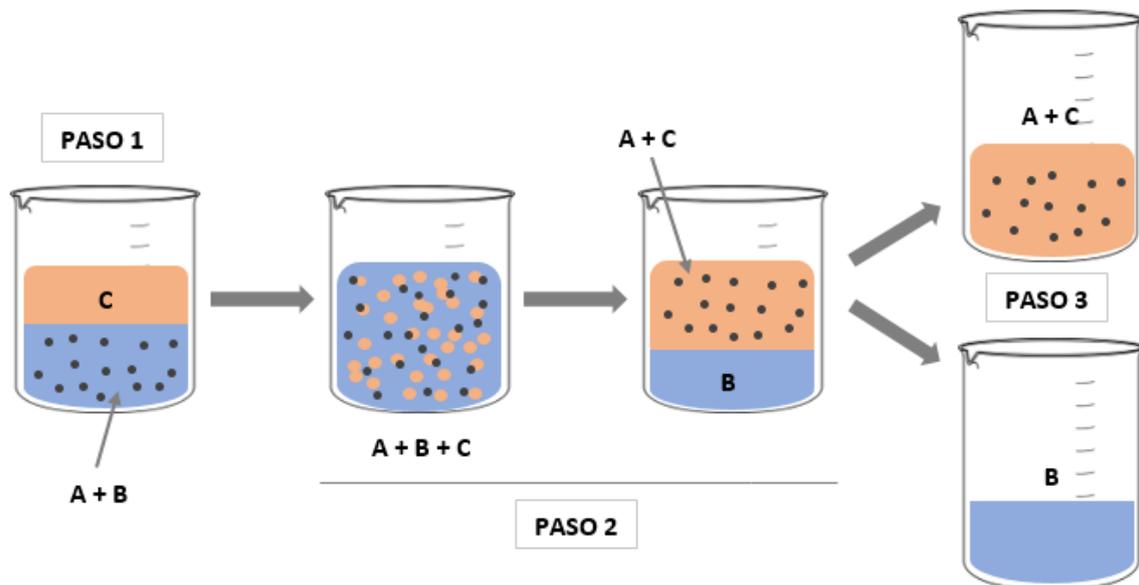


Figura 19 Extracción líquido-líquido.

Extracción con disolvente. Mezcla de partida o refinado (A + B). Disolvente (C). Solute (A). Fase extracto (A + C). Líquido portador o diluyente (B).

En la Ingeniería Química, la solución procesada en la extracción es el refinado y la fase rica en disolvente es el extracto. Mientras que el componente que se trasfiere desde el refinado al extracto se denomina soluto, y el componente que se queda en el refinado recibe el nombre de diluyente.^{82,84}

La manera en cómo se realiza la extracción líquido-líquido depende de la forma en la que interactúa el soluto con el disolvente.⁸⁴ El disolvente debe ser insoluble o poco soluble en la solución que se va a procesar, puede ser un compuesto puro o una mezcla. Por su parte, el soluto que se va a extraer debe tener una elevada afinidad por el disolvente de extracción, que es lo que permite que la separación se lleve a cabo.⁸⁶

Como disolvente se puede ocupar agua o compuestos orgánicos como xileno, tolueno, benceno, hexano, ciclohexano, cloroformo, acetona, metanol, etanol y otros más.^{67,69} Sin embargo, para mejorar la eficiencia de las extracciones líquido-líquido en procesos químicos y para evitar daños ambientales, la química verde ha optado por usar disolventes ecológicos, como por ejemplo líquidos iónicos y disolventes eutécticos.^{22,87}

4.2. Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos (LI) son un grupo de sales orgánicas que están compuestas por iones (muy asimétricos y de gran tamaño)^{24,25} y que existen en estado líquido a temperatura ambiente.^{15,21,88}

Los líquidos iónicos no son sales fundidas, pues existe un amplio intervalo de temperaturas en el que estos compuestos son líquidos en comparación con las sales tradicionales.⁷⁶ Las sales fundidas son líquidos formados por iones, pero por su elevada temperatura de fusión y su alta viscosidad no se consideran como líquidos iónicos. Además, las sales fundidas no pueden ser utilizadas como fase líquida para desarrollar reacciones químicas, algo que con los líquidos iónicos sí es posible.²⁴

Los líquidos iónicos se pueden visualizar como redes tridimensionales de cationes y aniones enlazados por medio de interacciones intermoleculares, tales como enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals.^{21,25} Las fuerzas intermoleculares o fuerzas electrostáticas son las encargadas de que los iones de un líquido iónico se atraigan entre sí.

Las fuerzas de Van der Waals son atracciones débiles que mantienen la unión entre los iones de un líquido iónico. Dentro de este tipo de interacciones están las fuerzas de dispersión de London o también fuerzas dipolo instantáneo-dipolo inducido.

Las fuerzas dispersivas son aquellas que suceden entre cualquier tipo de moléculas o iones que se encuentran próximos entre sí. Estas interacciones se consideran como las fuerzas de atracción más débiles.⁸⁹ La razón por la que las fuerzas de dispersión son muy débiles se debe a que los dipolos encargados de la atracción son cortos, es decir, mientras unos dipolos desaparecen otros aparecen. Debido a ello es que las moléculas o iones logran permanecer unidos.

En comparación con las sales fundidas, los líquidos iónicos tienen fuerzas de atracción catión-anión más débiles, esto debido a que los iones de los líquidos iónicos son demasiado simétricos y de tamaño grande.²⁵

4.2.1. Iones

Generalmente los líquidos iónicos están formados por un catión orgánico (ion con carga eléctrica positiva) que se encuentra unido a un anión orgánico o inorgánico (ion con carga eléctrica negativa).^{15,80}

Muchos de los cationes que se utilizan para sintetizar líquidos iónicos son voluminosos y tienen naturaleza aromática, aunque no necesariamente deben ser así. Estos iones contienen regularmente átomos de nitrógeno sustituidos de manera asimétrica; el amonio cuaternario, imidazolio y piridinio son algunos ejemplos de cationes (figura 20).^{15,24,25} Además, los cationes tienen interacciones intermoleculares débiles y bajas densidades de carga.²¹

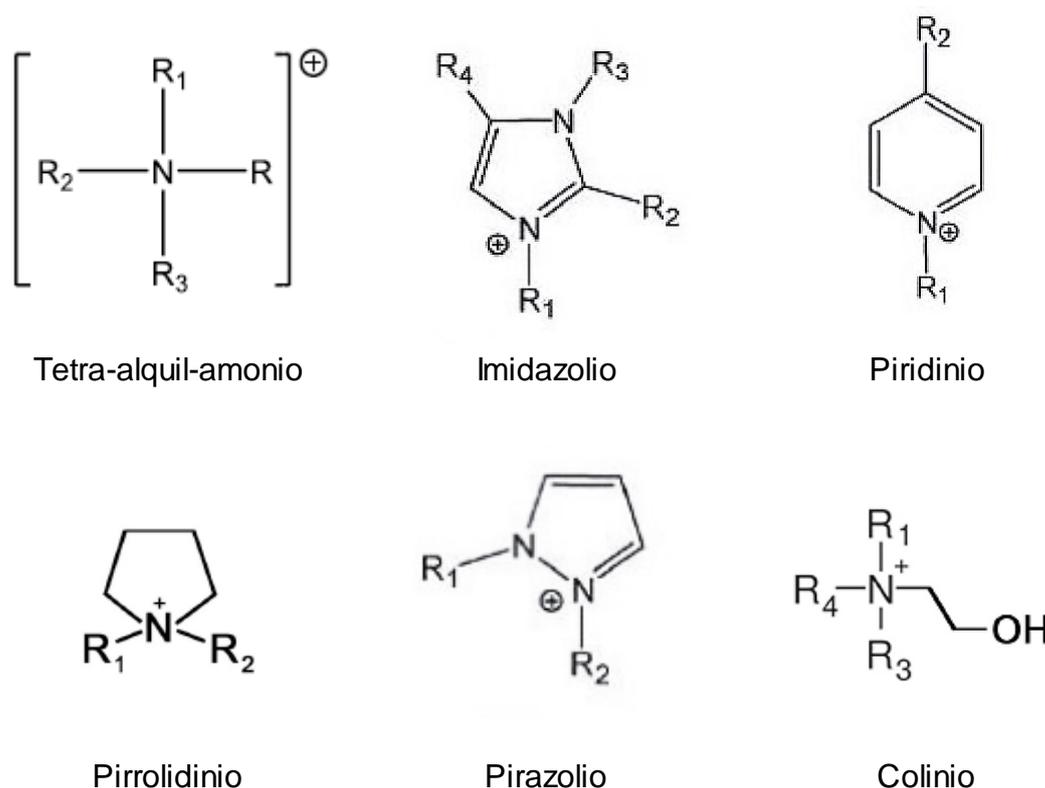


Figura 20 Cationes utilizados para la formación de líquidos iónicos.

Los aniones que se emplean suelen estar constituidos por diferentes elementos químicos (figura 21).²⁴ Tienen una carga negativa que es difusa y una coordinación débil.^{15,27} Estos compuestos se pueden clasificar de dos maneras: los que generan aniones polinucleares durante el proceso de síntesis y los que están presentes como aniones de una sola especie iónica (mononucleares) en el líquido iónico.²¹

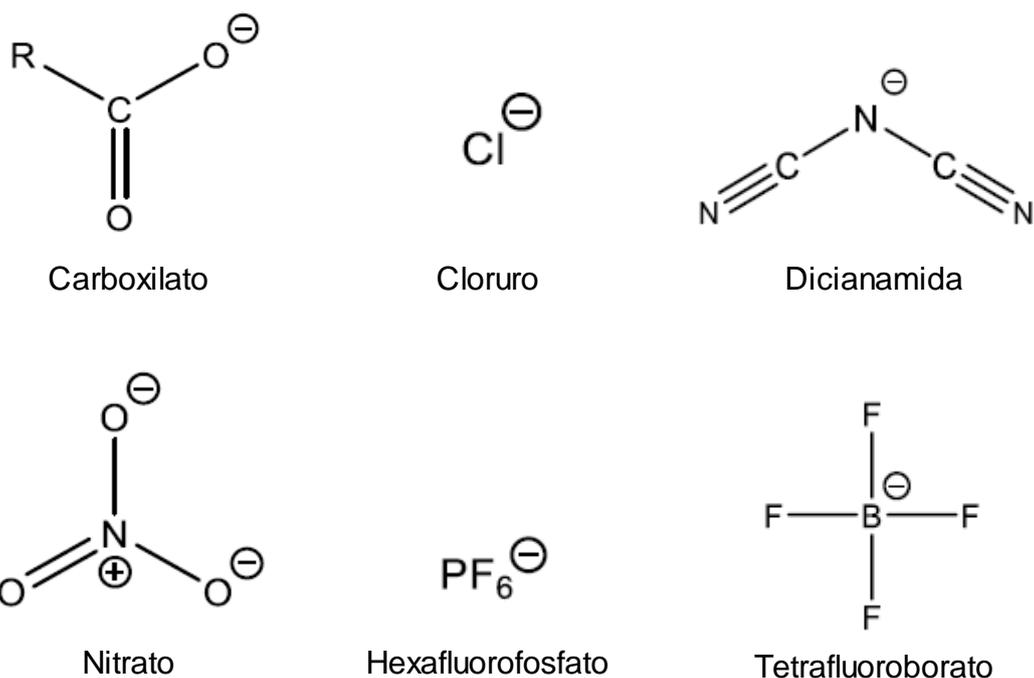


Figura 21 Aniones utilizados para la formación de líquidos iónicos.

La mayoría de las propiedades de los líquidos iónicos son el resultado de la naturaleza y forma de los aniones y cationes que integran el compuesto, y de las interacciones que se presentan entre ellos.²¹ Por esta razón las propiedades de los líquidos iónicos se pueden controlar al elegir la combinación anión-catión, es decir, los líquidos iónicos se pueden diseñar.

Además, al variar el anión y el catión con el grupo funcional apropiado se crea una amplia gama de líquidos iónicos con diferente hidrofobicidad, polaridad y viscosidad, entre otras propiedades.¹⁵

4.2.2. Síntesis de líquidos iónicos

Conforme el estudio de los líquidos iónicos se va desarrollando, los métodos de síntesis se vuelven más sofisticados. Actualmente existen varios métodos de preparación de líquidos iónicos, la mayoría de ellos suelen ser poco laboriosos. La protonación de materiales iniciadores es el método más sencillo para la síntesis de estos compuestos.¹⁵

Generalmente, la síntesis de líquidos iónicos se divide en dos etapas, la formación del catión deseado y el intercambio de aniones. En ciertos casos, sólo

se lleva a cabo el primer paso, en otros, el catión ya está disponible y únicamente se requiere el intercambio de aniones.^{15,21}

En los casos en donde se requiere de la formación del catión, ésta se puede realizar mediante una protonación con un ácido libre o por medio de la reacción de cuaternización de una amina, fosfina o un sulfuro, usando un dialquilsulfato.^{15,21}

En el intercambio de aniones las técnicas que más se aplican son la metátesis del anión, la síntesis libre de halógeno y la síntesis para líquidos iónicos próticos.^{15,21}

Pese a la existencia de diferentes métodos de síntesis de líquidos iónicos, ninguno tiene la capacidad de formar compuestos totalmente libres de impurezas, las cuales al estar presentes pueden alterar el comportamiento de dichos compuestos y por tanto disminuir la selectividad de los mismos.¹⁵

4.2.3. Tipos de líquidos iónicos

Debido a la gran cantidad de líquidos iónicos que se pueden desarrollar, y a la facilidad con la que se pueden sintetizar, no existe una clasificación oficial de líquidos iónicos. Sin embargo, se pueden dividir en tres categorías: los líquidos iónicos apróticos, los líquidos iónicos próticos y líquidos iónicos con tarea específica.²⁵

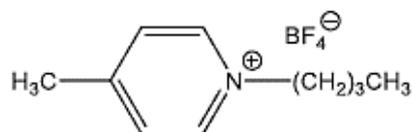
- Líquidos iónicos apróticos

Los líquidos iónicos apróticos (AIL) fueron los primeros en ser investigados y desarrollados. Los líquidos apróticos son considerado como disolventes convencionales dado que la mayoría y en particular los hidrofóbicos son tóxicos para el medio ambiente y poco biodegradables.

Para sintetizar este tipo de líquidos se requiere la alquilación de una amina terciaria por un haluro de alquilo y un cambio del anión haluro con el anión correspondiente para obtener el producto deseado. Generalmente los procesos de obtención de AIL son costosos.^{15,25}

Los líquidos iónicos apróticos más comunes son con base en cationes como imidazolio, piridinio y fosfonio. Los aniones que más se usan son halógenos, hexafluorofosfatos y tetrafluoroboratos. En la *figura 22* se muestran algunos líquidos iónicos apróticos.

Tetrafluoroborato de 1-butil-4-metilpiridinio



Cloruro de 1-etil-3-metilimidazolio

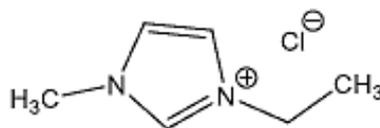


Figura 22 Ejemplos de líquidos iónicos apróticos.

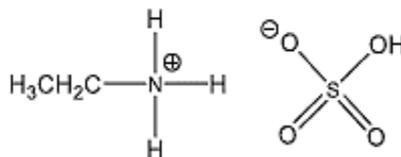
- Líquidos iónicos próticos

El desarrollo de los líquidos iónicos próticos (PIL) surge como consecuencia de la elevada toxicidad que presentan los líquidos iónicos apróticos. La mayoría de los estudios sobre líquidos iónicos se ha enfocado en analizar el comportamiento de los líquidos iónico próticos, o también llamados líquidos iónicos de Brönsted. En la *figura 23* se muestran algunos ejemplos de este tipo de líquidos.

En comparación con los líquidos iónicos apróticos, los líquidos iónicos próticos son compuestos menos tóxicos, más biodegradables y mucho más económicos de producir. Además, presentan una síntesis química más sencilla.

La síntesis de líquidos iónicos próticos se lleva a cabo a través de una reacción de neutralización ácido-base, es decir, por una transferencia de protones entre un ácido y base Brönsted.^{15,25} La síntesis también se puede desarrollar sin el uso de un disolvente adicional para simplificar el proceso.

Bisulfato de etilamonio



Oleato de trioctilamonio

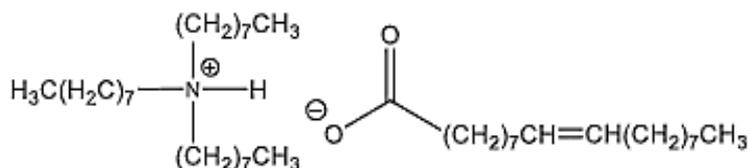


Figura 23 Ejemplos de líquidos iónicos próticos.

- Líquidos iónicos con tarea específica

Los líquidos iónicos con tarea específica (TILs)²⁵ o Task Specific Ionic Liquid” (TSIL)⁷⁶ son los líquidos iónicos que incluyen uno o varios grupos funcionales. Cuando en los líquidos iónicos hay varios grupos funcionales activos en la estructura, se denominan líquidos iónicos bifuncionales, y pueden desarrollar diferentes papeles durante el proceso.²⁵ En este caso los TILs dejan de ser un medio inactivo para participar activamente en las reacciones químicas en las que se emplean.⁷⁶

Los grupos funcionales pueden estar presentes tanto en la parte catiónica como en la parte aniónica del líquido, o en ambas. El hecho de adicionar un grupo funcional permite que los líquidos iónicos actúen como medios de reacción, reactivos o catalizadores en ciertos procesos.^{25,76}

Para producir líquidos iónicos con tareas específicas se utilizan cationes y aniones funcionalizados. La funcionalidad permite que las sales sintetizadas sigan actuando como medios de reacción y a su vez como reactivos o catalizadores en algunos procesos.⁷⁶ Los cationes funcionalizados, en comparación con los aniones funcionalizados, se han ocupado con mayor frecuencia para desarrollar líquidos iónicos con tarea específica, debido a que son más abundantes.²⁵

Para llevar a cabo la síntesis de TILs se requieren de tres pasos. En el primer paso se selecciona el centro catiónico del líquido iónico. El segundo paso involucra la búsqueda de la fuente del grupo o los grupos funcionales que se desean introducir. El último paso consiste en la elección del anión, quien es el que determina en gran medida la relación del líquido iónico con las moléculas del disolvente en el caso de que exista la formación de sistemas de dos fases.⁷⁶

4.2.4. Propiedades físicas y químicas de los LI

Como ya se mencionó anteriormente las propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos son el resultado de la naturaleza y forma de los aniones y cationes utilizados en la síntesis de estos compuestos.²⁶

El principal responsable del comportamiento químico de los líquidos iónicos es el catión. El anión es quien interviene más en las propiedades físicas.²⁴

Las propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos, en comparación con las de los disolventes convencionales, son únicas. Algunas de esas propiedades se enlistan a continuación:^{20,21,24-26}

- Baja presión de vapor (casi nula) a condiciones ambientales

- Bajos puntos de fusión (generalmente menores a 100°C)
- Elevada estabilidad tanto química como térmica
- Excelente capacidad de disolver solutos polares y no polares
- Alta viscosidad
- Elevada densidad
- Alta polaridad
- Alta conductividad
- Ausencia de inflamabilidad
- Comportamiento de disolvente miscible
- Baja o nula volatilidad
- Baja toxicidad

Físicamente, los líquidos iónicos en estado puro son en su mayoría incoloros. Cuando presentan algunas tonalidades puede que éstas sean el resultado de la presencia de impurezas en el líquido.²⁵

Una de las propiedades clave de los líquidos iónicos es la presión de vapor, que, al tratar de ser medida por métodos convencionales, resulta ser casi nula. Por lo que se les considera como disolventes no volátiles. Esta propiedad de alguna manera señala que estos disolventes no tienen un punto de ebullición definido.^{21,25}

Otra propiedad significativa de los líquidos iónicos es el punto de fusión que se encuentra por debajo de 100°C.⁷⁶ Esta propiedad establece el límite inferior del rango de temperatura en el que pueden ocuparse los líquidos iónicos como disolventes.²⁴ Los bajos puntos de fusión se deben en gran parte al tamaño del líquido iónico, a la distribución de carga en los cationes y a las interacciones intermoleculares débiles.^{21,25}

La viscosidad es una propiedad que perturba la difusión de los solutos. Las impurezas presentes en los líquidos iónicos afectan a la viscosidad. Esta propiedad está determinada por su tendencia a formar puentes de hidrógeno y por la resistencia de sus interacciones de Van der Waals. En general, los líquidos iónicos son mucho más viscosos que los disolventes convencionales.^{24,25}

La densidad de los líquidos iónicos es la propiedad física más reportada y, en general, estos compuestos son más densos que el agua; los valores medidos hasta ahora varían entre 1.12 g/cm³ y 2.24 g/cm³.²⁵ Es una propiedad poco sensible ante la variación de temperaturas. Para disminuirla se requiere que el volumen de los cationes aumente. Igualmente, al hacer pequeños cambios estructurales en el catión se realiza un ajuste en la densidad.^{21,24}

Los líquidos iónicos son considerados como disolventes polares. La polaridad varía dependiendo del líquido, pero está entre la del agua y la de los disolventes orgánicos clorados.²⁵ En general, este tipo de disolventes tienen una gran capacidad para disolver solutos polares y no polares, lo que permite que puedan ser acoplados para variadas aplicaciones. Este punto es clave para que estos disolventes sean considerados como una alternativa a los disolventes orgánicos.¹⁵

La conductividad eléctrica de los líquidos iónicos es baja a temperatura ambiente, pero aumenta con variaciones de temperatura. Esta propiedad está relacionada con la viscosidad, pues a mayor viscosidad menor conductividad eléctrica.²⁵

Cabe resaltar que las propiedades de los líquidos iónicos que se han definido hasta el momento son mínimas, ya que estos se encuentran aún en constante estudio y, por tanto, falta mucho por conocer sobre ellos.

4.2.5. Ventajas y desventajas de los LI

Los líquidos iónicos presentan ciertas ventajas y desventajas (*tabla 2*) que permiten identificarlos como disolventes verdes. También se puede analizar la efectividad de este tipo de disolventes para su aplicación en procesos químicos. Además, se puede hacer una comparación entre los líquidos iónicos y los disolventes orgánicos, para mostrar que el uso de los disolventes verdes es una mejor opción.^{15,21,24}

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presentan una presión de vapor baja. ✓ Son compuestos no volátiles. ✓ No son inflamables. ✓ Dependiendo de su estructura tienen baja toxicidad y son amigables con el ambiente. ✓ Son “disolventes de diseño”, se elaboran de acuerdo a las necesidades del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Poca información sobre sus propiedades está disponible. ✗ Algunos LI tienen impurezas, lo que altera su comportamiento, afecta su rendimiento y disminuye la selectividad. ✗ La síntesis de LI no produce productos totalmente puros. ✗ Los procesos de producción suelen ser más costosos. ✗ Tienen alta viscosidad.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de los líquidos iónicos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Son buenos medios de reacción por su elevada estabilidad térmica y química. ✓ Son excelentes disolventes en los procesos extracción. Son capaces de disolver solutos polares y no polares. ✓ Disuelven compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, complejos organometálicos e incluso materiales poliméricos.²⁴ ✓ Tienen buenas propiedades electroquímicas. ✓ Son reutilizables y fáciles de manipular. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Existen ciertos LI que son considerados como tóxicos cuando se incorporan a un medio acuoso.²⁷ ✗ Algunos LI suelen ser peligrosos ya que son reactivos y corrosivos.²⁴ ✗ Ciertos tipos de LI tienen baja biodegradabilidad.²⁰ ✗ El medio más probable por el cual se liberan los LI al ambiente es por la solubilidad significativa que estos tienen en agua.²⁷ ✗ La alta estabilidad y no volatilidad de los LI sugieren problemas de degradación.²⁷

Tabla 2 (Continuación) Ventajas y desventajas de los líquidos iónicos.

Las propiedades únicas de los líquidos iónicos representan una ventaja significativa sobre las propiedades de otros disolventes al ser aplicadas en diferentes procesos.

La baja presión de vapor, junto con el gran intervalo de temperaturas de los líquidos iónicos, representa una enorme ventaja para que estos disolventes sustituyan el uso de disolventes orgánicos y permitan desarrollar una química más limpia y sostenible.²⁴

El hecho de que los líquidos iónicos sean “disolventes de diseño” figura una gran ventaja, dado que al modificar los iones las propiedades físicas y químicas de los líquidos iónicos cambian. Por esta razón es que hay una enorme variedad de líquidos iónicos que se pueden usar para aplicaciones específicas.²⁴

Dentro de las desventajas más importantes de los líquidos iónicos está la toxicidad que los disolventes pueden tener. Para analizar la toxicidad de los LI se han realizado varios estudios, los cuales indican que varios LI pueden ser irritantes, muy tóxicos y poco biodegradables, aunque la ventaja es que no son volátiles.²⁵

4.2.6. Aplicaciones de los LI

Actualmente los líquidos iónicos tienen múltiples aplicaciones en diversas áreas científicas y tecnológicas. Su uso más común es como disolventes en procesos de extracción y separación.^{22,90} En extracciones de metales los líquidos iónicos tienen buen potencial para la purificación de fases acuosas contaminadas con metales pesados y/o tóxicos.^{15,43,88,91} No obstante, a nivel industrial, el uso de líquidos iónicos no es muy amplio, esto pese a que en los últimos años el estudio sobre ellos ha crecido.²⁷

En la industria alimenticia se ha impulsado el uso de líquidos iónicos, sin embargo, el manejo de estos disolventes para análisis de alimentos es insuficiente. El objetivo de los estudios que se han realizado es desarrollar técnicas de preparación de nuevos líquidos iónicos que permitan conseguir una mayor selectividad y eficiencia al ser usados en el área de alimentos. Hasta la fecha, se han reportado avances del empleo de estos líquidos para la determinación de metales y separación de contaminantes, compuestos tóxicos, toxinas y metabolitos secundarios en alimentos.¹⁵

En catálisis homogénea los líquidos iónicos han sido trabajados como disolventes, catalizadores y co-catalizadores; estos líquidos son de gran importancia en el estudio de reacciones catalizadas por metales de transición. Han sido aplicados también en procesos como hidrogenación, hidroformilación, oxidación y dimerización, en donde su uso ha dado mejoras en la conversión, selectividad, velocidades de reacción y reutilización del catalizador.²¹

En la industria del petróleo, el estudio y uso de líquidos iónicos es muy importante para el mejoramiento de la calidad de los crudos pesados. A nivel laboratorio se ha analizado el empleo de estos disolventes en distintas áreas como la de exploración, explotación y refinación.²¹

En investigaciones científicas los líquidos iónicos se han ocupado en diferentes áreas como bioquímica, catálisis, fisicoquímica y química analítica, orgánica e inorgánica. Igualmente se manejan en cromatografía líquido-gas y en electroquímica.²² Estos disolventes se usan en procesos de purificación y separación a través de membranas. También se emplean como disolventes en reacciones nucleofílicas, electrofílicas, químicas y bioquímicas, además de que son excelentes medios de reacción en biosíntesis.⁸⁸

4.3. Disolventes eutécticos

Los disolventes eutécticos o disolventes eutécticos profundos²³, mejor conocidos como DES, por sus siglas en inglés "*Deep Eutectic Solvents*", son una gran

alternativa para el cuidado del medio ambiente debido a que su obtención y uso es más sostenible que en el caso de los líquidos iónicos.^{19,31}

Un disolvente eutéctico es una mezcla eutéctica de bajo punto de fusión¹⁹ formada por dos o más componentes (en su mayoría sólidos) que dan como resultado una composición líquida estable a temperaturas relativamente bajas como la ambiental.^{31,80} Las propiedades de los disolventes eutécticos son en su mayoría comparables con las de los líquidos iónicos, en la *sección 3.3.3* de este capítulo se analizarán con más detalle estas propiedades.

Las mezclas eutécticas pueden estar formadas tanto por iones como por moléculas neutras, pero en general están integradas por compuestos moleculares.^{80,92} Normalmente se obtienen a través de la complejación de una sal de amonio cuaternario con una sal metálica.^{20,23,28,33}

4.3.1. Punto eutéctico

Al combinarse los componentes de una mezcla eutéctica se genera una sola fase con un punto de fusión menor al que tienen los componentes por separado, esto se conoce como punto eutéctico.^{19,23,31,32,92} El punto eutéctico es la temperatura más baja en la que puede fundirse una mezcla binaria de sólidos que tienen una composición fija.

Normalmente una mezcla eutéctica es un sistema binario eutéctico, es decir, es un sistema en el que la adición de un componente a otro provoca una disminución del punto de fusión.

Para un sistema binario eutéctico se tiene un diagrama de fases en el que se pueden observar tres regiones bifásicas (*figura 24*). Y de acuerdo con la regla de las fases de Gibbs, para un sistema de este tipo se tiene un equilibrio univariante en el que se puede utilizar sólo un grado de libertad.⁹³

En este caso se utiliza un sólo grado de libertad (F), el cual se ha ejercido al considerar la presión constante e igual a la atmosférica. En el punto eutéctico coexisten en equilibrio las tres fases (P), lo cual está definido por una temperatura y una composición determinada. Al ser una mezcla binaria está formada por dos componentes (C), por lo tanto, la aplicación de la regla de las fases en el punto eutéctico queda como:

$$P + F = 2 + C$$

$$3 + 1 = 2 + 2$$

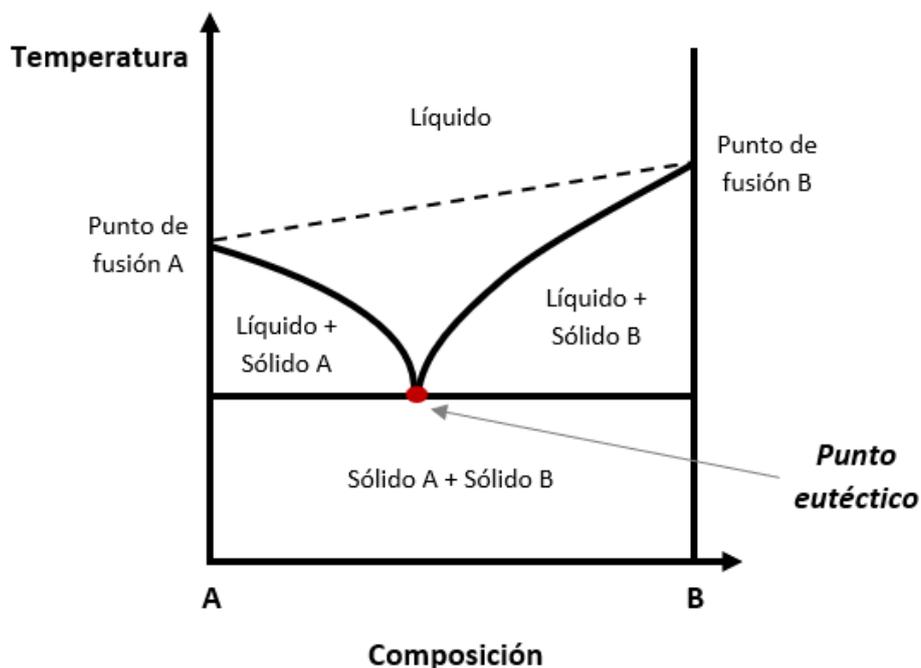


Figura 24 Diagrama de fases para una mezcla eutéctica binaria.

En algunas mezclas eutécticas no es posible obtener un punto eutéctico, en estos casos se presenta una zona muy parecida a la zona de transición vítrea; a éstas se les conoce como mezclas de bajo punto de transición o de bajo punto de fusión.¹⁹

La transición vítrea es el paso de un estado amorfo desordenado a un estado vítreo menos estable y se produce a una temperatura que es específica de cada componente; esta transición sucede en un rango de temperaturas.⁹⁴ La formación de estructuras amorfas o vítreas se origina cuando un sólido cristalino se calienta hasta fundirse y después se enfría muy rápido, de tal modo que los átomos no consiguen reorganizarse y ocupar su lugar.

4.3.2. Formación de los disolventes eutécticos

Los disolventes eutécticos pueden ser mezclas binarias o terciarias, sin embargo, las mezclas de dos componentes son las más comunes.⁹²

La síntesis de un disolvente eutéctico se realiza mediante la mezcla de dos componentes: el aceptor de enlaces hidrógeno (HBA) y el donador de enlaces hidrógeno (HBD), que interactúan mediante puentes de hidrógeno.^{20,26,29,32,92,95} Como ejemplo de aceptores de enlaces hidrógeno se tienen las sales de amonio cuaternario, tetralquilamonio o fosfonio.³² Los ácidos carboxílicos, alcoholes,

aminas, carbohidratos y glicerol son ejemplos de donadores de enlaces hidrógeno.^{28,32}

Estos disolventes de bajo punto de fusión casi siempre se obtienen de sólidos con elevado punto de fusión, que deben ser capaces de formar mezclas eutécticas, las cuales se encuentran en estado líquido.^{29,31,33} Cuando el disolvente está formado por componentes de origen natural (como plantas) se conoce como "*Disolvente Eutéctico Natural Profundo*" (NADES por sus siglas en inglés *Natural Deep Eutectic Solvent*).^{28,29,32,79}

Para desarrollar disolventes eutécticos que sean estables en agua es necesario que tanto el donador como el aceptor de enlaces hidrógeno sean hidrofóbicos, es decir, que sean insolubles en agua.^{32,33} Si uno de los componentes tiene carácter hidrofílico y otro hidrofóbico, el disolvente eutéctico resultante no será estable en agua.³² Algunos disolventes eutécticos hidrofóbicos se elaboran a partir de mezclas de DL-mentol con ácidos orgánicos, sales de amonio cuaternario con ácido decanoico y lidocaína con ácido decanoico en diferentes proporciones.³³

Los disolventes eutécticos generalmente se obtienen mediante el calentamiento (a 80°C o aproximado)²⁹ de dos o más compuesto sólidos inmiscibles en una proporción determinada.^{23,28} Los compuestos empleados sufren un cambio de fase sólido-líquido en el punto eutéctico y se comportan como si fuesen un líquido puro. La síntesis de las mezclas eutécticas no genera ningún subproducto y no requiere de ninguna etapa de purificación, lo cual representa una gran ventaja.^{19,26,29,32}

- Aceptores y donadores de enlaces hidrógeno

La adición del donador de enlaces hidrogeno a la sal (aceptor de enlaces hidrogeno) provoca que se formen enlaces de hidrógeno entre los dos componentes de la mezcla. De esta forma, la carga del anión de la sal se deslocaliza, reduciendo tanto la fuerza del enlace iónico entre el catión y el anión de la sal, como la energía de la estructura cristalina hasta distorsionarla por completo.^{19,23}

El cambio que sufre la red cristalina provoca una disminución en el punto de fusión de la mezcla (*figura 25*). Conforme las interacciones entre los componentes son más fuertes, mayor será la disminución del punto de fusión de la mezcla con respecto a los puntos de fusión de los componentes por separado.^{19,23}

La nueva estructura cristalina que se obtiene está conformada por una extensa red de enlaces hidrogeno entre los componentes en donde hay algunos agujeros, por lo que se encuentra menos ordenada, y además su densidad disminuye.¹⁹

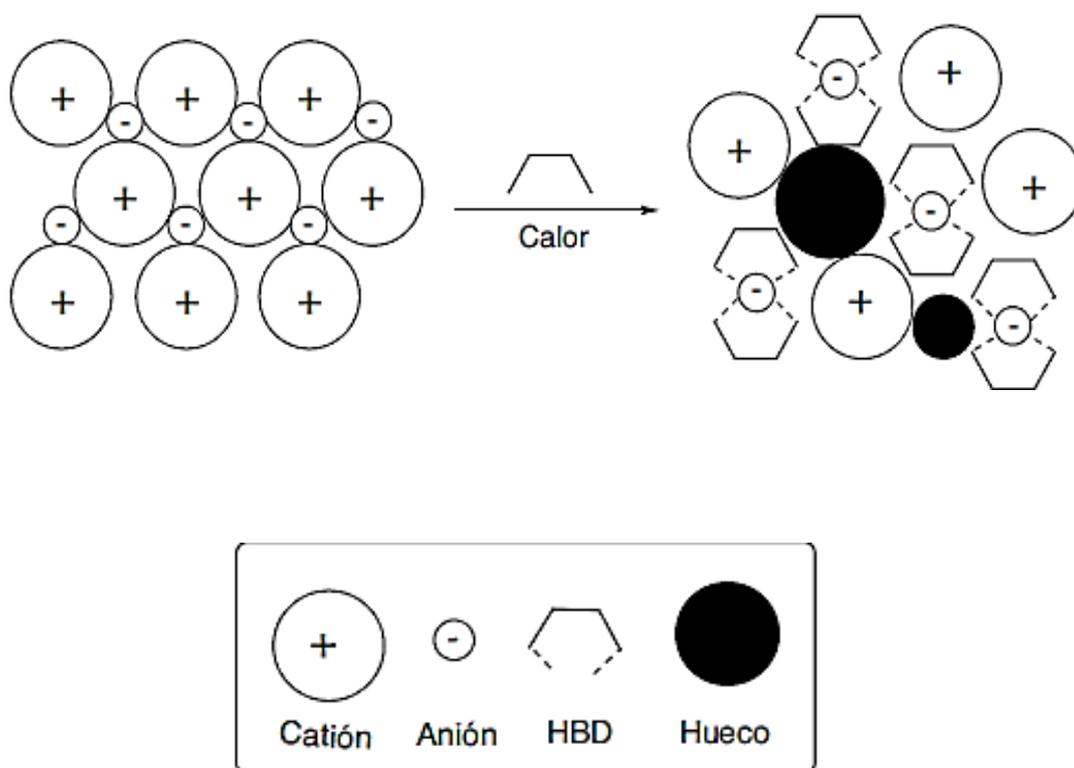


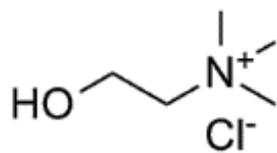
Figura 25 Estructura general para una mezcla eutéctica.¹⁹

La fuerza de los enlaces de hidrogeno se relaciona directamente con la estabilidad y las propiedades como disolvente de las mezclas eutécticas.²⁰

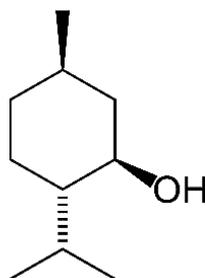
- Ejemplos de Aceptores y donadores de enlaces hidrógeno

A continuación, en la *figura 26* y *27*, se muestran algunos ejemplos de aceptores de enlaces hidrógeno (HBA)^{20,28,29,33} y donadores de enlaces hidrógeno (HBD)^{20,28,33} que se pueden combinar para formar disolventes eutécticos.¹⁹

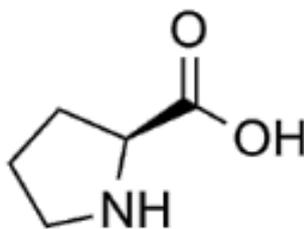
Cloruro de colina⁷⁹



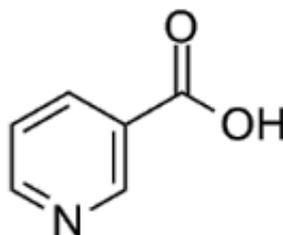
DL-Mentol⁹⁶



Prolina



Ácido nicotínico



Lidocaína

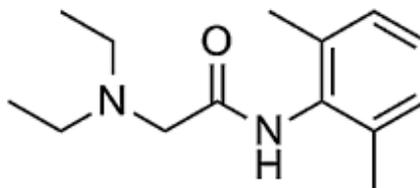


Figura 26 Aceptores de enlaces hidrogeno para síntesis de DES.

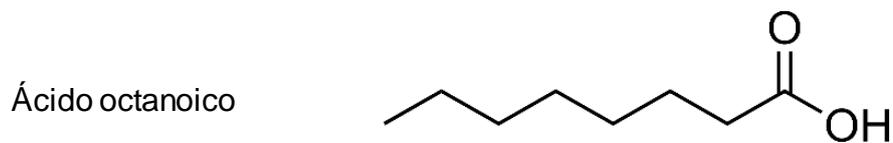
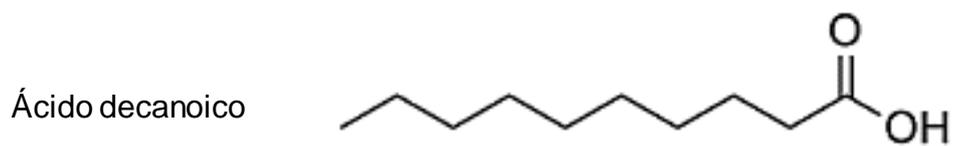


Figura 27 Donadores de enlaces hidrogeno para síntesis de DES.

4.3.3. Propiedades de los disolventes eutécticos

Muchas de las propiedades de los disolventes eutécticos son muy similares a las propiedades de los líquidos iónicos, debido a ello es que los DES pueden ser una alternativa al uso de los LI.

Las propiedades dependen de los compuestos que forman un disolvente eutéctico. Éstas no siempre son iguales a las propiedades individuales de los componentes que integran un DES. Debido a ello es que las propiedades deben ser estudiadas específicamente para cada mezcla eutéctica.³²

Las propiedades físicas de los disolventes eutécticos pueden adaptarse fácilmente para aplicaciones específicas, las cuales dependen del aceptor de enlaces hidrógeno y del donante de enlaces de hidrógeno que se elijan.²³

Por su parte, las propiedades fisicoquímicas de estos disolventes pueden ajustarse a través de la selección de los componentes con base en la relación molar^{23,95}, naturaleza, estructura molecular y contenido de agua.³⁰ Al modificar uno o ambos componentes que integran un disolvente eutéctico, se genera una gran variedad de mezclas eutécticas con diferentes propiedades químicas.^{29,30}

Algunas de las propiedades, tanto físicas como químicas, de los disolventes eutécticos se muestran en seguida:^{23,28,29,92,97}

- Bajos puntos de fusión (son líquidos incluso por debajo de 20°C)
- Baja o nula presión de vapor
- Baja volatilidad
- Poco inflamables
- Baja o nula toxicidad
- Solubles en agua
- Elevada densidad
- Alta viscosidad

Al presente, la información detallada sobre las propiedades físicas y químicas de los disolventes eutécticos es escasa, principalmente la de los DES hidrófobos.^{20,32} Dentro de lo poco que se ha estudiado se conoce información minuciosa sobre propiedades como la densidad, viscosidad y conductividad.

La densidad de los DES hidrofílicos tiene valores más altos que el agua, van desde 1.041 g/cm³ a 1.63 g/cm³. Mientras que la densidad de los DES hidrofóbicos es menor a la del agua.^{29,32,92,96} Algunos estudios demuestran que la densidad de algunos disolventes eutécticos hidrófobos disminuye linealmente a medida que la temperatura aumenta.³²

La viscosidad de la mayoría de los disolventes eutécticos, tanto hidrofílicos como hidrofóbicos, es relativamente alta a temperatura ambiente, generalmente mayor a 100 cP.^{17,18} La viscosidad depende de la naturaleza química de los componentes, del contenido de agua, de las interacciones electrostáticas y de la temperatura.⁹² En ciertos análisis se ha observado que conforme aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye exponencialmente. De igual forma, mientras más larga sea la cadena del ácido que integra al disolvente eutéctico, la viscosidad será mayor.^{32,92}

Debido a la elevada viscosidad, la conductividad iónica de las mezclas eutécticas es baja. Esta propiedad incrementa significativamente a medida que aumenta la temperatura debido a una disminución de la viscosidad.^{29,92}

Cuando los disolventes eutécticos son elaborados a partir de materias primas renovables como ácidos carboxílicos, aminas y azúcares, se sabe que presentan poca o nula toxicidad y además son biodegradables.¹⁹ No obstante, la toxicidad debe ser estudiada para cada mezcla en específico, dado que no depende totalmente de la toxicidad de los componentes utilizados en la síntesis.³²

4.3.4. Tipos de disolventes eutécticos

Dependiendo de la naturaleza de los componentes, de las composiciones y propiedades, los disolventes eutécticos se clasifican en cuatro tipos.¹⁹

El primer tipo contiene una sal de amonio cuaternario y un haluro metálico o sales de imidazolio. Suelen ser compuestos tóxicos y muy caros debido a que para su elaboración se ocupan haluros metálicos anhidros. En general, son disolventes poco ecológicos por lo que en comparación con otros DES, estos no se utilizan tanto.^{19,23,28,80}

El segundo tipo de disolventes eutécticos es muy similar al tipo I, la diferencia es que estos contienen en su estructura haluros metálicos hidratados o cloruro de colina. En comparación con los disolventes eutécticos tipo I, los del tipo II tienen costos relativamente bajos, además de que se genera una gran variedad de mezclas eutécticas a temperaturas bajas.^{19,23,28}

Las mezclas eutécticas del tercer tipo han sido los más estudiados dado que tienen un gran potencial como disolventes sostenibles, muchos son biodegradables, tienen costos bajos y además son las más fáciles de elaborar. Generalmente se forman a partir de compuestos aceptores de enlaces hidrogeno (comúnmente sales con un alto punto de fusión como el cloruro de colina y sales de amonio cuaternaria) que interactúan con compuestos donadores de enlaces de hidrógeno. Hasta la fecha se han analizado diversas mezclas eutécticas

sintetizadas con una gran variedad de donantes de enlaces hidrogeno utilizando amidas, ácidos carboxílicos y alcoholes.^{19,23,28}

Por último, los disolventes eutécticos del cuarto tipo se obtienen al mezclar un haluro metálico con un ácido de Lewis o de Brönsted, es decir, con donante de enlaces hidrogeno.^{19,23,28}

4.3.5. Ventajas y desventajas de los DES

Las mezclas eutécticas son alternativa que la química verde ha dado ante los problemas ambientales que se generan por el uso excesivo de disolventes orgánicos. Los DES son una excelente opción para ser utilizados como disolventes en varios procesos, estos muestran ciertas cualidades que los hacen más atractivos ante otros disolventes como los disolventes convencionales y los líquidos iónicos. Algunas de las ventajas y desventajas que tienen los DES se muestran a continuación en la *tabla 3*.^{19,28,29,31}

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Su presión de vapores despreciable. ✓ Son poco inflamables. ✓ Se pueden sintetizar a partir de fuentes naturales. ✓ Dependiendo de los componentes la toxicidad puede ser baja o nula, pueden ser biodegradables y la síntesis puede ser fácil y económica. ✓ Se elaboran con base en las necesidades del proceso. ✓ Pueden ser disolventes hidrofóbicos o hidrofílicos.³³ Los DES hidrofílicos son muy solubles en agua. ✓ Al sintetizarse no generan ningún tipo de subproducto y no requieren de una etapa de purificación. ✓ Disuelven compuestos orgánicos e inorgánicos y son una buena opción para realizar reacciones químicas. ✓ Se aplican ampliamente en separaciones y extracciones de alta pureza. ✓ Tienen buenas propiedades electroquímicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ A nivel industrial la elevada densidad y viscosidad que tienen representa un problema. ✗ Hay muy poca información sobre sus propiedades toxicológicas.²³ ✗ Debido a que son disolventes nuevos, hay poca información sobre sus propiedades físicas.

Tabla 3 Ventajas y desventajas de los disolventes eutécticos.

Analizando las ventajas y desventajas que existen entre los líquidos iónicos (*tabla 2*) y los disolventes eutécticos (*tabla 3*), se puede apreciar que con el uso de DES hay un mayor número de ventajas en comparación con el uso de LI.

Dentro de las ventajas más importantes que tienen tanto los disolventes eutécticos como los líquidos iónicos está el hecho de que ambos disolventes se consideran “disolventes de diseño”.

De las ventajas más significativas que tienen los disolventes eutécticos se destaca la solubilidad en agua que poseen los componentes de los DES hidrofílicos. Una vez concluido el proceso químico, la adición de agua disuelve la mezcla eutéctica y sólo quedan los reactivos y productos en diferentes fases, lo que simplifica la extracción y favorece la reutilización del disolvente eutéctico.^{19,31}

Los disolventes eutécticos poseen una polaridad superior a la del agua y similar a la del cloroformo, por lo que la solubilidad de compuesto orgánicos e inorgánicos es muy sencilla.¹⁹

Otra de las grandes ventajas de los disolventes eutécticos es que al elaborarse a partir de componentes que provienen de fuentes naturales, presentan una toxicidad prácticamente baja y su biodegradabilidad es muy alta.¹⁹

Los altos valores de densidad y viscosidad afectan la transferencia de materia y las velocidades de reacción, por lo que, a nivel industrial este problema figura una gran desventaja.³² Sin embargo, para este inconveniente ya se han planteado soluciones, tales como, hacer variaciones en las temperaturas de trabajo y agregar un tercer componente para generar mezclas eutécticas ternarias. Los componentes por añadir pueden ser agua, ácidos carboxílicos y haluros. Estas soluciones convierten a las mezclas eutécticas en disolventes ideales para muchas aplicaciones.^{19,31,32}

4.3.6. Aplicaciones de los DES

Los disolventes eutécticos son una excelente alternativa para el cuidado medioambiental, ya que con ellos se pueden desarrollar procesos químicos más seguros, más económicos y respetuosos con el ambiente.^{19,23,31}

Las aplicaciones que tienen los disolventes eutécticos dependen en gran medida de propiedades como la viscosidad, densidad, miscibilidad y polaridad.^{29,32} Por ejemplo, los DES con alta conductividad son muy útiles procesos electroquímicos^{32,80} y los DES con una tensión superficial muy baja se pueden usar como adhesivos o agentes humectantes.²⁸

El empleo de las mezclas eutécticas como disolventes en procesos de separación y extracción (extracciones líquido-líquido y extracciones en fase sólida)²⁹, es una de las aplicaciones más comunes que tienen los disolventes eutécticos en procesos químicos.^{23,28,32,97} Los DES pueden ser usados como disolventes para una amplia gama de diferentes solutos químicos.²⁹ Por ejemplo, los DES se han aplicado como aditivo en la extracción y separación de metales desde fases acuosas¹⁹, biodiesel, compuestos aromáticos, polisacarosa y cualquier otro compuesto bioactivo de productos naturales.^{28,29} Asimismo, estos disolventes también se han ocupado para modificar algunos materiales como polímeros o sílice, que una vez ya modificados, también se emplean en procesos de separación y extracción; ejemplo de ello es su uso en cromatografía.²⁸

Las mezclas eutécticas también son útiles para trabajarse con ingredientes farmacéuticos activos. Cuando a un DES se le añade un compuesto farmacéutico se convierte en un sistema eutéctico profundo terapéutico (THEDES). Estos sistemas, que son líquidos a temperatura ambiente, se pueden formar a base de cloruro de colina o mentol con ácido acetilsalicílico, ácido benzoico y ácido fenilacético.⁹⁵ Los DES son una excelente opción para ser aplicados en la farmacéutica.^{96,97}

Para la eliminación de microcontaminantes³², como los neonicotinoides^{98,99}, presentes en plantas de aguas residuales, se requiere del uso de disolventes insolubles en agua. Los disolventes eutécticos hidrofóbicos³⁰ son una excelente opción ya que las eficiencias de extracción obtenidas son del 80% o más.^{32,33} Muchos procedimientos de extracción pueden volverse más efectivos utilizando DES hidrofóbicos debido a la capacidad que tienen para extraer analitos apolares de soluciones acuosas y para extraer formas disociadas y no disociadas de compuestos ácidos. Esto que origina que los disolventes eutécticos hidrofóbicos tengan más aplicaciones en diferentes niveles de pH.²⁹ Los DES hidrofóbicos también se ocupan en la captura de CO₂, en síntesis orgánicas, en el desarrollo de nuevos materiales y en la eliminación de sales metálicas de medios acuosos por medio de extracciones líquido-líquido.^{30,32}

En procesos como producción y purificación (eliminación de glicerol) del biodiésel, recuperación del petróleo, procesamiento de óxidos metálicos, captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂), eliminación de compuestos de nitrógeno de los combustibles, exfoliación de grafito⁸⁰ y síntesis de derivados de celulosa, el uso de disolventes eutécticos ha sido de gran ayuda para obtener resultados favorables.^{23,32,92}

Otras aplicaciones, en donde se han utilizado estas mezclas como disolventes, se dan en áreas como las de alimentos⁹⁷, biología, biocatálisis, biotecnología, nanotecnología⁹², bioingeniería, química analítica, síntesis orgánicas³², síntesis de materiales y reacciones de polimerización.^{19,20,29,32}

Actualmente los disolventes eutécticos sólo se utilizan a nivel laboratorio, sin embargo, son una excelente alternativa para ser empelados en tecnologías existentes.^{23,32}

4.4. Diferencias y similitudes entre un DES y un LI

Los líquidos iónicos, en comparación con los disolventes eutécticos, han sido una de las áreas científicas más estudiadas en los últimos años.²³

Las mezclas eutécticas y los líquidos iónicos pertenecen a la misma familia al ser considerados como disolventes de la química verde, aunque se trata de dos diferentes tipos de disolventes.²³ Ambos se conocen como disolventes verdes por el impacto que tienen en el ambiente, por el origen de los componentes a partir de los cuales se elaboran y por ciertas propiedades físicas que presentan.¹⁵

Los disolventes eutécticos son conocidos como una nueva clase de líquidos iónicos porque ambos presentan algunas características y propiedades físicas similares.³² Sin embargo, el procesos de elaboración y las propiedades químicas de ambos disolventes son significativamente diferentes.^{23,80}

Algunas de las propiedades físicas que estos disolventes tienen en común son: baja presión de vapor y nula o baja inflamabilidad. Además, ambos compuestos tienen buen potencial como disolventes dado que se pueden ajustar los requerimientos del proceso.²³

Los líquidos iónicos generalmente se forman a partir de sistemas compuestos por un catión y un anión. Los pasos de síntesis son dos, la formación del catión deseado y el intercambio de aniones.^{21,24,25,27,76,88}

En cambio, la formación de los disolventes eutécticos se da a partir de una mezcla eutéctica formada regularmente por compuestos moleculares^{80,92} o también por ácidos y bases de Lewis o Brönsted^{19,23,80}. Para la formación de los disolventes eutécticos la mezcla se pone en calentamiento a una cierta temperatura.²⁹

Como ya se mencionó anteriormente, el uso de disolventes eutécticos presenta más ventajas sobre el uso de líquidos iónicos.^{20,23,30,32,33,80} Las ventajas más significativas son:

- La preparación y producción de los DES es mucho más sencilla de realizar que la de los LI.
- Los DES se obtienen con un alto nivel de pureza, mientras que los LI requieren de una etapa de purificación.

- Los costos de producción de los LI suelen ser más elevados comparados con los costos de los DES.
- Dependiendo de los componentes de los DES, se pueden obtener disolventes biodegradables y con baja toxicidad. En cambio, dependiendo de la estructura de los LI, se pueden obtener disolventes tóxicos con baja biodegradabilidad.

Sin embargo, una de las grandes desventajas de los disolventes eutécticos ante los líquidos iónicos, es que las mezclas eutécticas no cuentan con mucha información sobre sus propiedades toxicológicas, esto pese a que los componentes individuales de un eutéctico tienden a estar bien caracterizados toxicológicamente.^{23,32}

En los últimos años, los disolventes eutécticos y los líquidos iónicos han demostrado tener gran potencial en varias aplicaciones científicas y tecnológicas. Por ejemplo, ambos son disolventes muy aplicables en procesos de eliminación de sales metálicas del agua por medio de extracciones líquido-líquido.³⁰ Además, se ocupan para la eliminación de contaminantes y purificación de combustibles.²⁶ No obstante, las mezclas eutécticas han tenido un interés progresivo en las aplicaciones de los líquidos iónicos, esto debido a que los líquidos iónicos tienen una escasa biodegradabilidad y sostenibilidad.²⁸

Para la química verde, el uso tanto de disolventes eutécticos como de líquidos iónicos representa una excelente solución a los problemas ambientales que se generan por el uso de disolventes convencionales. Pese a ello, aún falta mucho por estudiar y mejorar sobre los disolventes verdes para que puedan ser manejados a nivel industrial.²⁶

4.5. Materiales utilizados en este trabajo

Los ácidos que se utilizaron para el desarrollo práctico de esta investigación son ácidos grasos saturados que, además de obtenerse mediante procesos químicos, también se pueden conseguir con facilidad en la naturaleza.

4.5.1. Ácido salicílico

El ácido 2-hidroxibenzoico¹⁰⁰, mejor conocido como ácido salicílico, es un beta-hidroxiácido. La fórmula de este compuesto es $C_7H_6O_3$. Físicamente se

encuentra en polvo velloso blanco o en forma de cristales blancos. Tiene un punto de fusión entre 158 y 161 °C.^{43,101}

En la naturaleza, el ácido salicílico se localiza en la salicina, sustancia que se encuentra en la corteza del árbol sauce blanco (*Salix alba*). El ácido salicílico también está presente en plantas como el abedul y las hojas de gaulteria.¹⁰¹

El ácido salicílico tiene propiedades medicinales, pertenece al grupo de los agentes analgésicos, antipiréticos y antiinflamatorios. Se ocupa mucho como aditivo para varios productos dermatológicos y también se emplea para aliviar dolores y molestias.¹⁰¹ Como ejemplo se tiene al ácido acetilsalicílico, también conocido como aspirina, que es un derivado del ácido salicílico y es un antiinflamatorio.

Es un compuesto que también se utiliza en la agronomía para aumentar el rendimiento del desarrollo de vegetales.¹⁰⁰ Se ha utilizado en el crecimiento de la raíz y biomasa de plántulas de trigo¹⁰², tomate¹⁰³ y chile habanero¹⁰⁴, dado que es un regulador de crecimiento de plantas¹⁰⁵.

4.5.2. Ácido octanoico

El ácido octanoico de fórmula molecular $C_8H_{16}O_2$ también conocido como ácido caprílico, es un ácido graso saturado de cadena corta¹⁰⁶ que cuenta con ocho átomos de carbono. A temperatura ambiente es un líquido amarillo claro con una textura aceitosa y un olor un tanto desagradable. Es un compuesto muy poco soluble en agua que tiene un punto de fusión de 16.5 °C y un punto de ebullición de 237 °C.¹⁰⁷

El ácido caprílico está presente de forma natural en pequeñas cantidades en aceites vegetales como el de palma^{108,109} y coco¹¹⁰, también se encuentra en la leche de varios mamíferos como camellos¹⁰⁶, cabras, vacas y ovejas^{111,112}. Para obtener ácido octanoico a partir de fuentes naturales, se requiere de la hidrólisis del aceite y de la aplicación de un proceso de separación como la destilación fraccionada.¹¹³

Gracias a sus propiedades, tanto físicas como químicas, es que este ácido sirve para fabricar una gran variedad de productos en la industria. En el mercado, generalmente se distribuye, junto con el ácido cáprico, como una mezcla de ambos ácidos. Asimismo, este compuesto se utiliza principalmente como materia prima en la elaboración de resinas alquídicas que son muy útiles para recubrimientos, biocidas y plastificantes, perfumes y aromas, tintes, lubricantes y demás.¹¹³

4.5.3.Ácido decanoico

El ácido decanoico o ácido cáprico ($C_{10}H_{20}O_2$) es un ácido orgánico saturado de cadena media¹⁰⁶ que tiene diez átomos de carbono. Es un compuesto que se encuentra en forma de sólido cristalino a temperatura ambiente, posee un color amarillo claro o blanco y tiene un olor característico. En agua, el ácido decanoico tiene una solubilidad muy baja. Su punto de fusión se encuentra en un intervalo de 29 a 32°C.¹¹⁴

El ácido cáprico se localiza naturalmente en grasas animales y en la leche de ciertos mamíferos como la de cabra, camello y vaca.^{6,7} En la leche de camello el ácido cáprico representa el 15.9% del total de ácidos grasos presentes.¹⁰⁶ Asimismo está presente en algunos aceites como el de almendra de palma y el de coco. También está presente en el azúcar de savia de coco¹¹⁵.

Este ácido, al igual que el ácido octanoico, se obtiene normalmente a partir de la hidrólisis del aceite y del uso de destilación fraccionada como método de separación.¹¹³

Algunas de las principales aplicaciones del ácido decanoico se dan en la industria de aromas y perfumes en donde se producen ésteres para crear olores artificiales. También se ocupa en síntesis orgánicas químicas, en la fabricación de lubricantes, grasas, tintes, plásticos y otros productos.¹¹⁶

4.5.4.Ácido dodecanoico

El ácido dodecanoico o también ácido láurico con fórmula $C_{12}H_{24}O_2$ es, al igual que el ácido octanoico y el ácido decanoico, un ácido graso saturado. La cadena de este ácido es media¹⁰⁶ y está formada por doce átomos de carbono. Este ácido graso es insoluble en agua y soluble en etanol, tiene una apariencia sólida a temperatura ambiente, es de color blanco o ligeramente amarillo y posee un olor característico a jabón. Su punto de ebullición es de 130°C y su punto de fusión es de 45°C.¹¹⁷

Normalmente el ácido láurico se localiza en aceites vegetales como el de coco¹¹⁰ y el de semillas de palma¹⁰⁹, por lo que estos dos tipos de aceite, junto con el aceite de babasú, se conocen en el mercado como aceites láuricos. La composición del ácido láurico en el aceite de coco es del 41 al 47%, en el aceite de almendra de palma o palmiste es del 41 al 55% y en el aceite de babasú es del 44 al 46%. En el azúcar de savia de coco, que es un derivado del azúcar de palma, también hay ácido dodecanoico, el cual se encarga de proveer el olor.¹¹⁵ El ácido láurico se puede encontrar de igual manera en pequeñas cantidades en

la mantequilla y en grasas lácteas.^{112,117} En la leche de camello hay del 20.2 al 30% de ácido dodecanoico presente.¹⁰⁶

Para obtener ácido dodecanoico a partir de productos naturales se requiere de la hidrólisis del aceite a partir del cual se desea obtener el ácido, posteriormente se necesita de la aplicación de destilación fraccionada.¹¹⁸ El aceite que más se ocupa a nivel industrial para extraer ácido láurico es el aceite de coco.¹¹⁹

La principal aplicación que se le da al ácido láurico es como materia prima en la fabricación de productos cosméticos y de limpieza; esto se debe a las propiedades antibacterianas y antiinflamatorias que presenta este ácido graso. Las cremas, fragancias, jabones, detergentes, champús, tensoactivos, resinas alquídicas, plastificantes y peróxidos orgánicos son algunos de los productos que se elaboran a partir de ácido láurico.¹¹⁸ Los detergentes que se fabrican con este ácido suelen ser demasiado espumosos y además tienen la capacidad de disolver con facilidad grasas y aceites.

4.5.5.(-)-Mentol

El mentol ($C_{10}H_{20}O$) es un alcohol que a temperatura ambiente es un sólido cristalino blanco con un olor aromático característico.¹²⁰ Es un compuesto que tiene una solubilidad muy baja en agua y muy alta en disolventes orgánicos como etanol, cloroformo y éter. También se disuelve con facilidad en aceites grasos y parafinas líquidas.^{121,122}

El mentol cuenta con varios estereoisómeros, pero para esta investigación se utilizó el (-)-Mentol. Este derivado del mentol es químicamente estable a temperatura ambiente, tiene un punto de ebullición de 212°C y un punto de fusión de 41 a 43°C.¹²⁰

El L-Mentol, que es la forma natural, se encuentra en la naturaleza de manera abundante y se puede extraer a partir de la esencia de varias especies de la planta *Mentha sp.*^{96,121} Este compuesto es producto de la destilación de las hojas de menta.

Dentro de las aplicaciones del mentol están sus usos en la medicina y en la industria de bebidas y alimentos. En medicina, gracias a su acción como antiséptico, analgésico y antiinflamatorio, se emplea como principio activo y saborizante en la elaboración de formulaciones para la tos e inhalaciones nasales.¹²¹ En los procesos alimenticios se utiliza como saborizante y aromatizante para producir confitería y licores. Además, esta sustancia también se ocupa como aromatizante en la fabricación de perfumes y productos de limpieza.¹²²

La fabricación de disolventes sostenibles, económicos e hidrofóbicos por medio de la síntesis de disolventes eutécticos, es otra aplicación que tiene el mentol a nivel laboratorio en la actualidad.⁹⁶

4.5.6. Trioctilamina

La trioctilamina, de fórmula $C_{24}H_{51}N$, es un producto químico orgánico.^{123,124} Es una amina terciaria de cadena lineal que, a temperatura ambiente, es químicamente estable.¹²³ Físicamente es un compuesto líquido que es incoloro e irritante, con un punto de fusión de $-34.6^{\circ}C$ y un punto de ebullición de 365 a $367^{\circ}C$.^{123,124} Se considera como una sustancia con toxicidad aguda y una baja biodegradabilidad.¹²³

Este compuesto se utiliza como extractante en distintos procesos químicos, por ejemplo en extracciones líquido-líquido.^{123,125,126}

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

En este apartado se describe detalladamente la metodología experimental que se utilizó en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

Este capítulo está conformado por tres secciones. La *sección 5.1* corresponde a la explicación de las técnicas experimentales con las que se trabajó durante el desarrollo de la investigación. En la *sección 5.2* se especifican los reactivos empleados en la elaboración de los diferentes disolventes eutécticos. Por último, en la *sección 5.3* se habla de la técnica de análisis con la que opera el equipo con el que se analizan las muestras experimentales.

5.1. Procedimiento experimental

Para el desarrollo práctico de esta investigación se experimentó con los disolventes eutécticos de dos maneras diferentes. En el primer caso se hizo uso de los disolventes eutécticos mezclados con un extractante, mejor conocido en la industria como “disolvente de extracción” o “agente de extracción”. Para el segundo caso se trabajó únicamente con los disolventes eutécticos, sin el uso del extractante.

A continuación, en la *figura 28*, se muestra un diagrama general de los pasos de la metodología que se ejecutaron cuando la experimentación se realizó con y sin la adición del extractante.

Posterior a ello se describe detalladamente cada una de las etapas involucradas durante la experimentación, además de que se especifican los materiales y equipos que se ocuparon.

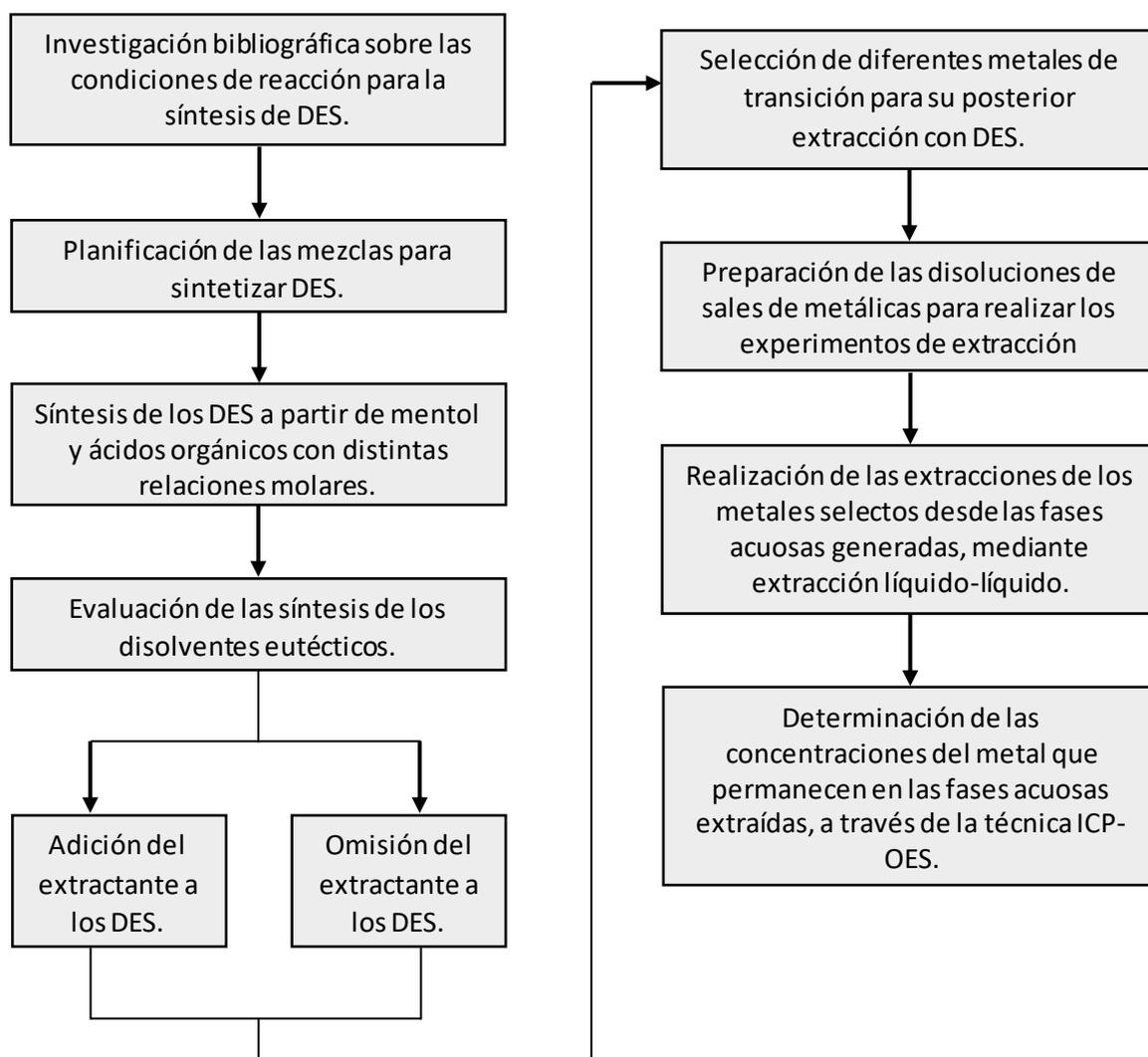


Figura 28 Diagrama general de la metodología experimental.

SÍNTESIS DE LOS DISOLVENTES EUTÉCTICOS

La síntesis de las mezclas elaboradas para crear disolventes eutécticos con distintas relaciones molares se elaboró de la siguiente manera:

1. Primero se determinaron, con base en las relaciones molares y en la cantidad deseada de mezcla a preparar, las cantidades a utilizar de cada una de las sustancias para la síntesis de los disolventes eutécticos. Dicho de otra manera, se calcularon las cantidades de HBA y HBD a usar.
2. Al trabajar con mentol, el compuesto se colocó en baño maría a 50°C. Una vez fundido, se tomó la cantidad requerida del compuesto con ayuda de una pipeta de plástico.

3. En un vaso de precipitado Pyrex de 20 mL, se puso la cantidad solicitada de cada sustancia, para ello se utilizó una balanza analítica digital de la marca Ohaus Explorer.
4. Posteriormente, el vaso de precipitado se colocó en una parrilla marca StableTemp Cole-Parmer, y durante aproximadamente 3 horas seguidas la mezcla se mantuvo en agitación y a una temperatura de 60°C.
5. Pasadas las 3 horas se revisó el estado de la mezcla. Si ésta aún era líquida, se dejó en reposo por un mínimo de 24 horas. En los casos en donde se formó una mezcla sólida, ésta se depositó en los residuos.
6. Si después de 24 horas la mezcla seguía siendo líquida, se colocó en un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL. La persistencia de la mezcla líquida indicaba la formación del disolvente eutéctico.

ADICIÓN DEL EXTRACTANTE A LOS DISOLVENTES EUTÉCTICOS

Al trabajar con el extractante, los pasos que se efectuaron fueron:

1. Se calculó la cantidad de extractante que se debía agregar al disolvente eutéctico.
2. Después, con ayuda de una micropipeta se adicionó el extractante al disolvente eutéctico. La mezcla de ambas sustancias debía estar en un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL.
3. En un mezclador Vortex modelo Genie 2 de la marca Scientific Industries se colocó el tubo con la mezcla por aproximadamente 2 horas, esto para incorporar perfectamente el disolvente eutéctico con el extractante.
4. Posteriormente, se examinó el número de fases que había en el tubo. La presencia de una sola fase indicaba que el extractante se disolvió correctamente en el disolvente eutéctico, y por lo tanto la mezcla formada se podía ocupar en la extracción de metales.

PREPARACIÓN DE LAS DISOLUCIONES DE SALES METÁLICAS

Para preparar las disoluciones a partir de diferentes sales metálicas, se siguió el procedimiento que a continuación se describe:

1. Se eligieron las sales que contenían los metales de transición a extraer, en la *tabla 4* se señalan. La concentración con la que se trabajó fue de 100mM.

Metal selecto	Sal metálica utilizada
Cobre	Nitrato de cobre $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$
Cobalto	Nitrato de cobalto $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$
Zinc	Cloruro de zinc ZnCl_2
Estroncio	Cloruro de estroncio SrCl_2

Tabla 4 Disoluciones metálicas.

2. Se determinó la cantidad necesaria de cada sal metálica y agua para preparar las disoluciones.
3. En un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL se pesó el total de la sal metálica a utilizar.
4. Posteriormente, se añadió al mismo tubo la cantidad requerida de agua.
5. Para concluir, se agitó la mezcla de manera continua durante 5 minutos en un mezclador Vortex-Genie 2 de la marca Scientific Industries.

EXTRACCIÓN DE METALES CON DISOLVENTES EUTÉCTICOS

Una vez preparados los disolventes eutécticos y las disoluciones de sales metálicas, se realizaron los experimentos de extracción. Los pasos elaborados fueron:

1. En cantidades iguales, se mezcló el disolvente eutéctico sintetizado con la disolución del metal a extraer. La mezcla se colocó en un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL.
2. El tubo con la mezcla se instaló en un mezclador Vortex-Genie 2 de la marca Scientific Industries por 20 minutos.
3. Con ayuda de una centrifuga modelo IEC Clinical de la marca International Equipment Company, las fases de la mezcla se separaron.
4. Por último, con una jeringa de 5 mL y agujas desechables, se extrajo la fase acuosa (fase que se encontraba en la parte inferior del tubo) y se colocó en un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL.

DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS METALES

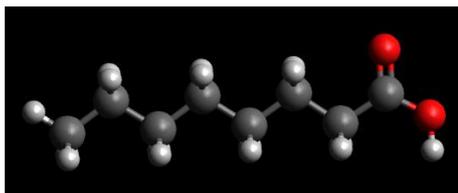
Finalmente, para determinar las concentraciones de los metales que permanecieron en las fases acuosas extraídas, se recurrió al uso de la técnica de análisis ICP-OES. Para hacer uso de dicha técnica se realizó lo siguiente:

1. Se determinó el número de veces que debía diluirse cada fase acuosa resultante de la extracción de cada muestra, esto dependiendo del metal utilizado. En este caso, para estar dentro del rango del ICP-OES, se hicieron dos diluciones. Las diluciones se hicieron con ayuda de micropipetas marca Dlab de alta precisión.
2. Para llevar a cabo la primera dilución, en un tubo de plástico de 10 mL se colocaron 100 μ L de muestra (fase acuosa extraída) y 2.4 mL de agua ultrapura. Las cantidades pesadas en cada caso se registraron para con ello determinar el peso total de la primera dilución.
3. La segunda dilución se realizó a partir de la primera dilución. En un tubo de centrifuga de tipo Falcon de 15 mL se colocó 1 mL de la primera dilución y 9 mL de agua ultrapura. Nuevamente, se tomó nota de todas las cantidades utilizadas para después determinar el peso total de la segunda dilución.
4. El total de la segunda dilución de cada muestra se recopiló para después ser examinada con la técnica ICP-OES. El equipo marca Perkin Elmer 8300 DV es el que se utilizó para aplicar la técnica.
5. Lo restante de la primera dilución se colocó en los residuos para su posterior tratamiento.
6. Finalmente, al tener los resultados del análisis ICP-OES, se determinaron los porcentajes de extracción y la efectividad de los disolventes eutécticos sintetizados.

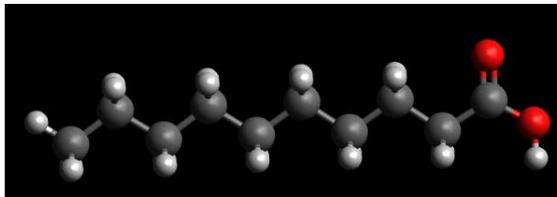
5.2. Reactivos

Para llevar a cabo la síntesis de los disolventes eutécticos se requiere de la mezcla de dos componentes, el donador de enlaces hidrógeno (HBD) y el aceptor de enlaces hidrógeno (HBA). Para esta investigación, tanto el extractante como los reactivos usados como HBD y HBA fueron obtenidos de la marca Sigma-Aldrich y utilizados sin procesamiento adicional. En la *figura 29, 30 y 31* se indican las sustancias con las que se trabajó.

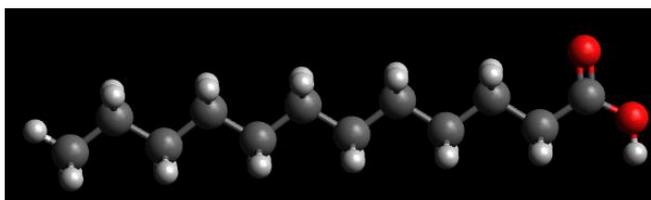
Ácido octanoico (Ácido caprílico),
 $C_8H_{16}O_2$



Ácido decanoico (Ácido cáprico),
 $C_{10}H_{20}O_2$



Ácido dodecanoico (Ácido láurico),
 $C_{12}H_{24}O_2$



Ácido salicílico, $C_7H_6O_3$

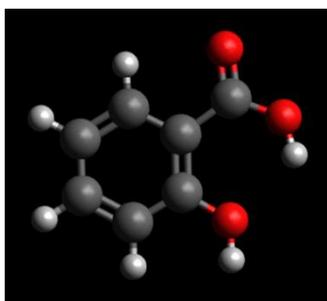


Figura 29 Reactivos utilizados como donadores de enlaces hidrógeno (HBD) para sintetizar disolventes eutécticos.

(-)-Mentol, $C_{10}H_{20}O$, estándar analítico

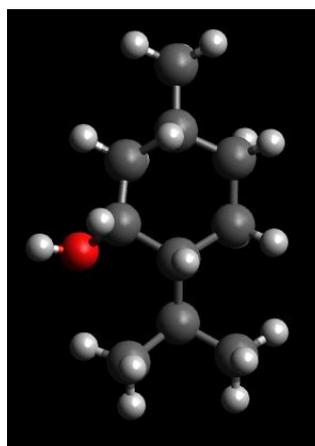


Figura 30 Reactivo utilizado como aceptor de enlaces hidrógeno (HBA) para sintetizar disolventes eutécticos.

Trietilamina, $C_{24}H_{51}N$

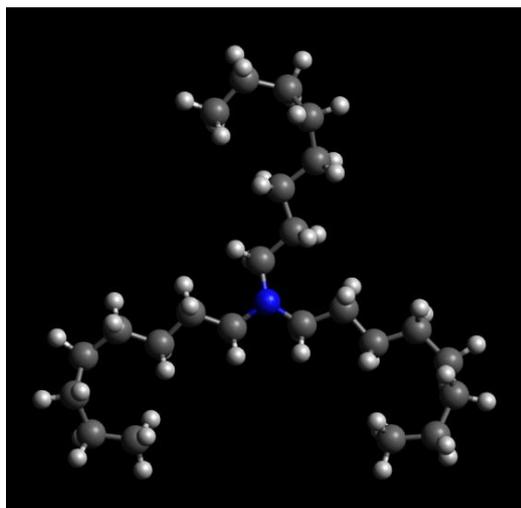


Figura 31 Reactivo utilizado como extractante.

Finalmente, en la *tabla 5*, se señalan las mezclas que se realizaron y las relaciones molares que se ocuparon para conseguir la formación de los diferentes disolventes eutécticos.

Mezcla	Relación molar
Mentol + Ácido decanoico	1:1
	1:2
	2:1
	1:3
Mentol + Ácido dodecanoico	1:1
	1:2
	2:1
Ácido decanoico + Ácido dodecanoico	1:1
	1:2
	2:1
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico	1:1
	1:2
	2:1
Mentol + Ácido salicílico	3:1

Tabla 5 Relaciones molares para las síntesis de disolventes eutécticos.

5.3. Técnicas de análisis

*Espectroscopia de emisión óptica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES).*¹²⁷⁻¹²⁹

La espectroscopia de emisión óptica de plasma es una técnica analítica, mejor conocida como ICP-OES, por sus siglas en inglés “*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*”.

La técnica ICP-OES ofrece un análisis con el que se puede identificar y cuantificar a la mayoría de los elementos de la tabla periódica, a excepción del nitrógeno, oxígeno, halógenos y gases nobles. Los resultados que esta técnica proyecta se obtienen con gran rapidez y exactitud.

Para este trabajo de investigación, el modelo del equipo con el que se realizó el análisis ICP-OES fue el 8300 DV de la marca Perkin-Elmer.

El equipo en donde se lleva a cabo la técnica ICP-OES está formado por una fuente de ionización, que es el plasma de acoplamiento inductivo (ICP), y por el espectrofotómetro de emisión óptico (OES). Las partes que integran un espectrofotómetro de emisión óptico se encuentran descritas en el *Anexo I*.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la *sección 6.1* se presentan los resultados de las síntesis de disolventes eutécticos. En la *sección 6.2* se habla de las extracciones líquido-líquido que se realizaron con los DES sintetizados. Los resultados de las concentraciones de los metales en las fases acuosas, que se consiguieron mediante la técnica de análisis ICP-OES, se exponen en la *sección 6.3*. Las eficiencias de extracción líquido-líquido obtenidas en cada caso (con y sin la adición de extractante) se especifican en la *sección 6.4*. Por último, en la *sección 6.5* se muestra un análisis de resultados con base en las síntesis de los DES y las extracciones de metales.

6.1. Síntesis de disolventes eutécticos

Las síntesis de disolventes eutécticos se realizaron a partir de mentol y ácidos orgánicos, con diferentes relaciones molares. El ácido decanoico, ácido octanoico, ácido dodecanoico y ácido salicílico, fueron los ácidos orgánicos que se utilizaron. Los resultados obtenidos de las síntesis se muestran en la *tabla 6*.

Mezcla	Relación molar	Después de 3 horas de agitación a 60°C, ¿hay un líquido?	Estado de la mezcla después de 24 horas.	¿Disolvente eutéctico?
Mentol + Ácido decanoico	1:1	Sí	Líquido	Sí
	1:2	Sí	Líquido	Sí
	2:1	Sí	Líquido	Sí
	1:3	No	Sólido	No
Mentol + Ácido dodecanoico	1:1	No	Sólido	No
	1:2	No	Sólido	No
	2:1	Sí	Líquido	Sí
Ácido decanoico + Ácido dodecanoico	1:1	Sí	Sólido	No
	1:2	No	Sólido	No
	2:1	Sí	Sólido	No
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico	1:1	No	Sólido	No
	1:2	Sí	Líquido	Sí
	2:1	No	Sólido	No
Mentol + Ácido salicílico	3:1	No	Sólido	No

Tabla 6 Datos y resultados de las síntesis de disolventes eutécticos.

A continuación, se exponen imágenes de las mezclas sintetizadas para la obtención de disolventes eutécticos a partir de mentol y ácidos orgánicos.

En la *figura 32* se muestran las mezclas que se elaboraron a partir de mentol con ácido decanoico en cuatro diferentes relaciones molares.



A) Relación molar: 1:1



B) Relación molar: 1:2



C) Relación molar: 2:1



D) Relación molar: 1:3

Figura 32 Mezclas de mentol con ácido decanoico en diferentes relaciones molares.

La *figura 33* muestra fotografías de las mezclas que se realizaron a partir de mentol con ácido dodecanoico en tres diferentes relaciones molares.



A) Relación molar: 1:1



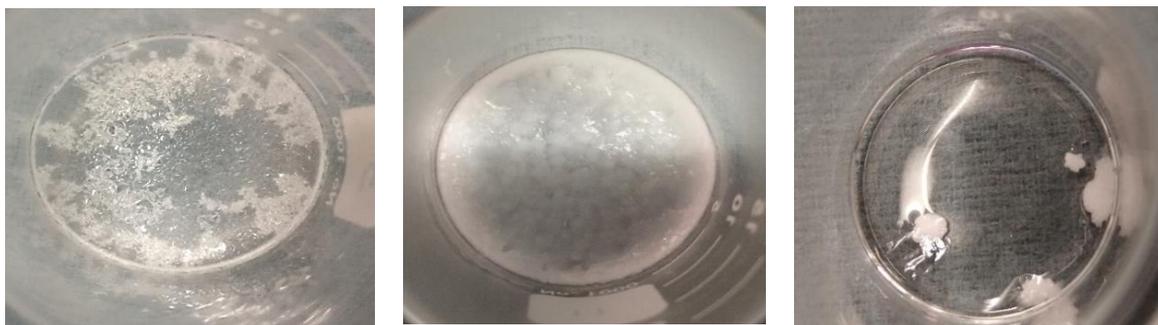
B) Relación molar: 1:2



C) Relación molar: 2:1

Figura 33 Mezclas de mentol con ácido dodecanoico en diferentes relaciones molares.

La *figura 34* muestra imágenes de las mezclas realizadas a partir de ácido decanoico con ácido dodecanoico en tres diferentes relaciones molares.



A) Relación molar: 1:1

B) Relación molar: 1:2

A) Relación molar: 2:1

Figura 34 Mezclas de ácido decanoico con ácido dodecanoico en diferentes relaciones molares.

Las *figuras 35* muestra las mezclas que se hicieron a partir de ácido dodecanoico con ácido octanoico en tres diferentes relaciones molares.



A) Relación molar: 1:1

B) Relación molar: 1:2

C) Relación molar: 2:1

Figura 35 Mezclas de ácido dodecanoico con ácido octanoico en diferentes relaciones molares.

Por último, la *figura 36* muestra la fotografía de la mezcla que se elaboró a partir de mentol con ácido salicílico en relación molar 3:1.



Figura 36 Mezcla de mentol con ácido salicílico.

Para llevar a cabo las extracciones de metales de transición, se determinó cuales mezclas formaron exitosamente un disolvente eutéctico. Además, se verificó que estos disolventes eutécticos permanecerían estables durante un mínimo de dos días.

6.2. Extracciones líquido-líquido de metales

En total cinco DES fueron sintetizados con éxito. A partir de ellos se realizaron las extracciones correspondientes con los metales seleccionados. Los metales que se eligieron fueron cobre, zinc, estroncio y cobalto.

En la *tabla 7* se aprecia que, de todas las extracciones, sólo funcionaron las que se realizaron con las disoluciones de nitrato de cobre, cloruro de zinc y cloruro de estroncio. Las extracciones efectuadas con nitrato de cobalto resultaron en una efectividad baja, dado que se apreciaban dos fases, motivo por el cual se descartó su uso en la aplicación de los DES en las extracciones líquido-líquido de metales; lo que se buscaba era tener una sola fase homogénea.

Mezcla: DES + Disolución	Relación molar	¿Había extracción medible?
Mentol + Ácido decanoico + Nitrato de cobre	1:1	Sí
	1:2	Sí
	2:1	Sí
Mentol + Ácido dodecanoico + Nitrato de cobre	2:1	Sí
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Nitrato de cobre	1:2	Sí
Mentol + Ácido decanoico + Cloruro de zinc	1:1	Sí
	1:2	Sí
	2:1	Sí
Mentol + Ácido dodecanoico + Cloruro de zinc	2:1	Sí
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Cloruro de zinc	1:2	Sí
Mentol + Ácido decanoico + Cloruro de estroncio	1:1	Sí
	1:2	Sí
	2:1	Sí
Mentol + Ácido dodecanoico + Cloruro de estroncio	2:1	Sí
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Cloruro de estroncio	1:2	Sí
Mentol + Ácido decanoico + Nitrato de cobalto	1:1	No
	1:2	No
	2:1	No
Mentol + Ácido dodecanoico + Nitrato de cobalto	2:1	No
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Nitrato de cobalto	1:2	No

Tabla 7 Extracciones líquido-líquido de metales.

6.3. Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES

A partir de las extracciones que resultaron medibles, se realizó el análisis de las concentraciones de los metales que permanecieron en las fases acuosas de los disolventes eutécticos, esto por medio de la técnica de análisis ICP-OES.

Los disolventes eutécticos se trabajaron en dos maneras diferentes. En el primer caso se trataron los resultados de los disolventes eutécticos sin la presencia de un extractante y en el segundo caso se analizaron los resultados de los disolventes eutécticos con el uso de un extractante.

Para el análisis de los disolventes eutécticos sin extractante se utilizaron las cinco mezclas eutécticas sintetizadas y se extrajeron los metales de cobre, zinc y estroncio. Para el análisis de los disolventes eutécticos con extractante sólo se utilizaron tres mezclas eutécticas y únicamente se extrajo cobre y zinc.

En la tabla de resultados de las concentraciones de los metales en los disolventes eutécticos sin la presencia de un extractante (*tabla 8*), se observa que la mayoría de las concentraciones de cobre y zinc están en un rango de 6000 a 6500 mg/L. Mientras que las concentraciones de estroncio son superiores a 8000 mg/L.

Por su parte, en la tabla de resultados de las concentraciones de los metales en los disolventes eutécticos con la presencia de un extractante (*tabla 9*), se observa que las concentraciones de cobre y zinc, presentes en las fases acuosas de los disolventes eutécticos con el uso de triocetilamina como extractante, se encuentran en un intervalo de 25 a 35 mg/L.

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para cada caso.

6.3.1. Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES sin extractante

En la *tabla 8* se indican las concentraciones de los metales permanentes en las fases acuosas de los DES sin extractante después de las extracciones.

Mezcla: DES + Disolución	Relación molar	Concentración de Cu (mg/L)	Concentración de Zn (mg/L)	Concentración de Sr (mg/L)
Mentol + Ácido decanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:1	6529.88	-----	-----
	1:2	6489.94	-----	-----
	2:1	9555.52	-----	-----
Mentol + Ácido dodecanoico + Cu(NO ₃) ₂	2:1	6454.34	-----	-----
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:2	5898.57	-----	-----
Mentol + Ácido decanoico + ZnCl ₂	1:1	-----	6131.07	-----
	1:2	-----	6026.05	-----
	2:1	-----	6263.80	-----
Mentol + Ácido dodecanoico + ZnCl ₂	2:1	-----	6161.03	-----
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + ZnCl ₂	1:2	-----	6080.02	-----
Mentol + Ácido decanoico + SrCl ₂	1:1	-----	-----	8580.30
	1:2	-----	-----	8637.40
	2:1	-----	-----	8492.54
Mentol + Ácido dodecanoico + SrCl ₂	2:1	-----	-----	8725.83
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + SrCl ₂	1:2	-----	-----	8457.07

Tabla 8 Resultados del análisis ICP-OES de las concentraciones de los metales en los DES sin la presencia de un extractante.

6.3.2. Concentraciones de los metales en las fases acuosas de los DES con extractante

En la *tabla 9* se muestran las concentraciones de los metales que permanecieron en las fases acuosas de los DES que se trabajaron con trioctilamina como extractante.

Mezcla: DES + Extractante + Disolución	Relación molar	Concentración de Cu (mg/L)	Concentración de Zn (mg/L)
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:1	36.26	-----
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	2:1	30.63	-----
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + ZnCl ₂	2:1	-----	29.33
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:2	24.80	-----

Tabla 9 Resultados del análisis ICP-OES de las concentraciones de los metales en los DES con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).

6.4. Eficiencias de las extracciones de metales

Con las extracciones realizadas y con ayuda de la técnica de análisis ICP-OES, se determinaron las eficiencias de extracción para cada metal presente en las fases acuosas de los disolventes eutécticos, los cuales se trabajaron con y sin un extractante. En seguida, se muestran los resultados que se alcanzaron en cada uno de los casos.

6.4.1. Eficiencias de extracción de los DES sin extractante

En la *tabla 10* se muestran los porcentajes de las eficiencias de extracción que se obtuvieron para el nitrato de cobre.

Mezcla: DES + Disolución	Relación molar	Eficiencia de extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:1	0.00
	1:2	0.00
	2:1	0.00
Mentol + Ácido dodecanoico + Cu(NO ₃) ₂	2:1	0.00
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:2	7.18

Tabla 10 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre sin la presencia de un extractante.

En la *tabla 11* se muestran los porcentajes de las eficiencias de extracción que se obtuvieron para el cloruro de zinc.

Mezcla: DES + Disolución	Relación molar	Eficiencia de extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + ZnCl ₂	1:1	6.24
	1:2	7.84
	2:1	4.21
Mentol + Ácido dodecanoico + ZnCl ₂	2:1	5.78
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + ZnCl ₂	1:2	7.02

Tabla 11 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc sin la presencia de un extractante.

En la *tabla 12* se muestran los porcentajes de las eficiencias de extracción que se obtuvieron para el cloruro de estroncio.

Mezcla: DES + Disolución	Relación molar	Eficiencia de extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + SrCl ₂	1:1	2.07
	1:2	1.42
	2:1	3.08
Mentol + Ácido dodecanoico + SrCl ₂	2:1	0.41
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + SrCl ₂	1:2	3.48

Tabla 12 Eficiencias de extracción del cloruro de estroncio sin la presencia de un extractante.

Con los porcentajes de las eficiencias de extracción obtenidos para el cloruro de zinc y cloruro de estroncio, se elaboraron las gráficas que a continuación se muestran (*figura 37 y 38*).

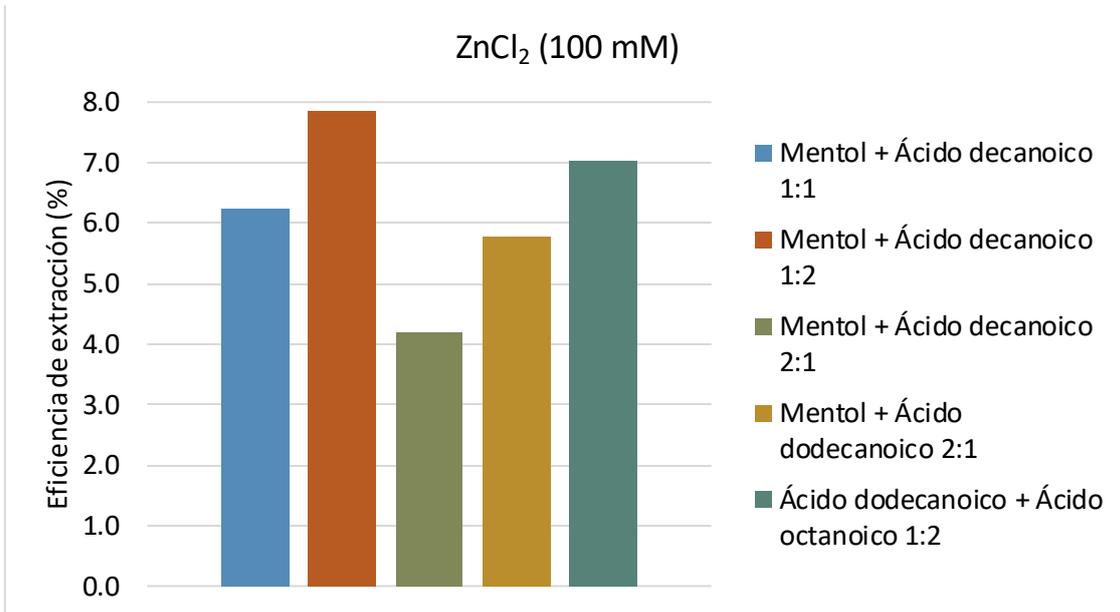


Figura 37 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc sin la presencia de un extractante.

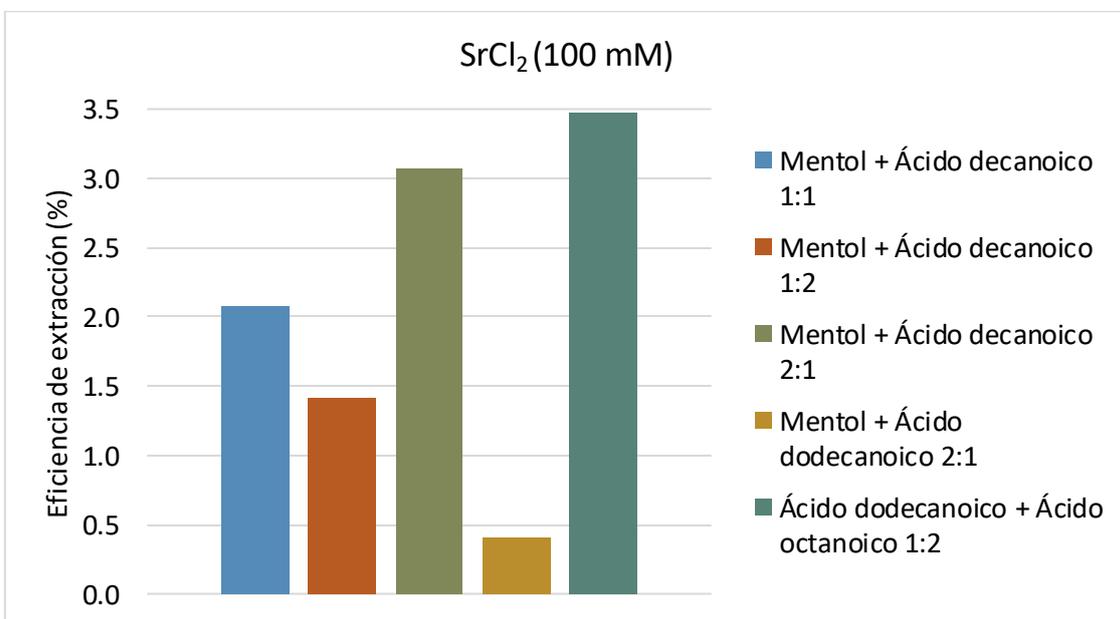


Figura 38 Eficiencias de extracción del cloruro de estroncio sin la presencia de un extractante.

6.4.2. Eficiencias de extracción de los DES con extractante

En la *tabla 13* se muestran los porcentajes de las eficiencias de extracción que se obtuvieron para el nitrato de cobre cuando se utilizó un extractante.

Mezcla: DES + Extractante + Disolución	Relación molar	Eficiencia de extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:1	99.43
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	2:1	99.52
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:2	99.61

Tabla 13 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).

En la *tabla 14* se muestran los porcentajes de las eficiencias de extracción que se obtuvieron para el cloruro de zinc cuando se utilizó un extractante.

Mezcla: DES + Extractante + Disolución	Relación molar	Eficiencia de extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + ZnCl ₂	2:1	99.55

Tabla 14 Eficiencias de extracción del cloruro de zinc con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).

Tomando como referencia las eficiencias de extracción obtenidas en el nitrato de cobre, se elaboró la gráfica que a continuación de muestra (*figura 39*).

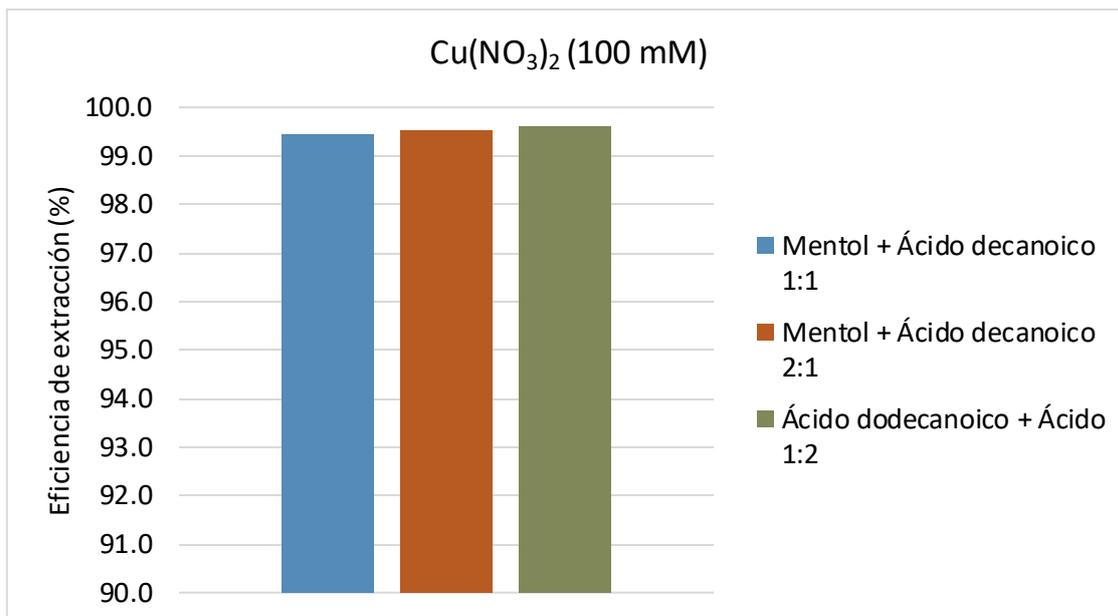


Figura 39 Eficiencias de extracción del nitrato de cobre con la presencia de un extractante (Trioctilamina a una concentración de 500 mM).

6.5. Discusión de resultados de las síntesis de los DES

En la *tabla 6* se puede observar que se sintetizaron un total 14 mezclas, de las cuales cinco resultaron en un disolvente eutéctico. Tres de estos disolventes eutécticos sintetizados se formaron a partir de mentol con ácido decanoico en relaciones molares 1:1, 1:2 y 2:1 (*figura 32 A, B y C*). Los otros dos disolventes eutécticos se formaron con base en ácido dodecanoico; una mezcla eutéctica fue de mentol con ácido dodecanoico en relación 2:1 (*figura 33 C*) y la otra fue de ácido dodecanoico con ácido octanoico en relación 1:2 (*figura 35 B*).

Al paso de varios días, las mezclas eutécticas de mentol con ácido decanoico (1:2), mentol con ácido dodecanoico (2:1) y ácido dodecanoico con ácido octanoico (1:2), presentaron la formación de una mínima cantidad de sólidos. Al agitar manualmente la mezcla o al colocarla en baño maría, las partículas sólidas desaparecían y la mezcla se volvía totalmente líquida, razón por la cual esos disolventes eutécticos se utilizaron para realizar las extracciones de metales.

Las mezclas de mentol con ácido decanoico en relación molar 1:3 (*figura 32 D*), mentol con ácido dodecanoico en relación molar 1:1 (*figura 33 A*) y 1:2 (*figura 33 B*), ácido decanoico con ácido dodecanoico en relación molar 1:2 (*figura 34 B*), ácido dodecanoico con ácido octanoico en relación molar 1:1 (*figura 35 A*) y 2:1 (*figura 35 C*), y la mezcla de mentol con ácido salicílico en relación molar 3:1 (*figura 36*), solidificaron inmediatamente después de que la agitación a 60°C

finalizó. De estas mezclas no fue posible sintetizar un disolvente eutéctico debido a que no se logró la formación de una red de enlaces hidrógeno.

Las mezclas de ácido decanoico con ácido dodecanoico en relación molar 1:1 (*figura 34 A*) y 2:1 (*figura 34 C*), al concluir la agitación a 60°C, presentaron una forma líquida, que después de 24 horas desapareció. La mezcla de relación molar 1:1 solidificó por completo mientras que la mezcla de relación molar 2:1 tenía pequeñas partículas sólidas.

La mezcla de ácido decanoico con ácido dodecanoico en relación 2:1, al tener una mínima cantidad de sólidos, se calentó a 60°C con agitación constante durante 3 horas. Después de 3 horas se formó un líquido incoloro con partículas sólidas blancas. Poco tiempo después la mezcla se puso turbia. Para analizar mejor el comportamiento de esta mezcla, se dejó en reposo durante 24 horas. Luego de estar en reposo la mezcla solidificó por completo. Se optó nuevamente por calentar la mezcla, pero esta vez durante 30 minutos a 90°C. Al paso de varios días en reposo, la mezcla era un líquido, pero aún había pequeñas partículas sólidas. Otra vez la mezcla se mantuvo en reposo durante 24 horas, y en esta ocasión se encontró nuevamente con una mezcla totalmente sólida. Con este experimento se observó que no fue posible sintetizar ciertos disolventes eutécticos a temperaturas altas.

El ácido decanoico ($C_{10}H_{20}O_2$) fue el ácido orgánico con el que se formaron la mayoría de los DES, este compuesto es un ácido de cadena media. Con el ácido dodecanoico ($C_{12}H_{24}O_2$) se lograron sintetizar dos DES; este ácido es también de cadena media. Con esto se observa que los ácidos orgánicos de cadena media fueron los más efectivos para la formación de los disolventes eutécticos sintetizados en este trabajo de investigación. Sin embargo, la mezcla de ambos ácidos en diferentes relaciones molares no resultó en ningún disolvente eutéctico (*tabla 6*).

El ácido dodecanoico podría ser el causante de la formación de las partículas sólidas en mezclas como las de mentol con ácido dodecanoico, ácido decanoico con ácido dodecanoico y ácido dodecanoico con ácido octanoico. Ya que también en los DES a base de este ácido hubo una mínima formación de sólidos.

6.5.1. Análisis de las eficiencias de las extracciones de metales

Las eficiencias de extracción se determinaron después de haber analizado las concentraciones de los metales presentes en las fases acuosas de los disolventes eutécticos.

- Eficiencias de extracción sin el uso de un extractante

En la *tabla 10* se indican las eficiencias de extracción de nitrato de cobre sin el uso de un extractante. De todas las eficiencias de extracción de cobre, únicamente la mezcla eutéctica de ácido dodecanoico con ácido octanoico (1:2) arrojó un porcentaje de extracción. Fue una eficiencia de extracción muy baja, pero hubo extracción, algo que no sucedió en los demás casos.

En la *tabla 11* se muestran las eficiencias de extracción de cloruro de zinc sin el uso de un extractante. En todas las mezclas eutécticas hubo extracción de zinc. Sin embargo, las eficiencias obtenidas fueron bajas. Los DES compuestos por mentol con ácido decanoico (1:2) y ácido dodecanoico con ácido octanoico (1:2) fueron las mezclas que registraron las eficiencias de extracción de zinc más altas. En la *figura 37* se muestra una gráfica que compara todas las eficiencias de extracción de cloruro de zinc sin el uso de un extractante.

En la *tabla 12* se señalan las eficiencias de extracción de cloruro de estroncio sin la presencia de un extractante. Se observa que al igual que en los demás casos, las eficiencias de extracción fueron demasiado bajas. No obstante, en todas las pruebas hubo extracción de estroncio. La eficiencia de extracción más alta se obtuvo con la mezcla eutéctica formada por ácido dodecanoico con ácido octanoico (1:2). En la *figura 38* hay una gráfica que compara los porcentajes de extracción de cloruro de estroncio obtenidos con cada uno de los DES sin extractante.

El disolvente eutéctico sintetizado a partir de ácido dodecanoico con ácido octanoico (1:2), fue el único disolvente con el que se obtuvieron las eficiencias de extracción más altas para los metales de cobre, zinc y estroncio presentes en las fases acuosas de los DES sin extractante.

Independientemente del tipo de disolvente eutéctico que se utilizó para extraer los diferentes metales, se observa que todas las eficiencias de extracción fueron muy bajas, e incluso hubo casos en los que no ocurrió la extracción.

Debido a las bajas eficiencias de extracción se requiere del uso de un extractante para promover la extracción de iones metálicos al disolvente eutéctico. El extractante es el compuesto que contribuirá a aumentar las eficiencias de las extracciones de metales.

- Eficiencias de extracción con el uso de un extractante

En la *tabla 13* se indican las eficiencias de extracción de nitrato de cobre con la presencia de trioctilamina en el disolvente eutéctico (*figura 39*). Se puede observar que la eficiencia más alta corresponde al DES formado por ácido

dodecanoico con ácido octanoico (1:2). No obstante, con las demás mezclas eutécticas también se obtuvieron elevadas eficiencias de extracción.

En la *tabla 14* se muestra la eficiencia de extracción del cloruro de zinc que se obtuvo con el disolvente eutéctico formado por mentol con ácido decanoico (2:1) en presencia de trioctilamina. La eficiencia obtenida en este caso fue más efectiva, en comparación con la eficiencia que se obtuvo cuando se utilizó la misma mezcla eutéctica sin extractante (*tabla 11*).

- Eficiencias de extracción de las mismas mezclas eutécticas en ausencia y presencia de un extractante.

En la *tabla 15* se muestra la comparación entre las eficiencias de extracción de disolventes eutécticos con los mismos componentes y con el uso u omisión de un extractante.

Mezcla	Relación molar	Eficiencia extracción (%)
Mentol + Ácido decanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:1	0.00
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:1	99.43
Mentol + Ácido decanoico + Cu(NO ₃) ₂	2:1	0.00
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	2:1	99.52
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Cu(NO ₃) ₂	1:2	7.18
Ácido dodecanoico + Ácido octanoico + Trioctilamina + Cu(NO ₃) ₂	1:2	99.61
Mentol + Ácido decanoico + ZnCl ₂	2:1	4.21
Mentol + Ácido decanoico + Trioctilamina + ZnCl ₂	2:1	99.55

Tabla 15 Eficiencias de extracción de las mismas mezclas eutécticas con y sin trioctilamina como extractante.

Se observa que la eficiencia de extracción más alta pertenece al cobre, tanto con y sin el uso de un extractante. Estas eficiencias se obtienen con el uso del disolvente eutéctico formado por ácido dodecanoico con ácido octanoico en relación molar 1:2.

Las eficiencias de extracción de los disolventes eutécticos en presencia de trioctilamina como extractante, son mucho más efectivas que las eficiencias de extracción de los disolventes eutécticos sin extractante. Evidentemente las eficiencias de extracción aumentaron hasta un 100% gracias a la adición del

extractante. La trioctilamina se eligió por su excelente capacidad como extractante.

En general los resultados obtenidos indican que, para obtener excelentes eficiencias de extracción con el uso de los disolventes eutécticos sintetizados, el uso de un extractante debe ser indispensable para promover la extracción.

Con los resultados alcanzados se muestra que los disolventes eutécticos sintetizados pueden utilizarse de manera exitosa en extracciones de metales desde fases acuosas. En este trabajo se ocuparon tres tipos diferentes de disolventes eutécticos con distintas relaciones molares (*tabla 15*) para investigar la posibilidad de extraer metales desde fases acuosas.

En esta investigación fue posible diseñar un sistema en donde se utilizó un disolvente eutéctico con base en fuentes naturales para extraer metales desde fases acuosas. En este sistema la única parte no biodegradable fue el extractante, el cual se utilizó en mínimas cantidades; para minimizar el daño ambiental que pueda ocasionar el uso del extractante, se debe procurar la correcta separación de éste después de realizar la extracción.

Con base en los resultados, el uso de estos disolventes eutécticos con un extractante tiene un gran potencial para el reemplazo de disolventes convencionales en la extracción de metales desde fases acuosas.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En esta tesis se estudió el uso de disolventes eutécticos hidrofóbicos (DES) en los procesos de extracción de metales desde fases acuosas.

Se investigó la formación de nuevos disolventes eutécticos, mediante la identificación de aceptores y donadores de enlaces hidrógeno, a partir de sustancias orgánicas como metanol y ácidos carboxílicos tales como ácido octanoico, ácido decanoico y ácido dodecanoico.

De todas las mezclas realizadas, únicamente el diseño y síntesis de cinco disolventes eutécticos hidrofóbicos se llevó a cabo con éxito. Las mezclas eutécticas sintetizadas fueron las siguientes: mentol con ácido decanoico (relaciones molares 1:1, 1:2 y 2:1), mentol con ácido dodecanoico (relación molar 2:1) y ácido dodecanoico con ácido octanoico (relación molar 1:2).

Los ácidos orgánicos que estuvieron presentes en la mayoría de las síntesis de los disolventes eutécticos fueron ácido decanoico ($C_{10}H_{20}O_2$) y ácido dodecanoico ($C_{12}H_{24}O_2$), los cuales son ácidos de cadena media. Por lo que se puede decir que para este trabajo los ácidos orgánicos de cadena alifática media fueron los más efectivos en las síntesis de disolventes eutécticos.

Los disolventes eutécticos sintetizados se ocuparon para realizar extracciones de metales (extracciones de cobre, zinc y estroncio) desde las fases acuosas generadas por la mezcla de los DES con las disoluciones metálicas. Los disolventes eutécticos se trabajaron con y sin un extractante.

Cuando los disolventes eutécticos se utilizaron sin la presencia de un extractante se encontraron eficiencias muy bajas de extracción. En estos casos ningún disolvente eutéctico fue capaz de extraer más del 10% de los metales desde las fases acuosas. Debido a estas eficiencias bajas se eligieron tres disolventes eutécticos en presencia de trioctilamina para llevar a cabo las extracciones de metales desde fases acuosas.

Con el uso de los disolventes eutécticos en presencia de trioctilamina como extractante se obtuvieron mejores eficiencias de extracción de metales, las cuales estuvieron muy cerca del cien por ciento de eficiencia sin excepción. Con base en estos resultados se determinó que, para promover un mejor rendimiento en la extracción de metales desde fases acuosas con disolventes eutécticos, se necesita del uso de un extractante adicional.

Los disolventes eutécticos, a pesar de que sin el uso de un extractante no se obtienen altas eficiencias, siguen siendo una gran alternativa para desarrollar

extracciones de metales más sostenibles. Al adicionar un extractante la extracción es muy alta. Por esta razón los disolventes eutécticos pueden reemplazar o disminuir el uso de disolventes orgánicos en procesos de extracción de metales, además de que tienen un impacto positivo en el ambiente.

Con los resultados de este trabajo de investigación se presenta un posible sistema de uso de los disolventes eutécticos hidrofóbicos con base en fuentes naturales, donde únicamente el extractante no es biodegradable. Este sistema podría formar la base de futuros procesos industriales a gran escala.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- (1) Monreal, R.; Hernández, P. Y. Mi México Es Minero. 2015, 1–102.
- (2) Gaytán, E.; Benita, F. La Industria Minera En México: Patrones de Desempeño y Determinantes de Eficiencia. Lect. Econ. 2014, No. 80, 1–29. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n80a4>.
- (3) Rodríguez, M. A.; Garay, C. G.; Sánchez, R. El Aluminio, Material Trascendente En La Historia Humana. Temas Cienc. y Tecnol. 2017, 21, 3–9.
- (4) Centro Filatélico y Numismático San Fransico. El Descubrimiento de Los Metales y El Origen de La Moneda. No. 1, 1–12.
- (5) Yarto, M.; Gavilán, A.; Castro, J. La Contaminación Por Mercurio En México. Gac. ecológica 72 2003, 21–34.
- (6) Villanueva Rodríguez, T. Los Metales En Castilla y León. Soc. Investig. y Explot. Minera Castilla y León 2008, 1–24.
- (7) Regueiro, M. Los Minerales Industriales En La Vida Cotidiana. Enseñanza las Ciencias la Tierra, 2008 2015, 286, 276–286.
- (8) Villanueva Rodríguez, T. Los Recursos Mineros de Castilla y León. Soc. Investig. y Explot. Minera Castilla y León 2008, 1–24.
- (9) Conant, J.; Fadem, P. La Minería y La Salud. Hesperian Heal. Guid. 2011, 470–497.
- (10) Perales, L. H.; Cruz, L. E. H. Líquidos iónicos en la industria extractiva. Boletín científico de ciencias básicas e ingenierías. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n1/e2.html>.
- (11) Alguacir, F. J. La Recuperación de Cobre Mediante Lixiviación-Extracción Con Disolventes-Electrólisis: Hacia El Siglo XXI. Rev. Metal. 1998, 34 (6), 499–506.
- (12) New Jersey Department of Health and Senior Services. Hoja Informativa Sobre Substancias Peligrosas - Cianuro de Sodio. 2012, 2–6.
- (13) Comisión Nacional del Medio Ambiente. Guía Para El Control y Prevención de La Contaminación Industrial. Manejo de Solventes. 1999, 1–79.
- (14) Moran, R. E. El Cianuro En La Minería: Algunas Observaciones Sobre La Química, Toxicidad y Análisis de Las Aguas Asociadas Con La Minería. 1999, 1–23.
- (15) Franco-Vega, A.; Palou, E.; Ramírez-Corona, N.; López-Malo, A. Líquidos Iónicos: Una Alternativa " Verde " Para Procesos de Extracción En La Industria de Alimentos. 2014, 15–26.
- (16) Morales Vite, X. Los Disolventes En La Química Verde, 2013.

- (17) Martínez, F. Disolventes Orgánicos, Pinturas y Barnices. Técnicas de Prevención de la Generación de Suelos Contaminados: La Gestión de Residuos Peligrosos. 2000, pp 569–570.
- (18) Mundial, O. M. ¿Hay Suficientes Agua En El Mundo? Organ. las Nac. Unidas para la Educ. la Cienc. y la Cult. 1997, 99–117.
- (19) Alonso, D.; Baeza, A.; Chinchilla, R.; Gómez Lucas, C.; Guillena, G.; Marset, X.; Pastor, I.; Ramón, D.; Ros Níguez, D.; Saavedra, B. Mezclas Eutécticas Como Alternativa Sostenible a Los Disolventes Convencionales En Química Orgánica. An. la Real Soc. Española Química 2018, 114 (2), 79–87.
- (20) Karrer, P.; Eugster, C. H. Disolventes Eutécticos Profundos (DES, DEEP EUTECTIC SOLVENTS) Nuevos Disolventes Biorenovables En Catálisis Homogénea Mediada Por Metales de Transición. Helv. Chim. Acta 2013, 33 (5), 1172–1174. <https://doi.org/10.1002/hlca.19500330507>.
- (21) J. Carlos, D. Alvarez, R. M. Rey, R. B. A. Líquidos Iónicos: Propiedades Fisicoquímicas y Aplicación Potencial En El Mejoramiento de Crudos Pesados Ionic Liquids: Physicochemical Properties and Potential Application in Upgrading of Heavy Crude Oils. Rev. ION 2012, 25 (1), 61–87.
- (22) Claros Vargas, M. C. Síntesis, Caracterización y Aplicación de Nuevos Líquidos Iónicos Dicatiónicos, 2012.
- (23) Smith, E. L.; Abbott, A. P.; Ryder, K. S. Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. Chem. Rev. 2014, 114 (21), 11060–11082. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>.
- (24) Romero Salvador, A. Líquidos Iónicos a Temperatura Ambiente: Un Nuevo Medio Para Las Reacciones Químicas. Real Acad. Ciencias Exactas, Físicas y Nat. 2008, 102 (1), 79–90.
- (25) Rodríguez Celma, I. Líquidos Iónicos. Propiedades, Síntesis y Aplicaciones, 2017.
- (26) Pena-Pereira, F.; Namieśnik, J. Ionic Liquids and Deep Eutectic Mixtures: Sustainable Solvents for Extraction Processes. ChemSusChem 2014, 7 (7), 1–17. <https://doi.org/10.1002/cssc.201301192>.
- (27) Thuy Pham, T. P.; Cho, C. W.; Yun, Y. S. Environmental Fate and Toxicity of Ionic Liquids: A Review. Water Res. 2010, 44 (2), 352–372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.09.030>.
- (28) Li, X.; Row, K. H. Development of Deep Eutectic Solvents Applied in Extraction and Separation. J. Sep. Sci. 2016, 39 (18), 3505–3520. <https://doi.org/10.1002/jssc.201600633>.
- (29) Cunha, S. C.; Fernandes, J. O. Extraction Techniques with Deep Eutectic Solvents. TrAC - Trends Anal. Chem. 2018, 105, 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.05.001>.
- (30) Van Osch, D. J. G. P.; Parmentier, D.; Dietz, C. H. J. T.; Van Den Bruinhorst, A.; Tuinier, R.; Kroon, M. C. Removal of Alkali and Transition

- Metal Ions from Water with Hydrophobic Deep Eutectic Solvents. *Chem. Commun.* 2016, 52 (80), 11987–11990. <https://doi.org/10.1039/c6cc06105b>.
- (31) Maquilón Albaladejo, C. Complejos Metálicos Para La Captura Y Fijación De Co₂ En Moléculas Orgánicas En Disolventes Eutécticos, 2016.
 - (32) Sánchez San Segundo, J. Formación y Caracterización de Disolventes Eutécticos Profundos : Aplicación a La Extracción de Moléculas de Interés. 2019, 1–59.
 - (33) Florindo, C.; Branco, L. C.; Marrucho, I. M. Development of Hydrophobic Deep Eutectic Solvents for Extraction of Pesticides from Aqueous Environments. *Fluid Phase Equilib.* 2017, 448, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.04.002>.
 - (34) Tamayo, J. F. R.; Jácome, J. S.; Vásquez, A. L.; Zurita, V. R. La Industria de La Minería En El Perú - 20 Años de Contribución Al Crecimiento y Desarrollo Económico Del País. 2017, 1–166.
 - (35) INEGI. Minería - Algunas clasificaciones en la minería. <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/mineria/default.aspx?tema=E> (accessed 2020-02-11).
 - (36) Orozco, W.; Branch, J.; Jiménez, J. Clasificación de Rocas Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas En Secciones Delgadas a Través de Programación Estructurada. *Univ. Nac. Colomb. - Boletín Ciencias la Tierra* 2014, 12 (26), 1–8.
 - (37) Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Los Mienrales. 2016, 1–8.
 - (38) Servicio Geológico Mexicano. Clasificación de los minerales. Museo virtual. <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Clasificacion-de-los-minerales.html>.
 - (39) Ministerio de Minería de Chile. Tipos de Minerales - Ministerio de Minería. Gobierno de Chile. <http://www.minmineria.gob.cl/?que-es-la-mineria/tipos-de-minerales/> (accessed 2020-03-11).
 - (40) Xunta de Galicia. Recursos energéticos y minerales. http://centros.edu.xunta.es/iesbeade/Departamento_biologia-xeologia/CTMA-Recursos_minerales_y_energeticos.pdf.
 - (41) INCyTU. Minería En Mares Profundos. 2018, 52 (55), 1–6.
 - (42) Coordinación General de Minería de la Secretaría de Economía. Minas En Movimiento. 2011, 1–52.
 - (43) Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). Vista General de La Actividad Minera y Sus Impactos. 2007, 3–20.
 - (44) Coordinación General de Minería. Guía Para Conocer Las Etapas Del Proceso Productivo Para La Pequeña Minería. Secretaría de economía. pp 1–12.
 - (45) López Aburto, V. M. Manual Para La Selección de Métodos de Explotación

- de Minas. 1994, 1–126.
- (46) Herrera, J.; Ortiz de Urbina, F. Métodos de La Minería a Cielo Abierto. Universidad Politécnica de Madrid. 2006, pp 1–119.
 - (47) Amstrong, J.; Menon, R. Minas y Canteras. Enciclopedia de seguridad y salud en el trabajo. 2001, pp 1–64.
 - (48) Rubio, E.; Peirano, F.; Cueva, O. E.; Jackson, S. I.; Kiyanda, C. B. Manual de Minería. Proc. Combust. Inst. 2017, 27 (2), 648–655. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
 - (49) Cárdenas, J. La Minería En México: Despojo a La Nación. Rev. Mex. Derecho Const. 2013, 28.
 - (50) Montero, J. Minerales y Rocas. Ciencias la Nat. 2007, 51–92. <https://doi.org/10.1021/ie960340m>.
 - (51) Díaz, M. R.; Tesoro, A.; Correa, A. V.; Ocampo, A.; Ruggeri, P.; Delfino, R. Salud y Seguridad En Trabajos de Minería. 2009, 1–108.
 - (52) Somoza, L.; González, F. Minería Submarina: Se Inicia La Explotación de Los Fondos Oceánicos. Enseñanza las ciencias la tierra Rev. la Asoc. Española para la Enseñanza las Ciencias la Tierra 2011, 19 (1), 115–118.
 - (53) Restrepo, O. J.; Bustamante, O. M.; Gaviria, A. C. Pirometalurgia. Univ. Nac. Colomb. 2008, 1–109.
 - (54) Muñoz Portero, M. J. Extracción de Metales Por Hidrometalurgia: Procesamiento de Cobre y Cinc. Esc. Técnica Super. Ing. Ind. 2016, 2, 1–9.
 - (55) Muñoz Portero, M. J. Extracción de Metales Por Pirometalurgia: Procesamiento de Hierro, Acero, Cobre y Aluminio. Univ. Politec. Val. 2016, 1–10.
 - (56) Villanueva Rodríguez, T. Los Minerales Industriales En Castilla y León. Soc. Investig. y Explot. Minera Castilla y León 2007, 1–24.
 - (57) Secretaría de Economía. Manual Del Inversionista En El Sector Minero En México. 2020, 1–74.
 - (58) Secretaría de Economía. Minería. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>.
 - (59) Cantú, M. A.; Ibarra, C. Y.; Camacho, J. J.; Gutiérrez, I.; Cruz, R. Anuario Estadístico de La Minería Mexicana, 2017. 2018, 1–535.
 - (60) Fideicomiso de Fomento Minero. Contexto de México en la Minería. <https://www.gob.mx/fifomi/articulos/contexto-de-mexico-en-la-mineria?idiom=es>.
 - (61) Alanís, S. F.; Almazán, S. R. Informe Anual 2019. Cámara Minera de México 2019, 1–357.
 - (62) Coll, A.; Sánchez, M. T.; Morales, J. La Minería En México, Geografía, Historia, Economía y Medio Ambiente. México 2002, pp 1–152.

- (63) Téllez, I.; Sánchez, M. T. La Expansión Territorial de La Minería Mexicana Durante El Periodo 2000-2017. Una Lectura Desde El Caso Del Estado de Morelos. *Investig. Geográficas* 2018, 1–18. <https://doi.org/10.14350/rig.59607>.
- (64) Rodríguez, M. J. de J. Minería En México. Referencias Generales, Régimen Fiscal, Concesiones y Propuestas Legislativas. 2011, 1–52.
- (65) Gómez, M. El Sector Minero y Su Importancia En Las Finanzas Públicas de México 2007-2017. *Cent. Estud. las Finanz. públicas* 2018, 1–47.
- (66) Navazo, M.; Durana, N.; Alonso, L.; García, J. Caracterización de Compuestos Orgánicos Volátiles Atmosféricos En Áreas Industriales, Urbanas y Rurales de La C.A.V. 1995-2003. 2003, No. 1987, 1–29.
- (67) Puente, C.; Ramarosan, R. Medición y Análisis de Los Compuestos Orgánicos Volátiles En La Atmósfera: Últimas Técnicas, Aplicabilidad y Resultados a Nivel Europeo. *Rev. ION* 2006, 19 (1), 43–47.
- (68) European Solvents Industry Group & Solvents Industry Association. La Familia de Los Disolventes. *A Sect. Gr. Cefic* 2018, 1–5.
- (69) Gutiérrez Escamilla, M. A. Los Disolventes Orgánicos y Su Exposición Ocupacional, 2007.
- (70) CEPSA. Disolventes oxigenados. <https://chemicals.cepsa.com/es/quimicos/disolventes/oxigenados>.
- (71) Vásquez, D. Catálogo de Productos: Disolventes oxigenados. Industrial Solutions TS&D. www.grupo-postigo.es.
- (72) Rafael, G.; Dolores, R.; Tatiana, S. Sustitución de Sustancias Disolventes Peligrosas. 2007, 1–72.
- (73) Stellman, J.; Osinsky, D.; Markkanen, P. Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo: Alcoholes y Aldehídos. Minist. Trab. y Asuntos Soc. Subdirección Gen. Publicaciones 2001, 1–41.
- (74) Cruz, F.; Haro, J. A.; López, I.; Alatorre, S. Guía Temática Para El Curso de Química Orgánica II. Div. Ciencias Biológicas y la Salud 2017, 1–137.
- (75) Stellman, J.; Osinsky, D.; Markkanen, P. Enciclopedia de Salud y Seguridad En El Trabajo: Hidrocarburos Aromáticos. Minist. Trab. y Asuntos Soc. Subdirección Gen. Publicaciones 2001, 1–56.
- (76) Montón Molina, R. Hacia El Desarrollo Sostenible: Líquidos Iónicos Como Catalizadores Para La Transposición de Beckmann y Reacciones de Formación de Enlaces C-C. *Univ. Politécnica Val.* 1–266.
- (77) Doria Serrano, M. del C. Química Verde: Un Nuevo Enfoque Para El Cuidado Del Medio Ambiente. *Educ. Química* 2009, 20 (4), 412–420. [https://doi.org/10.1016/s0187-893x\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/s0187-893x(18)30044-2).
- (78) Reyes Aguilar, Y. Líquidos Iónicos, Características, Propiedades, Usos y Perspectivas, 2013.
- (79) Aroso, I. M.; Paiva, A.; Reis, R. L.; Duarte, A. R. C. Natural Deep Eutectic

- Solvents from Choline Chloride and Betaine – Physicochemical Properties. *J. Mol. Liq.* 2017, 241, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.051>.
- (80) Turullois, I. D. M.; García, B. H.; Morales, E. A. M.; Bergas, E. M. Exfoliación de Grafito Con Disolventes Eutécticos Profundos. 2016, 1–16.
- (81) Santos, G.; Vera, Y. M. Estudio de La Extracción de Tierras Raras Ligeras a Partir de La Extracción Líquido – Líquido Utilizando Ácidos Organofosforados y Ácido Ascórbico. *Rev. Metal.* 2019, 55 (2), 1–142. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.142>.
- (82) Laboratorio de Ingeniería Química UNAM. Procesos de Separación I. Fac. Química UNAM 2010, 1–20.
- (83) Aguado Bernal, R. Extracción Líquido-Líquido. Operaciones Básicas Lab. Inorgánica 2013, 1–5.
- (84) Arcos, N. K. R.; Gómez, M. J. H. V. Rediseño de La Columna de Extracción Líquido Líquido y Ensayo Didáctico; 2017; Vol. 4.
- (85) Nuñez, C. E. Extracción Con Equipo Soxhlet. *Bioquímica y Biol. Mol.* 2008, 2 (3), 1–5.
- (86) Casillas Navarrete, I. Propuesta de Una Práctica de Extracción Líquida En Una Etapa Para El Laboratorio de Introducción a Los Procesos de Separación, 2014.
- (87) Arce, A.; Soto, A. M. Phase Equilibria for Extraction Processes with Designer Solvents, 2013.
- (88) Pérez de los Ríos, A. Los Líquidos Iónicos Como Nuevos Medios de Reacción y Separación En Reacciones de Transesterificación Enzimáticas, 2007.
- (89) González, J. M.; Corzo, J. Fuerzas intermoleculares. Universidad del País Vasco. <http://www.ehu.es/biomoleculas/moleculas/fuerzas.htm> (accessed 2021-10-29).
- (90) Sobekova Foltova, S.; Vander Hoogerstraete, T.; Banerjee, D.; Binnemans, K. Samarium/Cobalt Separation by Solvent Extraction with Undiluted Quaternary Ammonium Ionic Liquids. *Sep. Purif. Technol.* 2019, 210 (May 2018), 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.069>.
- (91) Janssen, C. H. C. Prevailing Mechanisms in Pseudo-Protic Ionic Liquid Metal Extractions. *J. Mol. Liq.* 2020, 304, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112738>.
- (92) Barrios Vidal, K. A. Funcionalización de Soportes Cerámicos Mediante Recubrimientos Nanométricos Obtenidos a Partir de Disolventes Eutécticos Para Remover CO₂. 2018, 1–96.
- (93) González, Alfredo C.; Cuyas, J. C. Fundamento Del Comportamiento de Los Materiales I - Diagrama de Fase Binarios. Univ. Nac. la Plata 2011, 1–37.
- (94) Mosquera, L.; Arias, S.; Jimenez, D.; Lopez, D.; Osorio, A. Transición Vítrea En Alimentos: Sistemas Binarios Agua-Carbohidratos. *Rev. Vector*

2015, 9 (2014), 1–24.

- (95) Aroso, I. M.; Silva, J. C.; Mano, F.; Ferreira, A. S. D.; Dionísio, M.; Sá-Nogueira, I.; Barreiros, S.; Reis, R. L.; Paiva, A.; Duarte, A. R. C. Dissolution Enhancement of Active Pharmaceutical Ingredients by Therapeutic Deep Eutectic Systems. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2016, 98 (November 2017), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2015.11.002>.
- (96) Ribeiro, B. D.; Florindo, C.; Iff, L. C.; Coelho, M. A. Z.; Marrucho, I. M. Menthol-Based Eutectic Mixtures: Hydrophobic Low Viscosity Solvents. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2015, 3 (10), 2469–2477. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00532>.
- (97) Hayyan, A.; Mjalli, F. S.; Alnashef, I. M.; Al-Wahaibi, T.; Al-Wahaibi, Y. M.; Hashim, M. A. Fruit Sugar-Based Deep Eutectic Solvents and Their Physical Properties. *Thermochim. Acta* 2012, 541, 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.030>.
- (98) Estrada Atehortúa, A. F.; Berrouet Mejía, M. C.; Andrés Giraldo, J. Toxicidad Por Neonicotinoides: Revisión de Tema y Reporte de Dos Casos. *Med. UPB* 2016, 35 (1), 41–46. <https://doi.org/10.18566/medupb.v35n1.a06>.
- (99) Goulson, D.; Wood, T. El Riesgo Medioambiental de Los Insecticidas Neonicotinoides : Prólogo. 2017, 1–7.
- (100) López Tejeda, R.; Camacho Rodríguez, V.; Gutiérrez Coronado, M. A. Aplicación de Ácido Salicílico Para Incrementar El Rendimientos Agronomico En Tres Variedades de Trigo. *Terra* 1998, 16 (1), 43–48.
- (101) Cuéllar, L.; Sehtman, A.; Donatti, L.; Allevato, M. Acido Salicílico. 2008, 108–112.
- (102) Haas, C. T.; González, G. A.; Saavedra, A. L. Efecto Del Ácido Salicílico En El Crecimiento de La Raíz y Biomasa Total de Plántulas de Trigo. *Acta Agron. Hungarica* 2005, 53 (4), 433–437. <https://doi.org/10.1556/AAgr.53.2005.4.9>.
- (103) Díaz, D. A. V.; Pérez, L. S.; Rangel, P. P.; Castruita, M. Á. S.; Fuentes, J. A. G.; García, J. R. V. Efecto Del Ácido Salicílico En La Producción y Calidad Nutracéutica de Frutos de Tomate. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* 2016, No. 17, 3405–3414.
- (104) Guzmán-Antonio, A.; Borges-Gómez, L.; Pinzón-López, L.; Ruíz-Sánchez, E.; Zúñiga-Aguilar, J. Efecto Del Ácido Salicílico y La Nutrición Mineral Sobre La Calidad de Plántulas de Chile Habanero. *Agron. Mesoam.* 2012, 23 (2), 247–257. <https://doi.org/10.15517/am.v23i2.6485>.
- (105) Rangel Sánchez, G.; Castro Mercado, E.; Beltran Peña, E.; Reyes de la Cruz, H.; García Pineda, E. El Acido Salicílico y Su Participación En La Resistencia a Patógenos En Plantas. *Biológicas* 2010, 12 (2), 90–95.
- (106) Gorban, A. M. S.; Izzeldin, O. M. Study on Cholesteryl Ester Fatty Acids in Camel and Cow Milk Lipid. *Int. J. Food Sci. Technol.* 1999, 34 (3), 229–234. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1999.00254.x>.

- (107) Sigma-Aldrich. Ácido Caprílico (Ácido Octanoico) EMPROVE ®. MilliporeSigma 2021, 1–10.
- (108) Zhang, W.; Wang, R.; Yuan, Y.; Yang, T.; Liu, S. Changes in Volatiles of Palm Kernel Oil before and after Kernel Roasting. *LWT - Food Sci. Technol.* 2016, 73, 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.051>.
- (109) Sengpracha, W.; Agustin, M. B.; Phutdhawong, W. A Survey on the Fatty Acid Composition of Commercial Palm Oil in Thailand. *Chem. Sci. Trans.* 2012, 1 (3), 612–617. <https://doi.org/10.7598/cst2012.258>.
- (110) Santos, J. E. R.; Villarino, B. J.; Zosa, A. R.; Dayrit, F. M. Analysis of Volatile Organic Compounds in Virgin Coconut Oil and Their Sensory Attributes. *Philipp. J. Sci.* 2011, 140 (2), 161–171.
- (111) Sant'Ana, A. M. S.; Bezerril, F. F.; Madruga, M. S.; Batista, A. S. M.; Magnani, M.; Souza, E. L.; Queiroga, R. C. R. E. Nutritional and Sensory Characteristics of Minas Fresh Cheese Made with Goat Milk, Cow Milk, or a Mixture of Both. *J. Dairy Sci.* 2013, 96 (12), 7442–7453. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6915>.
- (112) Kęszycka, M. M.; Czyżak, G.; Lipińska, P.; Wójtowski, J. Fatty Acid Profile of Milk - A Review. 2013, 135–139. <https://doi.org/10.2478/bvip-2013-0026>.
- (113) Cailà & Parés. Ácido Caprílico o Cáprico. <https://cailapares.com/acido-caprilico-caprico/>.
- (114) Merck. Ácido Decanoico Para Síntesis. 2007, 2006, 1–5.
- (115) Borse, B. B.; Jagan, L.; Rao, M.; Ramalakshmi, K.; Raghavan, B. Chemical Composition of Volatiles from Coconut Sap (Neera) and Effect of Processing. 2007, 101, 877–880. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.026>.
- (116) InStijl Media. Ácido decanoico. Laboratorium Discounter. <https://www.laboratoriumdiscounter.nl/es/quimicos/a-z/d/acido-decanoico/>.
- (117) Mora Gil, O. L. Ácido Láurico: Componente Bioactivo Del Aceite De Palmiste. *Palmas* 2003, 24 (1), 79–83.
- (118) Cailà & Parés. Ácido láurico. <https://cailapares.com/acido-laurico/>.
- (119) Dasilva Rodriguez, C. P.; Restrepo Valencia, F. I.; Peralta Montalvo, I. A.; Vásquez Linares, M. M.; Portuna Espriella, M. L.; Arango Portura, Y. Extracción de Aceite de Coco (Cocos Nucíferas) Como Estrategias de Aprovechamiento de Los Productos Locales de Mitú. *Vaupés Innova* 2017, No. 1, 1–8.
- (120) Sigma-Aldrich. (-)-Mentol. MilliporeSigma 2021, 2 (1907), 2–7.
- (121) Acofarma distribución S.A. Mentol Cristal. 2010, 3–5.
- (122) Morayma, M.; Isable, C.; Olga, L. Quantitative Analysis of Menthol in Mentha Essential Oil By Gas. 2006, 1–8.
- (123) Sigma-Aldrich. Trioctilamina. 2021, 1–9.

- (124) Gutiérrez Pozo, F. D. Adsorción de Cromo Mediante El Empleo de Microcápsulas Que Contienen Extractantes Aniónicos Comerciales. *An. la Univ. Chile* 1983, 0 (2), 78–115. <https://doi.org/10.5354/0717-8883.1983.23025>.
- (125) Udachan, I. S.; Sahoo, A. K. A Study of Parameters Affecting the Solvent Extraction of Lactic Acid from Fermentation Broth. *Brazilian J. Chem. Eng.* 2014, 31 (3), 821–827. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00002495>.
- (126) Alcázar Román, Á. Synthesisi of Microcapsules Containing Extractant Agents for the Selective Removal of Heavy Metals from Wastewaters. *Univ. Castilla-La Mancha* 2015, 1–262.
- (127) Hou, X.; Jones, B. Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy. *Encycl. Anal. Chem.* 2000, 46 (13), 1–19. <https://doi.org/10.1021/ac60349a722>.
- (128) Sánchez de Rojas, M. I.; De Luxán, M. P.; Frías, M. La Espectrometría de Emisión Con Fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo. *Cons. Super. Investig. Científicas - Mater. Construcción* 1986, 36 (202), 1–16. <https://doi.org/10.3989/mc.1986.v36.i202.896>.
- (129) Soria Juárez, R. Aplicación de La Técnica Analítica de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma. *Contacto Nucl.* 1980, 1–3.

ANEXO I

El espectrofotómetro de emisión óptico está integrado por¹²⁷⁻¹²⁹:

- **PLASMA.**
En el sistema Perkin-Elmer, el plasma está conformado por el gas noble argón (Ar), también conocido como gas plasmógeno.
- **SISTEMA DE INTRODUCCIÓN DE LA MUESTRA.**
Está formado por una bomba peristáltica, nebulizador y cámara de nebulización, lo cual permite el eficaz aporte de muestra con suficiente tiempo de residencia y estabilidad en el plasma. Este sistema básicamente consiste en la generación de aerosoles con técnicas nebulización.
- **SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE GAS.**
Formado por argón para transportar la muestra, conformar el plasma y el enfriamiento.
- **SISTEMA ÓPTICO.**
Permite separar el espectro emitido en sus diferentes longitudes de onda, para así acceder a la identificación y cuantificación de cada uno de los elementos que están en la muestra.
- **SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA SEÑAL.**
Ejecuta el análisis cualitativo y cuantitativo a partir de las radiaciones emitidas.
- **SISTEMA INFORMÁTICO.**
Procesa la información generada por el equipo.

El uso del plasma de acoplamiento inductivo como fuente de excitación permite determinar la presencia de elementos metálicos. El plasma, en la espectroscopia, es un gas parcialmente ionizado que se encuentra en un campo electromagnético. Cuando el plasma interactúa con el campo magnético se origina un acoplamiento inductivo de campos magnéticos variantes en el tiempo con el plasma.

Las temperaturas que se tienen en un plasma ICP son demasiado elevadas, van de 4,000 a 10,000 K, lo cual provoca que haya una excitación en los átomos de

las muestras y además se produzca la disociación de combinaciones químicas que suelen ser muy estables.

El plasma está conformado por electrones libres, iones argón, átomos de argón excitados y en estado fundamental y por moléculas de argón ionizadas y neutras. Los electrones libres, los iones argón y los átomos de argón excitados pueden ceder su energía a los átomos de los elementos de las muestras introducidas en el plasma. Esas energías son suficientes para excitar a gran parte de los átomos de las muestras.

La ionización del gas se consigue mediante la circulación del mismo por una serie de tubos concéntricos de cuarzo, los cuales forman la "Antorcha". La antorcha es una pieza fundamental en el equipo que está formada por tubos externos e internos. La función de los tubos externos es transportar el gas, mientras que el tubo interno se encarga de hacer llegar la muestra en forma de aerosol al interior de la flama que se produce por el plasma.

Para obtener la ionización se debe usar una corriente de alta frecuencia para que genere un campo magnético oscilante; esto puede ser a través de una bobina de inducción de Tesla que se alimenta por un generador de radiofrecuencia que aporta energía externa al plasma.

La aparición del campo magnético induce a los iones y electrones a moverse circularmente para crear corrientes eléctricas que causan un calentamiento de los gases y suministran la continuidad del plasma. Debido a los átomos ionizados, en el extremo de la antorcha aparece una "flama" que está presente durante todo el proceso.

Cuando los átomos están ionizados, es decir, cuando se libera la energía absorbida en el plasma por los átomos excitados para pasar a su estado fundamental, se emiten radiaciones electromagnéticas.

Las radiaciones electromagnéticas varían según el tipo de elemento que se esté analizando. El elemento se determina con base en la frecuencia emitida por las radiaciones y la concentración del elemento en la fase acuosa se establece mediante la intensidad de estas. Una vez que las radiaciones electromagnéticas están ya focalizadas sobre un monocromador, se transforman en datos.